PIARC
2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROAD TUNNEL OPERATIONS AND SAFETY
&
VIII SPANISH TUNNELS SYMPOSIUM

VOLUME II

Granada (Spain), 25th - 28th October 2022
Road Tunnels Committee

Asociación Técnica de Carreteras

PIARC

PIARC
2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROAD TUNNEL OPERATIONS AND SAFETY
&
VIII SPANISH TUNNELS SYMPOSIUM

Comité de Túneles de Carretera. Asociación Técnica de Carreteras

VOLUME II

EDITA:
Asociación Técnica de Carreteras
C/ Monte Esquinza, 24
28010 Madrid

ARTE FINAL E IMPRESIÓN:
Huna Comunicación
Av. de los Montes de Oca, 7
28703 San Sebastián de los Reyes, Madrid

ISBN:
978-84-95641-48-9

DEPÓSITO LEGAL:
M-4475-2019

Impreso en España - Printed in Spain

HONORARY COMMITTEE
COMITÉ DE HONOR / COMITÉ D'HONNEUR

Co-Presiden:

D. Juan Manuel Moreno Bonilla
Presidente de la Junta de Andalucía

Dña. Raquel Sánchez Jiménez
Ministra de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana

Miembros:

D. Francisco Cuenca Rodríguez
Alcalde de Granada
Ayuntamiento de Granada

Dña. Isabel Pardo de Vera Posada
Secretaria de Estado de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana

D. José Entrena Ávila
Presidente de la Diputación Provincial de Granada

D. Xavier Flores García
Secretario General de Infraestructuras
Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana

Mr. Nazir Alli
Presidente de PIARC

Dña. Marifrán Carazo Villalonga
Consejera de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio
Junta de Andalucía

D. Francisco Javier Herrero Lizano
Director General de Carreteras
Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana
1er Delegado español en PIARC

Dña. María del Rosario Cornejo Arribas
Presidenta de la Asociación Técnica de Carreteras

ORGANIZING COMMITTEE

COMITÉ ORGANIZADOR / COMITÉ ORGANISATEUR

Co-Presiden:

D. Francisco Javier Herrero Lizano
Director General de Carreteras.
Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.
1er Delegado español en PIARC

Mr. Patrick Mallejacq
Secretario General de PIARC

Miembros:

D. Enrique Catalina Carmona
Director General de Infraestructuras de la Junta de Andalucía

D. Álvaro Navareño Rojo
Subdirector General de Conservación
Ministerio de Transportes,Movilidad y Agenda Urbana

D. Miguel Caso Flórez
Director Técnico de PIARC

D. Salvador Fernández Quesada
Jefe de la Demarcación de Carreteras del Estado en Andalucía Oriental
Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana

D. Juan Manuel Medina Torres
Decano de la Demarcación del Colegio de ICCP en Andalucía

D. Rafael López Guarga
Jefe de la Demarcación de Carreteras del Estado en Aragón
Presidente del Comité de Túneles de la Asociación Técnica de Carreteras
Secretario hispanohablante del Comité TC 4.4 de PIARC

D. Alberto Bardesi Orúe-Echevarría
Director General de la Asociación Técnica de carreteras

TECHNICAL COMMITTEE
COMITÉ TÉCNICO / COMITÉ TECHNIQUE

Presidente:

D. Rafael López Guarga
Director Técnico del Simposio
Presidente del Comité de Túneles de la Asociación Técnica de Carreteras
Secretario hispanohablante del Comité TC 4.4 de PIARC s

Vocales:

Mr. Ingo Kaundinya
Presidente del Comité Técnico TC 4.4 de PIARC

D. Ignacio del Rey Llorente
Miembro y expresidente del Comité Técnico TC 4.4 de PIARC

Mr. Jorgen Holst
Miembro del Comité Técnico TC 4.4 de PIARC

Mr. Bijan Khaleghi
Miembro del Comité Técnico TC 4.4 de PIARC

Mr. Fathi Tarada
Miembro del Comité Técnico TC 4.4 de PIARC

Mr. Arild Søvik
Miembro del Comité Técnico TC 4.4 de PIARC
Miembro de la Junta Directiva de ITA-Cosuf

D. Javier Borja López
Miembro del Comité Técnico TC 4.4 de PIARC

D. Rafael Sánchez Tostón
Secretario del Comité de túneles de la ATC

INDEX
ÍNDICE / INDEX

VOLUME 1

FIRST SESSION: "New challenges on tunnels for the 2030 target"

SECOND SESSION: "Operation and sustainable management of tunnels" (I)

Topic: "Resilience in tunnels"

Topic: "ITS systems and their contribution to improved operation"

THIRD SESSION: "Management of urban and high traffic road tunnels"

FOURTH SESSION: "New vehicle propulsion energies and their impact on road tunnels"

VOLUME 2

FIFTH SESSION: "Operation and sustainable management of tunnels" (II)

Topic: "Emergency management"

Topic: "Risk Analysis"

SIXTH SESSION: "Ventilation and Lighting"

Topic: "Ventilation"

Topic: "Lighting and energy efficiency"

SEVENTH SESSION: "Current situation of tunnels in relation to Standards"

Prologue 19

FIFTH SESSION: "Operation and sustainable management of tunnels" (II)

Topic: "Emergency management"

57. **LA GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN EN LOS ACCIDENTES EN TÚNELES**
INFORMATION MANAGEMENT IN TUNNEL ACCIDENTS
GESTION DE L'INFORMATION DANS LES ACCIDENTS DE TUNNEL
Emilio Leo Ferrando; Miguel Ángel Clavero Forcén; Cristina Salamero Rodríguez; María Ángeles Honrado Prieto; Óscar Senar Canalis 27

58. **PEDESTRIAN BEHAVIOR DURING REAL SCALE EVACUATION EXPERIMENTS IN ROAD TUNNEL**
COMPORTAMIENTO DE LOS PEATONES DURANTE EXPERIMENTOS DE EVACUACIÓN A ESCALA REAL EN UN TÚNEL DE CARRETERA
COMPORTEMENT DES PIÉTONS LORS D'EXPÉRIENCES D'ÉVACUATION EN GRANDEUR RÉELLE DANS UN TUNNEL ROUTIER
Natalia Schmidt-Polończykn 39

Papers:

59. **IMPROVED INCIDENT MANAGEMENT THROUGH A RESILIENT ORGANISATION**
MEJORA DE LA GESTIÓN DE INCIDENTES MEDIANTE UNA ORGANIZACIÓN RESILIENTE
AMELIORATION DE LA GESTION D'INCIDENTS GRACE A UNE ORGANISATION RESILIENTE
André Stein 51

60. **COORDINACIÓN DE ACTUACIONES SANITARIAS EN TÚNELES INTERNACIONALES DE GRAN LONGITUD. EL CASO DEL TÚNEL DE SOMPORT**
COORDINATION OF HEALTH ACTIONS IN LONG INTERNATIONAL TUNNELS. THE CASE OF THE SOMPORT TUNNEL
LA COORDINATION DES ACTIONS SANITAIRES DANS LES LONGS TUNNELS INTERNATIONAUX. L'AFFAIRE DU TUNNEL DU SOMPORT
Diego Lagunas Pardos; Noelia Soria Villanueva; Marta García Luengo; Miguel Ángel Clavero Forcén; Antoine Ruiz; Emilio Leo Ferrando 57

61. **ESTUDIO SOBRE LA EXPLOTACIÓN DE TÚNELES Y LA GESTIÓN DE RIESGOS. CASO PRÁCTICO DE TÚNELES LARGOS EUROPEOS**
STUDY FOR TUNNEL OPERATION AND RISK MANAGEMENT. CASE STUDY ON EUROPEAN LONG TUNNELS
ÉTUDE SUR L'EXPLOITATION DES TUNNELS ET LA GESTION DES RISQUES. ÉTUDE DE CAS DES LONGS TUNNELS EUROPÉENS
Oscar Borobia Cuesta; Juan Manuel Leaño; José Moreno Vasco 67

62. **VEHÍCULOS DE ENERGÍA ALTERNATIVA (VEA) A SU PASO POR EL TÚNEL DE SOMPORT**
ALTERNATIVE ENERGY VEHICLES (SEE) AS THEY PASS THROUGH THE SOMPORT TUNNEL
VÉHICULES À ÉNERGIE ALTERNATIVE (VOIR) LORS DE LEUR PASSAGE DANS LE TUNNEL DU SOMPORT
Nuria Romeo Girón; Antoine Ruiz; Óscar Aguarta Nasarre; Daniel Fernández Morlans; Emilio Leo Ferrando 91

63. **A STUDY OF TUNNEL VENTILATION CONTROL AND WATER SPRAY ACTIVATION IN CASE OF FIRE**
UN ESTUDIO SOBRE EL CONTROL DE LA VENTILACIÓN DEL TÚNEL Y LA ACTIVACIÓN DEL ROCIADO DE AGUA EN CASO DE INCENDIO
UNE ÉTUDE DU CONTRÔLE DE LA VENTILATION DES TUNNELS ET DE L'ACTIVATION DES JETS D'EAU EN CAS D'INCENDIE
Atsushi Ichikawa; Musashi Akaishi; Nobuyoshi Kawabata; Toshiaki Sakaguchi; Bernhard Kohl; Oliver Heger 103

64. **USING EXISTING RADAR INFRASTRUCTURE FOR TUNNEL SAFETY MANAGEMENT AND E MERGENCY RESPONSE**
UTILIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DE RADAR EXISTENTE PARA LA GESTIÓN DE LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES Y LA RESPUESTA A LAS EMERGENCIAS
UTILISATION DE L'INFRASTRUCTURE RADAR EXISTANTE POUR LA GESTION DE LA SÉCURITÉ DES TUNNELS ET LES INTERVENTIONS D'URGENCE
Sebastian Baucutt 119

65. **GESTIÓN DE EMERGENCIAS MEDIANTE PLANES DINÁMICOS**
EMERGENCY MANAGEMENT THROUGH DYNAMIC PLANS
GESTION DES URGENCES AVEC DES PLANS DYNAMIQUES
Miguel Angel Meléndez Fernandez; Oscar Morillas Pérez 129

Non read Papers:

66. **INCIDENTS/ACCIDENTS IN MOTORWAY TUNNELS IN SLOVENIA**
INCIDENTES/ACCIDENTES EN TÚNELES DE AUTOPISTAS EN ESLOVENIA
INCIDENTS/ACCIDENTS DANS LES TUNNELS AUTOROUTIERS EN SLOVÉNIE
Drago Dolenc; Ulrich Zorin 145

67. **INCENDIOS EN TÚNELES: FORMACIÓN DEL PERSONAL OPERATIVO**
TUNNEL FIRES: FIREFIGHTERS FULL SCALE TRAINING
INCENDIES DANS LES TUNNELS : FORMATION DU PERSONNEL
J. Andrés Viéitez Martín 161

68. **HERRAMIENTAS DE AYUDA AL EXPLOTADOR PARA LA TOMA DE DECISIONES EN CASO DE UN INCIDENTE MENOR EN EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS PELIGROSAS**
DECISION SUPPORT TOOLS FOR THE OPERATOR IN THE EVENT OF A MINOR INCIDENT IN THE TRANSPORT OF DANGEROUS GOODS
OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION POUR L'OPÉRATEUR EN CAS D'INCIDENT MINEUR DANS LE TRANSPORT DE MARCHANDISES DANGEREUSES
Emilio Leo Ferrando; Araceli Tena Mínguez; Berta Seco Nievas; María Calvo Aznar; Nuria Romeo Girón; Antoine Ruiz; José Juan González Sánchez; Óscar Aguarta Nasarre 169

69. **PLATAFORMA SERIOUS GAMES PARA LA GESTIÓN DE EMERGENCIAS Y LA FORMACIÓN AVANZADA DE OPERADORES DE TÚNELES CARRETEROS**
SERIOUS GAMES PLATFORM FOR EMERGENCY MANAGEMENT AND ADVANCED ROAD TUNNEL OPERATOR TRAINING
PLATE-FORME DE JEUX SÉRIEUX POUR LA GESTION DES SITUATIONS D'URGENCE ET LA FORMATION AVANCÉE DES OPÉRATEURS DE TUNNELS ROUTIERS
Fernando Morente; Ramón Ugartexte; David García-Sanchez 183

70. **THE NAN'AO TRAFFIC CONTROL CENTER: AN OPTIMAL SOLUTION FOR AN INTEGRATION OF TRAFFIC CONTROL AND EMERGENCY RESPONSE MANAGEMENT**
EL CENTRO DE CONTROL DE TRÁFICO DE NAN'AO: UNA SOLUCIÓN ÓPTIMA PARA LA INTEGRACIÓN DEL CONTROL DEL TRÁFICO Y LA GESTIÓN DE LA RESPUESTA DE EMERGENCIA
LE CENTRE DE CONTRÔLE DU TRAFIC DE NAN'AO : UNE SOLUTION OPTIMALE POUR L'INTÉGRATION DU CONTRÔLE DU TRAFIC ET DE LA GESTION DES INTERVENTIONS D'URGENCE
Yu-Kuang Lin 203

Topic: "Risk Analysis"

71. **PROPUESTA DE ACTUALIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGO EN TÚNELES DE LA RED DE CARRETERAS DEL ESTADO DE ESPAÑA (MARTE)**
PROPOSAL FOR UPDATING THE METHODOLOGY FOR RISK ANALYSIS IN TUNNELS OF THE SPANISH STATE ROAD NETWORK (MARTE)
PROPOSITION DE MISE À JOUR DE LA MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DES RISQUES DANS LES TUNNELS DU RÉSEAU ROUTIER DE L'ÉTAT ESPAGNOL (MARTE)
Guillermo Llopis Serrano 219

72. **DANGEROUS GOOD QUANTITATIVE RISK ASSESSMENT MODEL AND ITS UPDATING/UPGRADING PROJECT**
MODELO DE EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE RIESGOS Y SU PROYECTO DE ACTUALIZACIÓN/MEJORA
MODÈLE D'ÉVALUATION QUANTITATIVE DU RISQUE DES MARCHANDISES DANGEREUSES ET SON PROJET DE MISE À JOUR/MISE À NIVEAU
Christophe Willmann; Raphaël Defert; Behrnard Kohl; Nikolaos Vagiokas 241

Papers:

73. **ANÁLISIS DE RIESGO DE LOS TÚNELES URBANOS DE LA PLAZA DE LES GLÒRIES EN BARCELONA**
RISK ANALYSIS OF THE URBAN TUNNELS OF PLAÇA DE LES GLÒRIES IN BARCELONA
ANALYSE DES RISQUES DES TUNNELS URBAINS DE LA PLAÇA DE LES GLÒRIES À BARCELONE
Iván Perea Méndez 259

74. **EURAM 3.0: 15 YEARS OF RISK ANALYSIS APPLICATION IN ROAD TUNNELS**
EURAM 3.0: 15 AÑOS DE APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE RIESGOS EN TÚNELES DE CARRETERA
EURAM 3.0 : 15 ANS D'APPLICATION DE L'ANALYSE DES RISQUES DANS LES TUNNELS ROUTIERS
Alessandro Focaracci 279

75. **SMOKE CONTROL IN NATURALLY VENTILATED TUNNELS**
CONTROL DEL HUMO EN TÚNELES CON VENTILACIÓN NATURAL
CONTRÔLE DES FUMÉES DANS LES TUNNELS À VENTILATION NATURELLE
António Galhardo; João Carlos Viegas; Pedro Coelho; Elio Ortega; Ulisses Fernandes 297

76. **AARR CUANTITATIVOS: HERRAMIENTA EN FASE DE PROYECTO PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO DEL TÚNEL GARANTIZANDO LA SEGURIDAD**
QUANTITATIVE RISK ANALYSIS: TOOL TO OPTIMIZE THE DESIGN AND ENSURE TUNNEL SAFETY DURING THE PROJECT PHASE
ANALYSE QUANTITATIVE DES RISQUES: OUTIL POUR OPTIMISER LA CONCEPTION ET ASSURER LA SÉCURITÉ DU TUNNEL PENDANT LA PHASE DE PROJET
Ion Berganza; Cristina Medina 315

77. **TÚNELES DE LA AUTOPISTA BOGOTÁ A VILLAVICENCIO. MODELO DE INTEGRACIÓN A NIVEL MUNDIAL**
TUNNELS OF THE BOGOTÁ TO VILLAVICENCIO HIGHWAY. GLOBAL INTEGRATION MODEL
TUNNELS DE L'AUTOROUTE BOGOTÁ-VILLAVICENCIO. UN MODÈLE D'INTÉGRATION AU NIVEAU MONDIAL
Jairo Charry Gómez; Enrique Segura Echániz 331

78. **HERRAMIENTA DE ANÁLISIS COMBINADO DE EVACUACIÓN Y HUMOS PARA TÚNELES DE CARRETERA**
COMBINED SMOKE AND EXHAUST ANALYSIS TOOL FOR ROAD TUNNELS
OUTIL D'ANALYSE COMBINÉE DES FUMÉES ET DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT POUR LES TUNNELS ROUTIERS
Carlos Del Álamo Merino; Ignacio Del Rey Llorente 349

79. **AN ANALYSIS OF ROAD ACCIDENT MODELS BASED ON TUNNEL LENGTHS AND ACCIDENT VARIABLES**
UN ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE ACCIDENTES DE TRÁFICO BASADO EN LAS LONGITUDES DE LOS TÚNELES Y LAS VARIABLES DE LOS ACCIDENTES
UNE ANALYSE DES MODÈLES D'ACCIDENTS DE LA ROUTE BASÉS SUR LES LONGUEURS DE TUNNEL ET LES VARIABLES D'ACCIDENT
Antonella Pireddu; Silvia Bruzzone 371

80. **FRÉJUS TUNNEL RISK ASSESMENT: A SPECIFICALY DEVELOPPED ITALIAN METHOD COMBINED WITH THE FRENCH ONE**
EVALUACIÓN DEL RIESGO DEL TÚNEL DE FRÉJUS: UN MÉTODO ITALIANO ESPECÍFICAMENTE DESARROLLADO Y COMBINADO CON EL FRANCÉS
EVALUATION DES RISQUES DU TUNNEL DU FRÉJUS : UNE MÉTHODE ITALIENNE SPÉCIALEMENT DÉVELOPPÉE COMBINÉE À LA MÉTHODE FRANÇAISE
F. Luciani; R. Borchiellinib; C. Willmann; S. Sergi; JM Couvert; G. Ladre; P. Pons 389

81. **A RISK-BASED APPROACH FOR DESIGN, OPERATION, AND MAINTENANCE OF ROAD TUNNELS**
UN ENFOQUE BASADO EN EL RIESGO PARA EL DISEÑO, LA EXPLOTACIÓN Y EL MANTENIMIENTO DE LOS TÚNELES DE CARRETERA
UNE APPROCHE FONDÉE SUR LE RISQUE POUR LA CONCEPTION, L'EXPLOITATION ET L'ENTRETIEN DES TUNNELS ROUTIERS
Søren Randrup-Thomsen; Kristina Hoffmann 411

Non read Papers:

82. **SCOPING CROSS PASSAGE ESCAPE DOORS IN NEW TUNNEL WORKS**
ESTUDIO DE LAS PUERTAS DE EVACUACIÓN DE LOS PASILLOS TRANSVERSALES EN LAS OBRAS DEL NUEVO TÚNEL
ÉVALUATION DES PORTES D'ÉVACUATION DES PASSAGES TRANSVERSAUX DANS LES NOUVEAUX TRAVAUX DE TUNNELS
Basil Fuller 423

83. **IMPACTO DEL USO DE TELÉFONOS MÓVILES EN LA SEGURIDAD VIAL DEL TÚNEL DE ORIENTE**
IMPACT OF MOBILE PHONE USE ON ROAD SAFETY IN THE ORIENTE TUNNEL
IMPACT DE L'UTILISATION DU TÉLÉPHONE PORTABLE SUR LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE DANS LE TUNNEL D'ORIENTE
Ricardo Smith Quintero; Rafael Nanclares Ospina; Juan David Naranjo Sierra 431

84. **SÉCURITÉ DES TRAVAUX DE RÉPARATION DU TUNNEL EFFONDRÉ DE JEBEL EL OUAHCH-CONSTANTINE**
SEGURIDAD DE LAS OBRAS DE REPARACIÓN DEL TÚNEL COLAPSADO DE JEBEL EL OUAHCH-CONSTANTINE
SAFETY OF THE REPAIR WORKS OF THE COLLAPSED TUNNEL OF JEBEL EL OUAHCH-CONSTANTINE
Said Sitayeb; Nadjim Boumezoued; Mahmoud Arslane 451

SIXTH SESSION: "Ventilation and Lighting"

Topic: "Ventilation"

85. **SUSTAINABLE TUNNEL VENTILATION**
VENTILACIÓN DE TÚNEL SOSTENIBLE
VENTILATION DURABLE DES TUNNELS
Fathi Tarada 471

86. **SUSTAINABLE RISK BASED AND VENTILATION SOLUTIONS FOR ROAD TUNNELS SAFETY**
SOLUCIONES SOSTENIBLES DE VENTILACIÓN Y BASADAS EN EL RIESGO PARA LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES DE CARRETERA
SOLUTIONS DURABLES FONDÉES SUR LES RISQUES ET LA VENTILATION POUR LA SÉCURITÉ DES TUNNELS ROUTIERS
Salvatore Giua; Mara Lombardi; Davide Berardi; Luca Stantero 487

Papers:

87. **RENOVACIÓN VENTILADORES TÚNEL 2 GUADARRAMA DE AP-6 AÑO 2020**
RENOVATION OF FANS IN TUNNEL 2 GUADARRAMA OF AP-6 YEAR 2020
RÉNOVATION DES VENTILATEURS DU TUNNEL 2 GUADARRAMA DE L'AP-6 ANNÉE 2020
Gonzalo Grande Tomé 499

88. **MEDIDA DE NO2 EN TÚNELES. LA EXPERIENCIA EN LOS TÚNELES DE CALLE 30**
NO2 MEASUREMENT IN TUNNELS. THE EXPERIENCE IN THE CALLE 30 TUNNELS
NO2 MESURE DANS LES TUNNELS. L'EXPÉRIENCE DANS LES TUNNELS DE LA CALLE 30
María del Carmen Bonilla González 513

89. **COMMISSIONING TESTS IN HEAVILY TRAFFICKED CITY TUNNELS UNDER OPERATION**
PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA EN TÚNELES URBANOS CON MUCHO TRÁFICO EN FUNCIONAMIENTO
ESSAIS DE MISE EN SERVICE DANS DES TUNNELS URBAINS À FORT TRAFIC EN COURS D'EXPLOITATION
Johannes Rodler; Peter Sturm; Gregor Schmoelzer; Patrik Foessleitner; Michael Bacher; Daniel Fruhwirt 525

90. **APLICACIONES DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN TUNELES. CASO PRACTICO DE VENTILACIÓN**
APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN TUNNELS. VENTILATION CASE STUDY
APPLICATIONS DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS LES TUNNELS. ÉTUDE DE CAS SUR LA VENTILATION
Ernesto Sánchez Larios; Guillem Peris Sayol 535

Topic: "Lighting and energy efficiency"

91. **REGULACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DE TÚNELES DE CARRETERA. ESTRATEGIAS PARA OPTIMIZAR SU RENDIMIENTO**
REGULATION OF ROAD TUNNEL LIGHTING SYSTEMS. STRATEGIES TO OPTIMISE THEIR PERFORMANCE
RÉGLEMENTATION DES SYSTÈMES D'ÉCLAIRAGE DES TUNNELS ROUTIERS. STRATÉGIES POUR OPTIMISER LEURS PERFORMANCES
Javier Borja López; José Ignacio Abad Martínez; Enrique Vaquero García; Daniel Monserrat Bera 555

92. **DÉVELOPPEMENT D'ÉCLAIRAGES LEDS ÉCONOMES EN ÉNERGIE, CONFORTABLES ET SÛRS POUR L'USAGER**
DESARROLLO DE UNA ILUMINACIÓN LED ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE, CÓMODA Y SEGURA PARA LOS USUARIOS
DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT, COMFORTABLE AND SAFE LED LIGHTING FOR USERS
Dorian Talón; Severine Besson 577

93. **PLAN PARA LA IMPLANTACIÓN DE SISTEMAS INTELIGENTES DE GESTIÓN DE LA ILUMINACIÓN EN TÚNELES DE CARRETERAS DEL ESTADO**

PLAN FOR THE IMPLEMENTATION OF INTELLIGENT LIGHTING MANAGEMENT SYSTEMS IN STATE ROAD TUNNELS

PLAN POUR LA MISE EN ŒUVRE DE SYSTÈMES DE GESTION INTELLIGENTE DE L'ÉCLAIRAGE DANS LES TUNNELS DES ROUTES NATIONALES

Luis Azcue Rodríguez 603

Papers:

94. **SISTEMAS DE EVALUACIÓN DINÁMICA DE LUMINANCIA E ILUMINANCIA EN TÚNELES. CASO PRÁCTICO: TÚNEL DE L'OLLERIA DE LA AUTOVÍA A-7**

DYNAMIC ASSESSMENT SYSTEM FOR THE LUMINANCE AND ILLUMINANCE IN TUNNELS. PRACTICAL CASE: L'OLLERIA IN THE A-7 MOTORWAY

SYSTÈME D'ÉVALUATION DYNAMIQUE DE LUMINANCE ET D'ÉCLAIREMENT DANS LES TUNNELS. CAS PRATIQUE: TUNNEL DE L'OLLERIA DE L'AUTOROUTE A-7

Alberto Senén Perales García ; Guillermo Llopis Serrano 613

95. **ILUMINACIÓN LED ADAPTATIVA EN UN TÚNEL URBANO. FUNCIONAMIENTO Y PRIMERAS CONCLUSIONES DE EXPLOTACIÓN. TÚNEL DE LA VILA OLÍMPICA**

ADAPTIVE LED LIGHTING IN AN URBAN TUNNEL. OPERATION AND FIRST OPERATIONAL CONCLUSIONS. VILA OLÍMPICA TUNNEL

ÉCLAIRAGE LED ADAPTATIF DANS UN TUNNEL URBAIN. FONCTIONNEMENT ET PREMIÈRES CONCLUSIONS OPÉRATIONNELLES. TUNNEL DE VILA OLÍMPICA

Roberto Martinez Garcia; Francisco Javier Traveria Molero 629

96. **HIDRÁULICA DE BOMBEO NO-CONVENCIONAL EN CIRCUITO CERRADO COMO SISTEMA SOSTENIBLE DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA EN TÚNELES DE MONTAÑA**

UNCONVENTIONAL CLOSED-LOOP PUMPED HYDROPOWER AS A SUSTAINABLE ENERGY STORAGE SYSTEM IN MOUNTAIN TUNNELS

HYDRAULIQUE DE LA POMPE LA BOUCLE FERMÉE NON CONVENTIONNELLE COMME SYSTÈME DE STOCKAGE D'ÉNERGIE DURABLE DANS LES TUNNELS DE MONTAGNE

Justo Suarez 641

97. **SACYR IOHNIC, UNA SOLUCIÓN INNOVADORA PARA LA ILUMINACIÓN DE TÚNELES QUE MEJORA LA SEGURIDAD Y REDUCE EL CONSUMO DE ENERGÍA**

SACYR IOHNIC, AN INNOVATIVE TUNNEL LIGHTING SOLUTION TO IMPROVE SAFETY AND REDUCE ENERGY CONSUMPTION

SACYR IOHNIC, UNE SOLUTION INNOVANTE D'ÉCLAIRAGE DES TUNNELS POUR AMÉLIORER LA SÉCURITÉ ET RÉDUIRE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Rubén Jover Sevilla 653

98. **TOWARDS MORE SUSTAINABLE ROAD TUNNELS IN AUSTRALIA AND NEW ZEALAND: RECOMMENDATIONS FOR PRACTITIONERS**

HACIA TÚNELES DE CARRETERA MÁS SOSTENIBLES EN AUSTRALIA Y NUEVA ZELANDA: RECOMENDACIONES PARA LOS PROFESIONALES

VERS DES TUNNELS ROUTIERS PLUS DURABLES EN AUSTRALIE ET EN NOUVELLE-ZÉLANDE : RECOMMANDATIONS POUR LES PRATICIENS

Georgia O'Connor; Les Louis; Tony Peglas; Dr Simon Xue; Dr Richard Yeo; Michael Tziotis; Nigel Lloyd 665

99. **PROYECTO DE IMPLANTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL TÚNEL DE CARROVIDE (NAVARRA)**
PROJECT FOR THE IMPLEMENTATION OF RENEWABLE ENERGIES AND ENERGY EFFICIENCY IN THE CARROVIDE TUNNEL (NAVARRA)
PROJET POUR LA MISE EN ŒUVRE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LE TUNNEL DE CARROVIDE (NAVARRE)
Iulen Iturrizaga López; Iñigo Echegaray Ezcurra; Joseba Arregui Amilibia; Javier Amezaga Ruiz 685

100. **IMPACTO DE LAS CONCENTRACIONES DE NOX EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE VENTILACIÓN**
IMPACT OF NOX CONCENTRATIONS ON THE DESIGN OF VENTILATION SYSTEMS
IMPACT DES CONCENTRATIONS DE NOX SUR LA CONCEPTION DES SYSTÈMES DE VENTILATION
Isaac Guijarro Meléndez 709

101. **PRUEBAS DE EFICIENCIA PARA LA VENTILACIÓN E ILUMINACIÓN EN TÚNELES DE CARRETERAS**
EFFICIENCY TESTS FOR VENTILATION AND LIGHTING IN ROAD TUNNELS
TESTS D'EFFICACITÉ DE LA VENTILATION ET DE L'ÉCLAIRAGE DANS LES TUNNELS ROUTIERS
David Zamora Martínez 727

Non read Papers:

102. **CENTRAL-WAN CHAI BYPASS TUNNEL AIR PURIFICATION SYSTEM, HONG KONG. EXPERIENCE AFTER THREE YEARS OF OPERATION**
SISTEMA DE PURIFICACIÓN DEL AIRE DEL TÚNEL DE CIRCUNVALACIÓN CENTRAL-WAN CHAI, HONG KONG. EXPERIENCIA TRAS TRES AÑOS DE FUNCIONAMIENTO
SYSTÈME DE PURIFICATION DE L'AIR DU TUNNEL DE CONTOURNEMENT DE CENTRAL-WAN CHAI, HONG KONG. EXPÉRIENCE APRÈS TROIS ANS D'EXPLOITATION
Elke Deux; Izaskun Martos; Anika Schnelle 739

103. **METHODOLOGY OF SELECTING A ROAD TUNNEL VENTILATION SYSTEM IN POLISH CONDITIONS USING VENTSIM SOFTWARE**
METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE VENTILACIÓN DE TÚNEL DE CARRETERA EN CONDICIONES POLACAS UTILIZANDO EL SOFTWARE VENTSIM
MÉTHODOLOGIE DE SÉLECTION D'UN SYSTÈME DE VENTILATION DE TUNNEL ROUTIER DANS LES CONDITIONS POLONAISES À L'AIDE DU LOGICIEL VENTSIM
Zwolińska Klaudia; Szmuk Andrzej; Borowski Marek 749

104. **ALGORITHMS AND CONTROL LOGICS FOR TUNNEL VENTILATION SYSTEMS**
ALGORITMOS Y LÓGICA DE CONTROL PARA SISTEMAS DE VENTILACIÓN DE TÚNELES
ALGORITHMES ET LOGIQUES DE COMMANDE POUR LES SYSTÈMES DE VENTILATION DES TUNNELS
Nicolò Faggioni; Francesca Giauni; Fabio Santucci; Alice Bisirri 765

105. **PERFORMANCE VERIFICATION OF FIRE DETECTION AND COMPOUND POINT SMOKE EXTRACTION SYSTEM IN GUANYIN TUNNEL OF SUHUA HIGHWAY, TAIWAN**
VÉRIFICATION DES PERFORMANCES DU SYSTÈME DE DÉTECTION D'INCENDIE ET D'EXTRACTION DE FUMÉE À POINTS COMPOSÉS DANS LE TUNNEL GUANYIN DE L'AUTOROUTE SUHUA, TAIWAN
VÉRIFICATION DES PERFORMANCES DU SYSTÈME DE DÉTECTION D'INCENDIE ET D'EXTRACTION DE FUMÉE À POINTS COMPOSÉS DANS LE TUNNEL GUANYIN DE L'AUTOROUTE SUHUA, TAIWAN
Chi-Ji Lin; Li-Yu Tseng a, Po-Feng Lin; Chung-Hwei Su; Tsan-Hui Lin 783

106. **METHOD FOR CONTROLLING DETERIORATION OF VISUAL ENVIRONMENT IN ROAD TUNNELS DUE TO FOG**

UN MÉTODO DE CONTROL PARA SUPRIMIR EL DETERIORO DEL ENTORNO VISUAL CAUSADO POR LA NIEBLA EN LOS TÚNELES DE CARRETERA

UNE MÉTHODE DE CONTRÔLE POUR SUPPRIMER LA DÉTÉRIORATION DE L'ENVIRONNEMENT VISUEL CAUSÉE PAR LE BROUILLARD DANS LES TUNNELS ROUTIERS

Yoshiki Akaza 797

107. **LONGITUDINAL VENTILATION SYSTEM FOR A LONG ROAD TUNNEL: OPTIMAL DESIGN WITH BATTERIES OF JET FANS AND CHALLENGES TO OVERCOME EXTREME FOGGY WEATHER CONDITION**

SISTEMA DE VENTILACIÓN LONGITUDINAL PARA UN TÚNEL DE CARRETERA LARGO: DISEÑO ÓPTIMO CON BATERÍAS DE VENTILADORES DE CHORRO Y RETOS PARA SUPERAR LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS EXTREMAS DE NIEBLA

SYSTÈME DE VENTILATION LONGITUDINALE POUR UN LONG TUNNEL ROUTIER : CONCEPTION OPTIMALE AVEC DES BATTERIES DE VENTILATEURS À JET ET DÉFIS POUR SURMONTER DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMEMENT BRUMEUSES

Sunit Kanti Dhar 805

108. **DESIGN AND APPLICATIONS OF ROAD TUNNELS VENTILATION ALGORITHMS**

DISEÑO Y APLICACIONES DE ALGORITMOS DE VENTILACIÓN DE TÚNELES DE CARRETERA

CONCEPTION ET APPLICATIONS DES ALGORITHMES DE VENTILATION DES TUNNELS ROUTIERS

Alessandro Focaracci 829

109. **DISCUSSION ON THE SMOKE PREVENTION STRATEGY OF HIGH-ALTITUDE TUNNEL AND THE EVACUATION CHANNEL SPACING**

DEBATE SOBRE LA ESTRATEGIA DE PREVENCIÓN DE HUMOS DEL TÚNEL DE GRAN ALTURA Y LA S EPARACIÓN DE LOS CANALES DE EVACUACIÓN

DISCUSSION SUR LA STRATÉGIE DE PRÉVENTION DES FUMÉES DANS LES TUNNELS DE HAUTE ALTITUDE ET SUR L'ESPACEMENT DES CANAUX D'ÉVACUATION

Zhang Aoyu;; Yang Ge; Zhou Yu; ,Zhang Cancheng; Deng Min 839

SEVENTH SESSION: "Current situation of tunnels in relation to Standards"

110. **DISEÑO DE LOS CUARTOS TÉCNICOS DE LOS TÚNELES URBANOS**

DESIGN OF TECHNICAL ROOMS FOR URBAN TUNNELS

CONCEPTION DE LOCAUX TECHNIQUES POUR LES TUNNELS URBAINS

Eva Mª Montero Yéboles 857

111. **ADAPTACIÓN DE LOS TÚNELES DE BELATE Y ALMANDOZ LA DIRECTIVA EUROPEA 2004/54**

ADAPTATION OF THE BELATE AND ALMANDOZ TUNNELS. THE EUROPEAN DIRECTIVE 2004/54

ADAPTATION DES TUNNELS DE BELATE ET D'ALMANDOZ. LA DIRECTIVE EUROPÉENNE 2004/54

Benjamín Celada Tamames; Ignacio Sainz de los Terreros Goñi 877

112. **THE UPGRADE OF THE HUGUENOT TUNNEL NORTH BORE AND THE TEMPORARY REPAIRS OF THE SOUTH BORE TUNNEL TO INCREASE RESILIENCE AND SAFETY**

MEJORA DEL TUBO NORTE DEL TÚNEL HUGONOTE (SUDÁFRICA) Y REPARACIONES TEMPORALES EN EL TUBO SUR PARA AUMENTAR SU RESILIENCIA Y SEGURIDAD

AMELIORATION DU TUBE NORD DU TUNNEL HUGUENOT (AFRIQUE DU SUD) ET RÉPARATIONS TEMPORAIRES SUR LE TUBE SUD POUR EN AUGMENTER LA RÉSILIENCE ET LA SÉCURITÉ

Tiago Massingue; Kate Hunt 893

Papers:

113. **EQUIPO DE SEGURIDAD: CONSIDERACIÓN CONJUNTA EN UN TÚNEL: "FASE PRELIMINAR-EL DISEÑO-LA CONSTRUCCIÓN-LA EXPLOTACIÓN"**

GLOBAL CONSIDERATION IN A TUNNEL: SAFETY TEAM: "PRELIMINARY PHASE-THE DESIGN-THE CONSTRUCTION-THE EXPLOITATION"

ÉQUIPEMENTS DE SÉCURITÉ : RÉFLEXION COMMUNE DANS UN TUNNEL : " PHASE PRÉLIMINAIRE - CONCEPTION - CONSTRUCTION - EXPLOITATION "

Manuel Alberto Abella Suárez; Ignacio García-Arango; Fernando Hacar 913

114. **13 AÑOS DE INFRUCTUOSO ESFUERZO POR MEJORAR LA SEGURIDAD EN TUNELES DE ELAVADA PELIGROSIDAD**

13 YEARS OF UNSUCCESSFUL EFFORTS TO IMPROVE SAFETY IN HIGH-RISK TUNNELS

13 ANS D'EFFORTS INFRUCTUEUX POUR AMÉLIORER LA SÉCURITÉ DANS TUNNELS DE HAUTE RISQUE

Mikel Uriarte Toledo 927

115. **ADECUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE TÚNELES EN COLOMBIA A LA NORMATIVA EUROPEA. EJEMPLOS DE LAS CONCESIONES PACÍFICO 1, PACÍFICO 2 Y PACÍFICO 3.**

ADAPTATION OF TUNNEL CONTROL SYSTEMS IN COLOMBIA TO EUROPEAN REGULATIONS. EXAMPLES OF THE PACIFIC 1, PACIFIC 2 AND PACIFIC 3 CONCESSIONS.

ADAPTATION DES SYSTÈMES DE CONTRÔLE DES TUNNELS EN COLOMBIE À LA RÉGLEMENTATION EUROPÉENNE. EXEMPLES DE CONCESSIONS PACIFIC 1, PACIFIC 2 ET PACIFIC 3.

Antonio O. Martín Crisenti; Carlos Ernesto Diaz Acevedo 947

116. **INCIDENTES Y ACCIDENTES SIGNIFICATIVOS EN TÚNELES DE CARRETERA. EL CASO DEL TÚNEL DE SOMPORT**

SIGNIFICANT INCIDENTS AND ACCIDENTS IN ROAD TUNNELS. THE CASE OF THE SOMPORT TUNNEL

LES INCIDENTS ET ACCIDENTS SIGNIFICATIFS DANS LES TUNNELS ROUTIERS. L'AFFAIRE DU TUNNEL DU SOMPORT

Íñigo Pérez Martínez; Carmen María Martínez Cebollada; Rafael López Guarga 963

117. **OPTIMIZATION OF ROAD TUNNEL FACILITY COMPOSITIONS TO MINIMIZE OPERATING COSTS BASED ON ONTOLOGICAL MODEL**

OPTIMIZACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE LAS INSTALACIONES DE TÚNELES DE CARRETERA PARA MINIMIZAR LOS COSTOS OPERATIVOS SEGÚN EL MODELO ONTOLÓGICO

OPTIMISATION DES COMPOSITIONS DES INSTALLATIONS DES TUNNELS ROUTIERS POUR MINIMISER LES COÛTS D'EXPLOITATION SUR LA BASE D'UN MODÈLE ONTOLOGIQUE

Vladimír Faltus; Pavel Přibyl; Tomáš Tichý 981

Non read Papers:

118. **UTILIZACIÓN DE HERRAMIENTAS BIM EN LA REDACCIÓN DE PROYECTOS DE REMODELACIÓN DE TÚNELES CARRETEROS ABIERTOS AL TRÁFICO**
USING BIM TOOLS IN THE DRAFTING OF REMODELLING PROJECTS OF ROAD TUNNELS OPEN TO TRAFFIC
UTILISATION D'OUTILS BIM DANS LA RÉDACTION DE PROJETS DE RÉAMÉNAGEMENT DE TUNNELS ROUTIERS OUVERTS AU TRAFIC
Iñigo Herraez Puente; Jon Zuazua Gerrikagoitia; Iñigo Paniego de la Cuesta 997

119. **GESTIÓN DE LA SEGURIDAD EN LA REHABILITACIÓN DE LOS TÚNELES**
SAFETY MANAGEMENT IN THE REHABILITATION OF TUNNELS
GESTION DE LA SÉCURITÉ DANS LA RÉHABILITATION DES TUNNELS
Milagritos Ramírez Vilchez 1009

PROLOGUE
PRÓLOGO / PRÉAMBULE

Following the success of the 1st PIARC International Conference on Tunnels held in Lyon, France, in October 2018, PIARC and the Spanish National Committee (ATC) will jointly organize the 2nd International Conference on Tunnels and the VIII National Symposium on Tunnels in October 2022 in Granada, Spain. This joint event will bring together the knowledge and exchange of international experiences of PIARC in this matter together with the traditional Spanish symposium organized by the ATC every four years. We hope to bring together nearly 1,000 road tunnel professionals from the world to generate a global discussion on the topic.

PIARC is an apolitical and non-profit association, one of whose main objectives is the transmission of knowledge and the exchange of experiences on roads. Its Work Programs are organized in four-year cycles marked by the World Road Congresses. The framework for the development of these objectives is the Technical Committees, being that of Road Tunnels, previously called Tunnel Operation, one of the most active. Since 1995 he has published 48 documents in addition to an online Manual and numerous articles in the Routes / Roads magazine. For this reason, in October 2018 the initiative was taken to organize an international Conference on Tunnels that was held in Lyon and which was a great success of participation. This has encouraged the convening of a 2nd Conference, this time in Spain, which will mean its consolidation.

Faced with the new challenges of climate change, a sustainable economy and within the framework of Covid 19, it makes sense to speak of resilient infrastructures, a concept also applicable to tunnels. In this way, tunnels must present high availability rates with an acceptable level of safety even under circumstances that involve significant alterations to normal operation, establishing measures to reduce impacts. This will also imply the redefinition of the design and management standards and integrate the concept of resilience into the life cycle. 4

On the other hand, the road transport sector is experiencing a technological revolution with the challenges of digital transformation. Phenomena such as the autonomous vehicle, shared vehicles, digital mobility platforms, electrification, and the new energies for propulsion of vehicles are realities on which we must already work due to their direct relationship in the way of management and operation of tunnels. The ITS systems and their continuous development also have a lot to say about all these issues. Other important issues are the management of large urban tunnels, as well as, in general, the ventilation and lighting of the tunnels and their constant progress.

The celebration of this 2nd international conference, coinciding with the VIII National Symposium of Tunnels of Spain, will allow to expose the state of the art of all these novel topics and be a forum for feedback and exchange of ideas that will allow to continue investigating modelling the tunnels facing the challenges that in a few years will be present and will be normal in our infrastructures.

Rafael López Guarga

Chairman of the Tunnel Technical Committee of the Technical Road Association Technical Director of Symposium

Tras el éxito de la 1ª Conferencia Internacional de PIARC sobre Túneles celebrada en Lyon, Francia, en octubre de 2018, PIARC y el Comité Nacional Español (ATC) van a organizar conjuntamente la 2ª Conferencia Internacional sobre Túneles y el VIII Simposio Nacional de Túneles en octubre de 2022 en Granada, España. Este evento conjunto reunirá el conocimiento e intercambio de experiencias internacionales de PIARC en esta materia junto a la ya tradicional y amplia cita nacional que organiza la ATC cada cuatro años, con la expectativa de reunir a cerca de 1.000 profesionales de los túneles de carretera de todo el mundo para generar un debate global sobre los mismos.

PIARC es una asociación apolítica y sin ánimo de lucro, uno de cuyos objetivos principales es la transmisión del conocimiento y el intercambio de experiencias en materia de carreteras. Sus Programas de Trabajo se organizan por ciclos de cuatro años marcados por los Congresos Mundiales de Carreteras. El marco de trabajo para el desarrollo de los objetivos son los Comités Técnicos, siendo el de Túneles de carretera, anteriormente denominado de Explotación de Túneles, uno de los más activos. Desde 1995 ha publicado 48 documentos además de un Manual online y numerosos artículos en la revista Routes/Roads. Por este motivo, en octubre de 2018 se tomó la iniciativa de organizar una Conferencia internacional sobre Túneles que se celebró en Lyon y que fue un gran éxito de convocatoria. Ello ha animado a convocar una 2ª Conferencia, esta vez en España, que supondrá su consolidación.

Ante los nuevos retos del cambio climático, de una economía sostenible y en el marco del Covid 19 tiene sentido hablar de infraestructuras resilientes, concepto también aplicable a los túneles. De esta forma, los túneles deben de presentar elevadas tasas de disponibilidad con un nivel de seguridad aceptable incluso bajo circunstancias que supongan importantes alteraciones del funcionamiento normal, estableciéndose medidas para reducir los impactos. Ello, además, implicará la redefinición de las normas de diseño y gestión e integrar el concepto de resiliencia en el ciclo de vida.

Por otra parte, el sector del transporte por carretera está viviendo una revolución tecnológica con los desafíos de la transformación digital. Fenómenos como el vehículo autónomo, los vehículos compartidos, las plataformas digitales de movilidad, la electrificación y las nuevas energías de propulsión de los vehículos son realidades sobre las que ya debemos trabajar por su directa relación en el modo de gestión y de explotación de los túneles. Sobre todos estos temas también tienen mucho que decir los sistemas ITS y su continuo desarrollo. Otros asuntos importantes son la gestión de los grandes túneles urbanos, así como, en general, la ventilación e iluminación de los túneles y sus constantes avances.

Pues bien, la celebración de esta 2ª Conferencia internacional, coincidente con el VIII Simposio Nacional de Túneles de España, permitirá exponer el estado del arte de todos estos temas tan novedosos y ser un foro de retroalimentación y de intercambio de ideas que permitirá seguir investigando y modelando los túneles frente a los retos que en pocos años estarán presentes y serán normales en nuestras infraestructuras.

Rafael López Guarga

Presidente del Comité Técnico de Túneles
Asociación Técnica de Carreteras.
Director Técnico del Simposio

Suite au succès de la 1ère Conférence internationale sur les tunnels de PIARC tenue à Lyon, en France, en octobre 2018, PIARC et le Comité national espagnol (ATC) organiseront conjointement la 2ème Conférence internationale sur les tunnels et le VIII Symposium national sur les tunnels en octobre 2022 en Grenade, Espagne. Cet événement conjoint rassemblera les connaissances et l'échange d'expériences internationales de PIARC dans ce domaine ainsi que le traditionnel symposium espagnol organisé par l'ATC tous les quatre ans. Nous espérons rassembler près de 1 000 professionnels des tunnels routiers du monde entier pour susciter une discussion globale à leur sujet.

PIARC est une association apolitique et à but non lucratif, dont l'un des principaux objectifs est la transmission des connaissances et l'échange d'expériences sur les routes. Ses programmes de travail sont organisés en cycles de quatre ans marqués par les congrès mondiaux de la route. Le cadre pour le développement des objectifs est celui des comités techniques, étant celui des tunnels routiers, anciennement appelé Exploitation des tunnels, l'un des plus actifs. Depuis 1995, il a publié 48 documents en plus d'un manuel en ligne et de nombreux articles dans le magazine Routes / Roads. Pour cette raison, en octobre 2018, l'initiative a été prise d'organiser une Conférence internationale sur les tunnels qui s'est tenue à Lyon et qui a été un grand succès de participation. Cela a encouragé la convocation d'une 2ème Conférence, cette fois en Espagne, ce qui signifiera sa consolidation.

Face aux nouveaux enjeux du changement climatique, d'une économie durable et dans le cadre de Covid 19, il est logique de parler d'infrastructures résilientes, concept également applicable aux tunnels. De cette manière, les tunnels doivent présenter des taux de disponibilité élevés avec un niveau de sécurité acceptable, même dans des circonstances qui impliquent des modifications importantes de l'exploitation normale, établissant des mesures pour réduire les impacts. Cela impliquera également la redéfinition des normes de conception et de gestion et d'intégrer le concept de résilience dans le cycle de vie. 4

En revanche, le secteur du transport routier connaît une révolution technologique avec les enjeux de la transformation numérique. Des phénomènes tels que le véhicule autonome, les véhicules partagés, les plateformes de mobilité numérique, l'électrification et les nouvelles énergies de propulsion des véhicules sont des réalités sur lesquelles il faut déjà travailler du fait de leur relation directe dans la gestion et l'exploitation des tunnels. Les systèmes ITS et leur développement continu ont également beaucoup à dire sur toutes ces questions. D'autres enjeux importants sont la gestion des grands tunnels urbains, ainsi que, en général, la ventilation et l'éclairage des tunnels et leur évolution constante.

La célébration de cette 2ème Conférence internationale, coïncidant avec le VIII Symposium National des Tunnels d'Espagne, permettra d'exposer l'état de l'art de tous ces sujets nouveaux et d'être un forum de retour d'expérience et d'échange d'idées qui permettra de continuer enquêter et modéliser les tunnels face aux défis qui dans quelques années seront présents et normaux dans nos infrastructures.

Rafael López Guarga
Président du Comité Technique des Tunnels de l'Association Technique des routes
Directeur technique du Symposium

PIARC
2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROAD TUNNEL OPERATIONS AND SAFETY
&
VIII SPANISH TUNNELS SYMPOSIUM

FIFTH SESSION:

Operation and sustainable management of tunnels (II)

Topic: "Emergency management"

LA GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN EN LOS ACCIDENTES EN TÚNELES

Emilio Leo Ferrando[1]
Miguel Ángel Clavero Forcén[2]
Cristina Salamero Rodríguez[2]
María Ángeles Honrado Prieto[2]
Óscar Senar Canalis[1]

[1] *Subdelegación del Gobierno en Huesca*
[2] *Servicio de Seguridad y Protección Civil Gobierno de Aragón*

La comunicación es un elemento esencial en la gestión operativa de una emergencia, especialmente en casos de catástrofes o emergencias extraordinarias o colectivas, como puede ser un gran accidente en un túnel de carretera. En estas situaciones, la información puede ayudar a salvar vidas, a orientar a los ciudadanos en la búsqueda de las ayudas o a mitigar o minimizar los efectos de la catástrofe. Por ello, diversas leyes y planes de Protección Civil, tanto estatales como autonómicos y locales, se hacen eco del importante papel de la información y de los medios de comunicación en las situaciones de emergencia.

Concretamente, el Plan de Socorro Binacional del túnel de Somport recoge que cuando se ponga en marcha se creará un gabinete conjunto de prensa formado por los responsables de comunicación de la Prefectura de los Pirineos Atlánticos (Francia) y de la Subdelegación del Gobierno en Huesca y Centro de Emergencias 112 SOS Aragón (España). Este gabinete consensuará todas las informaciones que se emitan a través de las redes sociales de dichas instituciones y de las notas de prensa oficiales con objeto de garantizar la veracidad, la rapidez y evitar las contradicciones que trabajando de forma descoordinada se podrían producir. Todo esto supone un reto puesto que las informaciones iniciales tras un accidente suelen ser parciales y confusas. A la vez, la necesaria verificación de los datos que se han de proporcionar supone un desafío para conseguir una gestión rápida.

Para trabajar la armonización de las comunicaciones en caso de emergencia en el túnel de Somport se celebran habitualmente reuniones y simulacros del grupo sectorial encargado de la gestión de la información.

INFORMATION MANAGEMENT IN TUNNEL ACCIDENTS

Communication is an essential element in the operational management of an emergency, especially in cases of disasters or extraordinary or collective emergencies, such as a major accident in a road tunnel. In these situations, information can help to save lives, to guide citizens in the search for help or to mitigate or minimise the effects of the disaster. For this reason, various laws and Civil Protection plans, both at state, regional and local level, echo the important role of information and the media in emergency situations.

Specifically, the Somport Tunnel Binational Rescue Plan states that when it is put into operation, a joint press office will be created, made up of the heads of communication of the Prefecture of the Atlantic Pyrenees (France) and of the Government Subdelegation in Huesca and the 112 SOS Aragón Emergency Centre (Spain). This office will agree on all the information issued through the social networks of these institutions and the official press releases in order to guarantee veracity, speed and avoid contradictions that could be produced by working in an uncoordinated manner. This is a challenge, as the initial information following an accident is often partial and confusing. At the same time, the necessary verification of the data to be provided is a challenge for rapid management.

In order to work on the harmonisation of communications in the event of an emergency in the Somport tunnel, meetings and simulations of the sectoral group in charge of information management are held on a regular basis.

GESTION DE L'INFORMATION DANS LES ACCIDENTS DE TUNNEL

La communication est un élément essentiel de la gestion opérationnelle d'une situation d'urgence, notamment en cas de catastrophe ou d'urgence extraordinaire ou collective, comme un accident majeur dans un tunnel routier. Dans ces situations, les informations peuvent aider à sauver des vies, guider les citoyens dans la recherche d'aide ou atténuer ou minimiser les effets de la catastrophe. Pour cette raison, diverses lois et plans de protection civile, tant d'état que régionaux et locaux, font écho au rôle important de l'information et des médias dans les situations d'urgence.

Concrètement, le Plan binational de secours du tunnel du Somport prévoit qu'à sa mise en service, un bureau de presse commun sera créé composé des responsables de la communication de la Préfecture des Pyrénées-Atlantiques (France) et de la Sous-délégation du Gouvernement à Huesca et Centre d'urgence 112 SOS Aragón (Espagne). Ce cabinet s'accordera sur toutes les informations diffusées via les réseaux sociaux desdites institutions et les communiqués de presse officiels afin de garantir la véracité, la rapidité et d'éviter les contradictions qui pourraient survenir en travaillant de manière non coordonnée. Tout cela est un défi car les informations initiales après un accident sont généralement partielles et confuses. Dans le même temps, la nécessaire vérification des données à fournir pose un défi pour une gestion rapide.

Pour travailler à l'harmonisation des communications en cas d'urgence dans le tunnel du Somport, des réunions et exercices du groupe sectoriel en charge de la gestion de l'information sont régulièrement organisés.

1. INTRODUCCIÓN. LA IMPORTANCIA DE LA COMUNICACIÓN EN LA GESTIÓN DE EMERGENCIAS

La comunicación es un elemento esencial en la gestión operativa de una emergencia, especialmente en casos de catástrofes o emergencias extraordinarias o colectivas, como puede ser un gran accidente en un túnel de carretera. En estas situaciones, la información puede ayudar a salvar vidas, a orientar a los ciudadanos en la búsqueda de las ayudas o a mitigar o minimizar los efectos de la catástrofe.

De hecho, diversos expertos afirman que "la comunicación es una de las herramientas fundamentales de la gestión de emergencias" (Simon, Goldberg y Adini, 2015: 609) y que "la gestión eficaz de la catástrofe está indisolublemente unida a la comunicación de la misma. Sin una información adecuada es imposible proteger eficazmente a los ciudadanos" (Serrano, 2013: 29).

No en vano, numerosas leyes y planes de Protección Civil, tanto estatales como autonómicos y locales, recogen artículos dedicados expresamente a la estrecha relación entre la protección civil y la comunicación. Por supuesto, bajo el paraguas de la Constitución Española (BOE, 1978), que defiende claramente el derecho a la información (art. 20) y el derecho al honor, a la intimidad personal y familiar y a la propia imagen (art. 18).

El primer marco normativo de actuación para la Protección Civil en España fue la Ley 2/1985, de 21 de enero (BOE, 1985), actualmente derogada. Ya en la propia exposición de motivos, la Ley de Protección Civil hace referencia a las necesarias medidas de autoprotección de la población. "En los supuestos de emergencia que requieran la actuación de la protección civil, una parte muy importante de la población depende, al menos inicialmente, de sus propias fuerzas. De ahí que, como primera fórmula de actuación, haya que establecer un complejo sistema de acciones preventivas e informativas", dice textualmente.

Esta ley fue actualizada en 2015, por la Ley 17/2015, del Sistema Nacional de Protección Civil, (BOE, 2015), que refuerza la importancia de la información. Tanto es así que recoge que "los medios de comunicación están obligados a colaborar de manera gratuita con las autoridades en la difusión de las informaciones preventivas y operativas ante los riesgos y emergencias, en la forma que aquéllas les indiquen y en los términos que se establezcan en los correspondientes planes de protección civil" (art. 7 bis. 8).

En el caso de Aragón, el capítulo I de Ley 30/2002, de 17 de diciembre, de Protección Civil y Atención de Emergencias de Aragón regula los derechos y deberes de los ciudadanos ante situaciones de emergencia. En el sentido que nos ocupa, la norma aragonesa no solo garantiza el derecho a la información y formación de los ciudadanos sobre "los riesgos colectivos graves que puedan afectarles y de las medidas para enfrentarse a ellos", sino que también establece un deber de colaboración que afecta, especialmente, a los medios de comunicación social, que incluso pueden ser objeto de sanción en caso de incumplimiento.

Pero además de llegar al ciudadano a través de los medios de comunicación, las instituciones apuestan por informar de forma directa mediante sus propias redes sociales. Su importancia y utilidad lo demuestra el hecho de que la mayor parte de los gestores de emergencia del mundo cuentan, desde hace años, con estos nuevos canales de información a la población. Y es que los datos son evidentes. Según el "Estudio Anual Redes Sociales 2021" de IAB Spain, "un 85% de los internautas de 16-70 años utilizan redes sociales, lo que representa cerca de 27 millones usuarios en España". Y esos 27 millones quieren saber la mayor información de la emergencia en el menor tiempo posible. Cabe recordar que las redes sociales también crean vínculos, especialmente necesarios para conseguir que el ciudadano confíe en los servicios de emergencias.

Además, que el organismo público competente lidere la comunicación y se convierta en el portavoz oficial ayudará a que no se difundan rumores, bulos, 'fake news', esas falsas noticias que provocan muchas veces situaciones de pánico y que pueden llegar a perjudicar la gestión de la emergencia.

De todo lo anterior se desprende que una gestión seria y profesionalizada de la comunicación llevará al éxito y, en el caso de las emergencias, a proteger, incluso a salvar, vidas y bienes; mientras que la improvisación y el desconocimiento abocarán inexorablemente al fracaso.

2. EL TÚNEL DE SOMPORT: INFRAESTRUCTURA FÍSICA E INSTITUCIONAL.

En el caso del túnel de Somport (España/Francia) nos encontramos con una infraestructura de importante longitud (8.608 metros), con dos carriles y circulación bidireccional. Cuenta con notables medidas de seguridad (López, 2002. Leo, 2003) dado que es un túnel relativamente reciente, que entró en servicio en 2002. Aunque su proyecto y diseño es anterior a las catástrofes del arco alpino, antes de su puesta en servicio se aplicaron muchas de las recomendaciones de seguridad que en ese momento estaban emergiendo en un momento de gran efervescencia al respecto, antes de la promulgación de la Directiva Europea 2004/54/CE (DOUE, 2004), de seguridad en los túneles de la red transeuropea de transporte.

Posteriormente, la seguridad se ha ido adaptando a la mencionada Directiva y cuando por características técnicas o geométricas no se ha podido realizar, se han considerado técnicas de análisis de riesgos y aplicado medidas para disminuirlos.

El túnel presenta un tráfico moderado/bajo para un túnel que se concibió como una conexión internacional alternativa a los pasos de los extremos de la cadena pirenaica. Discurre en España y Francia por carreteras nacionales (N-330 en España y N-134 en Francia). El trazado de los accesos en la parte francesa, la cercanía del Parque Nacional de los Pirineos, su posterior consideración por parte francesa como vía de tráfico regional y el fomento de otras alternativas al tráfico como las autopistas marítimas no han favorecido el crecimiento del tráfico esperado en la planificación de la obra.

La consideración anterior unida a la presencia permanente de agentes especializados (Campo, 2010) en ambas bocas del túnel permite disponer de un sistema de explotación del túnel que garantiza una alta seguridad. A ello contribuye la existencia de un reglamento específico de tráfico (BOE, 2006) que, entre otras cuestiones, permite gestionar de forma singularizada el paso de mercancías peligrosas, de forma que para las materias más riesgosas se realiza escoltado y con el túnel vacío.

3. EL PLAN DE SOCORRO BINACIONAL Y LA COMUNICACIÓN.

Abundando en la seguridad del túnel de Somport, es importante considerar el entramado administrativo que garantiza la supervisión y el cumplimiento de las responsabilidades de la empresa explotadora. La explotación del túnel es única (UNECE, 2001. Measure 2.10) y la realiza una empresa adjudicataria de conformidad con los dos países, España y Francia, de acuerdo con el Acuerdo Internacional entre el Reino de España y la República Francesa (BOE, 2003) que regula las actuaciones que se realizan en el túnel.

Para su supervisión cuenta con una Comisión Intergubernamental, paritaria entre España y Francia, asesorada por un Comité de Seguridad.

La coordinación de las actuaciones en las que deben participar los servicios de emergencia de ambos países está tratada y regulada por un Plan de Socorro Binacional (Leo, 2015), elaborado conjuntamente por los servicios de protección civil de ambos países, aprobado por la Comisión Intergubernamental. La responsabilidad de la aplicación, mantenimiento y actualización del Plan de Socorro Binacional corresponde a las autoridades administrativas de ambos países en el territorio, Subdelegada del Gobierno en Huesca (España) y Prefecto de los Pirineos Atlánticos (Francia). Son los responsables de la organización y dirección todos los años de un gran simulacro en el que se comprueba y verifica la coordinación entre las administraciones de los dos países, incluidas las autoridades, los servicios de emergencia y el personal de explotación del túnel.

La coordinación del trabajo en el día a día del Plan de Socorro Binacional se hace a través de una Comisión Técnica de Seguimiento en la que participan todos los servicios de emergencia, las administraciones involucradas, el gestor y explotador del túnel y el Responsable de Seguridad, que se incorporó tras la aprobación de la Directiva Europea 2004/54/CE. El trabajo se canaliza mediante la creación de grupos sectoriales: bomberos, sanitarios, apoyo psicosocial, tráfico, operaciones aéreas… (Leo y López, 2010)

La participación directa en los simulacros (Leo, Martínez y Miguel, 2015) de las autoridades territoriales en lo que se ha llamado "operaciones para la reducción de la incertidumbre social sobre los acontecimientos" (Vara, 2005) ha puesto de manifiesto la importancia de trabajar en el modelo de comunicación a la sociedad utilizado en las emergencias. Por ello ha sido necesario crear un grupo de trabajo específico en el que participan todos los responsables de comunicación de las administraciones implicadas: Administración General del Estado y de la Comunidad Autónoma de Aragón por parte española y Administración del Estado por parte francesa.

Una constatación a lo largo de los años es la interacción entre los diferentes agentes sociales a un lado y a otro de la frontera. Si bien los Pirineos siguen constituyendo una frontera física importante, cada vez es menor la frontera social. Y eso se manifiesta en la gestión de la información en caso de una emergencia sucedida en las inmediaciones de ambos países, más aún en el caso de que se de en una infraestructura común. Las políticas de comunicación deben estar absolutamente coordinadas y no presentar la más mínima diferencia. Los agentes sociales y mediáticos de España y Francia en la zona fronteriza son permeables y buscan de forma sistemática referencias de un país al otro.

Esta coordinación está institucionalizada. Toda la información referente a una emergencia en el túnel está centralizada. Un documento específico establece mediante una ficha operativa para España y otra para Francia que "ningún participante en el dispositivo de socorro debe comunicar informaciones a terceros sin autorización previa del Comité de Dirección", y especifica que "los responsables exclusivos de la comunicación de información a prensa" en España son el gabinete de comunicación de la Subdelegación del Gobierno en Huesca y del Gobierno de Aragón, y en el Puesto de Mando Avanzado, la persona designada por el Comité de Dirección. Asimismo, fija que "los mensajes no pueden ser dados a la prensa hasta que el texto sea validado por la subdelegada del Gobierno en Huesca y el prefecto de los Pirineos Atlánticos".

4. PROTOCOLO DE ACTUACIÓN.

La pertinencia de unas líneas de actuación prefijadas en previsión de un suceso se comprenden mejor si se tiene en cuenta que toda situación de emergencia conlleva una confusión inicial, que obliga a trabajar bajo presión y a la vez mantener la calma para garantizar que la información que se proporciona institucionalmente es clara y veraz. Asimismo, la propia naturaleza de una emergencia exige actualizar con frecuencia los datos oficiales en cuanto a balance de víctimas y heridos, estado de la zona afectada, necesidades en cuanto a auxilio de afectados o de ayuda a los servicios de emergencias…

En este contexto, los medios de comunicación son aliados fundamentales en la visibilidad de la emergencia y permiten difundir mensajes rápidamente a mucha población. En un momento en el que las noticias falsas se han convertido en una grave amenaza a la seguridad, contar con un ecosistema de medios con arraigo, independencia y profesionalidad garantiza que la ciudadanía acceda a información en la que puede confiar. Tan importante como la planificación es conocer las necesidades y modos de funcionamiento de los medios, para prever sus necesidades y atenderlas de la mejor forma posible.

Con todos estos factores en cuenta, el Plan de Socorro Binacional (PSB) del túnel del Somport contempla un protocolo de medios de comunicación, de carácter eminentemente práctico, en el que se marcan los pasos a seguir desde el momento en el que se declara una emergencia en la infraestructura. Las actuaciones principales son el envío de notas de prensa, consensuadas por los dos equipos de prensa (Subdelegación y Subprefectura) y validadas por ambas autoridades (subdelegada y subprefecta). La dirección de la emergencia y el equipo de prensa español cuenta con la participación del personal especializado de la comunidad autónoma de Aragón que apoya las actuaciones de emergencia.

Aunque el protocolo no lo contempla específicamente, la atención telefónica a medios tendrá como base la información de esas notas. Además, se prevé la atención a medios in situ por parte de las autoridades.

Las dos primeras notas de prensa reciben la denominación de "automáticas", ya que incluyen información básica y no requieren autorización previa, mientras que a partir de la tercera ya se recoge información sensible (víctimas, heridos, etc.). Las notas se distribuyen entre la lista de medios de la Subdelegación y la Subprefectura, además de en las redes sociales oficiales.

Aunque se hable de notas "automáticas", la ejecución de la redacción y envío corre a cargo de los respectivos responsables de prensa. Los datos ofrecidos por España y Francia han de ser coincidentes, para lo que se cuenta con un grupo de WhatsApp de coordinación en el que están incluidos los periodistas de la Subdelegación, la Subprefectura y el 112 Aragón. En este grupo participa adicionalmente personal del equipo de comunicación de la Delegación del Gobierno y de la Subprefectura, para el caso en que los responsables habituales estuvieran en ese preciso momento ilocalizables o indispuestos y fuera necesario sustituirles.

La primera de las notas se envía a los medios tan pronto como se recibe el aviso por parte de los servicios de emergencia del túnel, con la siguiente plantilla:

Nota de prensa nº1

Una incidencia en el túnel de Somport obliga a cortar el tráfico en este paso fronterizo

de ### de ###.- Una incidencia registrada en el Túnel de Somport ha obligado a cortar la circulación de todo tipo de vehículos.

Los servicios de emergencia del túnel están trabajando ya en el lugar de los hechos.

Los vehículos que realizan esta ruta entre España y Francia pueden acceder a ambos países a través del Puerto de Somport, en la N-330a.

(Seguiremos informando)

Esta nota tiene como finalidad ofrecer una primera información de servicio: corte del tráfico y desvío del mismo, además de indicar la actuación de los servicios de emergencias.

La segunda nota de prensa se remite una vez queda activado el Plan de Socorro Binacional, con la siguiente plantilla:

Nota de prensa nº2

Activado el Plan de Socorro Binacional tras un accidente en el Túnel de Somport

de ###### de ####.- La Subdelegada del Gobierno en Huesca y la Subprefecta de Oloron Sainte Marie se han desplazo al Túnel de Somport, donde se ha constituido el Puesto de Mando Estratégico para coordinar las operaciones de emergencia de ambos países, tras al accidente registrado en este paso fronterizo..

El accidente ha ocurrido en (### el interior del túnel, parte española o francesa ###) pasadas las #### horas, en el punto kilométrico #### de la Carretera #### y ha hecho necesaria la activación del Plan de Socorro Binacional.

Al lugar del accidente se han desplazado medios exteriores de emergencia de los dos países para reforzar la actuación del personal del túnel.,

Los vehículos que realizan esta ruta entre España y Francia pueden acceder a ambos países a través del Puerto de Somport, en la N-330a.

Plan de Socorro Binacional

El Plan de Socorro Binacional contempla la estructura organizativa conjunta que, bajo un mando único, permite la dirección y coordinación de los Servicios de las Administraciones Públicas de los dos Estados competentes en situaciones de emergencia que afectan al túnel de Somport. Está dirigido por la Subdelegada del Gobierno de España en Huesca y por el Prefecto de los Pirineos Atlánticos, como autoridades responsables por parte española y francesa.

(Seguiremos informando)

En esta segunda nota se incluye ya información básica del suceso, si bien su objetivo prioritario es comunicar la activación del PSB y la llegada de servicios de emergencias exteriores.

La tercera nota de prensa es la última para la que se cuenta con una plantilla, y es la primera que recoge información sensible sobre número de víctimas y/o heridos y alcance de los daños materiales:

Nota de prensa nº3

Constituido el Puesto de Mando Estratégico tras el accidente registrado en el Túnel de Somport

de ###### de ####.- La subdelegada del Gobierno en Huesca y la subprefecta de Oloron-Sainte Marie se han desplazo al Túnel de Somport, donde se ha constituido el Puesto de Mando Estratégico para coordinar las operaciones de emergencia de ambos países, tras al accidente registrado en este paso fronterizo..

El accidente ha ocurrido en (### el interior del túnel, parte española o francesa ###) pasadas las #### horas, en el punto kilométrico #### de la Carretera #### y ha hecho necesaria la activación del Plan de Socorro Binacional.

El balance de víctimas es de ## implicados, con ## fallecidos, ## heridos y ## fallecidos

Se han producido daños materiales en el túnel en …

Al lugar del accidente se han desplazado medios exteriores de emergencia de los dos países para reforzar la actuación del personal del túnel. Están presentes Bomberos de la Diputación Provincial de Huesca y del SDIS64, Guardia Civil, Gendarmería, 061 Aragón y SAMU, Servicios sociales, …

Los vehículos que realizan esta ruta entre España y Francia pueden acceder a ambos países a través del Puerto de Somport, en la N-330a.

(Seguiremos informando)

Solo a partir de esta tercera nota, cuando esté constituido el Puesto de Mando Estratégico (PME), se ofrecerán datos de víctimas y/o heridos. A partir de aquí, el flujo informativo y la publicación de nuevas notas de prensa queda determinado por la decisión del PME, en comunicación con los equipos de prensa, también desplazados al Centro de Control del Túnel del Somport. En este edificio, a la entrada del lado español, está fijada la sala del PME, y junto a esta se ubicarán los equipos de prensa español y francés, de manera que el intercambio de información y decisiones sea inmediato.

En redes sociales, se enviará la información de las notas de prensa 1 y 2 que será un "pantallazo" (fotografía de las notas escritas). A partir de la constitución del PME serán las autoridades las que darán instrucciones sobre la información a proporcionar a través de las redes sociales.

Conforme la magnitud del suceso e interés de los medios, se determinará si procede realizar una atención de las autoridades a medios in situ, para lo que también están prefijados los espacios: la entrada exterior del centro de control, aneja a la boca del túnel (lo que permite a los medios audiovisuales contar con imágenes con la infraestructura de fondo), o, en caso de que haya condiciones meteorológicas adversas, el hall del edificio.

En el ámbito de la comunicación, el incidente se dará por resuelto cuando así lo determinen las autoridades, emitiéndose una nota de prensa final de balance con la actuación.

Fuera del protocolo, pero también importante en la gestión de la crisis, será necesario monitorizar los medios y las redes sociales para detectar la posible difusión de datos imprecisos, erróneos o falsos. Los gabinetes deberán actuar para neutralizar su difusión, bien aclarando los datos que sean necesarios bien reforzando la comunicación.

5. LA IMPORTANCIA DE LA COMUNICACIÓN ENTRE GABINETES FRANCIA-ESPAÑA

Ante una situación de emergencia, el trabajo previo es fundamental para que todas las partes implicadas en el operativo tengan perfectamente definido su papel y reducir al mínimo la improvisación. En el ámbito de la comunicación en caso de emergencia en el túnel del Somport, existe un grupo de trabajo que se reúne periódicamente, formado por Subdelegación, Subprefectura y 112 Aragón, y del que emana el protocolo de actuación descrito más arriba.

En su última reunión, el 27 de mayo de 2021, sirvió para, tras la pandemia y cambios en el personal, establecer un primer contacto de los nuevos responsables de prensa y discutir algunos de los puntos establecidos en el protocolo por anteriores equipos. De esa puesta en común salieron dos modificaciones que pasan a referirse a continuación, como ejemplo práctico de detalles que pueden marcar la diferencia en la comunicación de una crisis:

- Cambio de término en la 'Nota de prensa nº1: en el modelo fijado en 2019, la expresión utilizada era "accidente", de modo que se hablaba de "Un accidente en el túnel del Somport obliga a cortar el tráfico transfronterizo". La palabra "accidente" queda sustituida por "incidencia" ("acontecimiento que sobreviene en el curso de un asunto", en este caso el tráfico), por considerarse con menores connotaciones negativas. La sustitución tiene en cuenta que, tal como se practicó en el ejercicio de simulacro previo, la interrupción del tráfico puede deberse a un incidente menor sin mayores consecuencias (incendio en las ruedas de un autobús, sin heridos), y que usar la palabra "accidente" en una primera comunicación puede llevar a los medios a demandar de forma inmediata informaciones sobre heridos o víctimas a través de llamadas al responsable de prensa, además de generar alarma entre la ciudadanía.
- Añadido a la 'Nota de prensa nº2. Se considera que el titular "Activado el Plan de Socorro Binacional tras un accidente en el túnel del Somport" requiere un mayor contexto, puesto que no todos los receptores (periodistas y ciudadanía) pueden conocer en qué consiste el PSB y puede dar lugar a interpretar que se trata de un suceso de enorme gravedad, con independencia del alcance real del mismo. Es por ello que se decide añadir en la nota un párrafo explicativo sobre qué es el PSB, con objeto de normalizar su activación.

En esta última reunión de trabajo se ratifican además otros puntos con los que ya se venía trabajando, como que si se activa el PME, en las notas de prensa no se hablará de víctimas y/o heridos hasta que los textos se elaboren desde el propio PME. Se constata asimismo el buen funcionamiento del grupo de WhatsApp, al que se incorporan miembros suplentes, y se propone el uso del inglés como lengua franca en caso de problemas de comunicación entre los equipos.

En este encuentro de trabajo se fijan también cuestiones descritas en el epígrafe anterior, como la traslación de las notas a redes sociales, la ubicación física del equipo de prensa en el centro de control y los lugares de atención a medios.

En el ámbito de la comunicación, los simulacros anuales son una importante herramienta para la detección de posibles mejoras, conocimiento sobre el terreno de la infraestructura y del centro de control y contacto entre los equipos de ambos lados de la frontera.

Los dos últimos simulacros han permitido poner a prueba a los equipos en circunstancias muy diferentes. Debido a las restricciones de la pandemia de Covid-19, el ejercicio correspondiente al año 2020 se realizó por vía telemática en marzo de 2021 y tuvo como supuesto un incendio de un autobús en el interior del túnel, sin heridos. De este ejercicio se extrajo la necesidad de moderar el lenguaje en las notas para no crear alarma en caso de un suceso menor, así como para, en caso de un suceso grave, atenuar la demanda de información de los medios en los primeros compases, en los que, por otro lado, resulta complicado ofrecer información fiable en plena actuación de los servicios de emergencia.

El ejercicio de 2021 se realizó en octubre de ese año, y fue finalmente suspendido una vez iniciado al producirse una alerta de seguridad real, no relacionada con el túnel, en el lado francés, lo que obligó a movilizar los servicios de emergencia de la Prefectura. Incluso sin llegar a llevarse a cabo, este ejercicio permitió establecer la disposición de los equipos sobre el terreno y poner a prueba la coordinación, en este caso para emitir una nota de prensa informando de la suspensión del simulacro y la reanudación del tráfico antes de lo previsto.

Elaboración de nota de prensa durante el simulacro realizado en el túnel de Somport en 2021. De izquierda a derecha en segunda y tercera posición las autoridades española y francesa.

6. CONCLUSIONES

Como se ha visto, en la gestión de la información en una emergencia en túneles es clave contar con una planificación previa, que incluya un amplio conocimiento de la infraestructura, del protocolo de comunicación y del territorio en una dimensión social. El protocolo de comunicación es la herramienta básica para dar respuesta a la emergencia, pero es un elemento vivo, que requiere una revisión constante para mejorarlo y adaptarlo a los cambios.

El manejo de la comunicación debe estar siempre asesorado por profesionales de la información, especializados en las relaciones con los medios.

Los simulacros periódicos son de suma importancia para poner a prueba la planificación y los equipos. Solo sobre el terreno, ejercitándose en los tiempos de respuesta ante distintos supuestos, es posible verificar lo que funciona y detectar aquello que no. Implicar en los simulacros a las autoridades, quienes tomarán las decisiones finales, y a los servicios de prensa es la forma de tener el engranaje de la comunicación listo para activarse desde el primer minuto. De forma adicional, las reuniones y contactos habituales entre los equipos de prensa implicados facilitan la comunicación interna.

En todo caso, no hay que olvidar que una situación de emergencia supone enfrentarse a lo inesperado, y que un suceso real puede diferir mucho de los ejercicios de simulacro. La capacidad de aptarse es también un valor en la comunicación de emergencias, y en este sentido hay que remarcar lo que establece el protocolo, que da potestad al Puesto de Mando Avanzado para adoptar las decisiones de comunicación oportunas en cada momento, en diálogo con los equipos de prensa.

BIBLIOGRAFÍA

BOE, 1978. Constitución Española. En https://www.boe.es/eli/es/c/1978/12/27/(1)/con

BOE, 1985. Ley 2/1985, de 21 de enero, sobre protección civil. En https://www.boe.es/eli/es/l/1985/01/21/2

BOE, 2003. Acuerdo entre España y Francia relativo a la explotación, conservación, seguridad y, en su caso, puesta al día del túnel de carretera de Somport, hecho en Perpiñán el 11 de octubre de 2001 e intercambio de cartas constitutivo de una declaración interpretativa de los párrafos tercero y cuarto del artículo 9 del Acuerdo. En https://www.boe.es/eli/es/ai/2001/10/11/(2)

BOE, 2006. Resolución de 17 de febrero de 2006, de la Dirección General de Tráfico, por la que se establecen medidas especiales de regulación de tráfico en el túnel de Somport. En https://www.boe.es/eli/es/res/2006/02/17/(2)

BOE, 2015. Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil. En https://www.boe.es/eli/es/l/2015/07/09/17/con

Campo, V. 2010. Funcionamiento del servicio de emergencias del túnel de Somport. V Simposio de túneles de carreteras, Bilbao. Pág. 1.067-1.071. Asociación Técnica de Carreteras. Madrid.

DOUE, 2004. Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras. DOUE-L-2004-81114, 30 de abril de 2004, páginas 39-91. En https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0054&from=ES

Hernández, S. La gestión comunicativa del riesgo en la Unidad Militar de Emergencias. Estrategia y Estructura. Revista del Instituto Español de Estudios Estratégicos, nº 17, 2021. Pág. 39-58. En https://revista.ieee.es/issue/view/319/272

IAB Spain. (2021). Estudio Anual Redes Sociales 2021. Madrid.

Leo, 2003. Planificación y desarrollo de los ejercicios previos a la apertura del túnel de Somport: Experiencias y consecuencias. III Simposio nacional de túneles, Pamplona. Pág. 733-745. Asociación Técnica de Carreteras. Madrid.

Leo, E. y López, J, 2010. El Plan Conjunto hispanofrancés para emergencias en el túnel de Somport como modelo de emergencias en túneles. V Simposio de túneles de carreteras, Bilbao. Pág. 413-431. Asociación Técnica de Carreteras. Madrid.

Leo, 2015. Planificación de emergencias en túneles de carreteras bidireccionales: Somport y Bielsa-Aragnouet. VI Simposio de túneles de carretera, Zaragoza. Pág. 633-649. Asociación Técnica de Carreteras. Madrid.

Leo, E., Martínez C.M. y Miguel A., 2015. Simulacros de emergencia en el túnel de Somport: 12 años de experiencia. VI Simposio de túneles de carreteras, Zaragoza. Pág. 267-285. Asociación Técnica de Carreteras. Madrid.

López, 2002. Túneles nuevos recién construidos: Somport. Seguridad frente a incendios en túneles, pág. 61-86. Academia de Ingeniería. Madrid.

Orbe, I. Emergencias y medios de comunicación. Gobierno Vasco, 2012. En https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/publicaciones_otros/es_def/adjuntos/2012%20Emergencias%20y%20medios%20de%20comunicacion.pdf

Serrano, L. (2013). 11M y otras catástrofes. La gestión de la comunicación en emergencias. Madrid: Irescate.

Simon, T., Goldberg, A., y Adini, B. (2015). Socializing in emergencies—A review of the use of social media in emergency situations. International Journal of Information Management, 35(5), 609-619. Consultado el 14 de marzo de 2022 en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401215000638

UNECE, 2001. Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels. Economic & Cocial Council. UN. December, 2001.

En https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2002/ac7/TRANS-AC7-09e.pdf

Vara, M., 2005. De la gestión del incidente a la gestión de la crisis, Nuevas exigencias al sistema de explotación de túneles. IV Simposio de túneles, Principado de Andorra. Pág. 789-804. Asociación Técnica de Carreteras. Madrid.

PEDESTRIAN BEHAVIOR DURING REAL SCALE EVACUATION EXPERIMENTS IN ROAD TUNNEL

Natalia Schmidt-Polończykn

AGH University of Science and Technology
Faculty of Civil Engineering and Resource Management

The real scale evacuation experiments in polish road tunnel were performed in order to observed behavior of evacuees exposed in different smoke conditions (extinction coefficients 0,1 – 1,1 m-1). The pedestrians were exposed to artificial, non-toxic smoke. The decision making, learning effect, competitive behavior were analyzed. We observed multi-line patterns when Cs < 0.5m−1 and double-lines patterns created by pedestrians under heavy smokiness Cs > 0.7m−1. The total evacuation times, pre-movement times and movement speeds were also calculated. It has been shown that the motivation of the evacuees and the effect of learning is as important as the impact of low visibility on the evacuation time and movement speed. It has also been shown that the speed of movement in smoke depends not only on the visibility but also on the knowledge of the tunnel infrastructure, evacuees' attitude and familiarity with environment and evacuation procedures.

COMPORTAMIENTO DE LOS PEATONES DURANTE EXPERIMENTOS DE EVACUACIÓN A ESCALA REAL EN UN TÚNEL DE CARRETERA

Los experimentos de evacuación a escala real en un túnel de carretera polaco se realizaron para observar el comportamiento de los evacuados expuestos a diferentes condiciones de humo (coeficientes de extinción 0,1 – 1,1 m-1). Los peatones estuvieron expuestos a humo artificial no tóxico. Se analizó la toma de decisiones, el efecto de aprendizaje, el comportamiento competitivo. Observamos patrones de líneas múltiples cuando Cs < 0,5 m−1 y patrones de líneas dobles creados por peatones bajo condiciones de mucho humo Cs > 0,7 m−1. También se calcularon los tiempos totales de evacuación, los tiempos previos al movimiento y las velocidades de movimiento. Se ha demostrado que la motivación de los evacuados y el efecto del aprendizaje es tan importante como el impacto de la baja visibilidad en el tiempo de evacuación y la velocidad de movimiento. También se ha demostrado que la velocidad de movimiento del humo depende no solo de la visibilidad, sino también del conocimiento de la infraestructura del túnel, la actitud de los evacuados y la familiaridad con el entorno y los procedimientos de evacuación.

COMPORTEMENT DES PIÉTONS LORS D'EXPÉRIENCES D'ÉVACUATION EN GRANDEUR RÉELLE DANS UN TUNNEL ROUTIER

Les expériences d'évacuation à échelle réelle dans un tunnel routier polonais ont été réalisées afin d'observer le comportement des évacués exposés à différentes conditions de fumée (coefficients d'extinction 0,1 – 1,1 m-1). Les piétons ont été exposés à de la fumée artificielle non toxique. La prise de décision, l'effet d'apprentissage, le comportement concurrentiel ont été analysés. Nous avons observé des motifs multilignes lorsque Cs < 0,5 m−1 et des motifs doubles lignes créés par des piétons sous une forte fumée Cs > 0,7 m−1. Les temps d'évacuation totaux, les temps de pré-déplacement et les vitesses de déplacement ont également été calculés. Il a été démontré que la motivation des évacués et l'effet d'apprentissage sont aussi importants que l'impact d'une faible visibilité sur le temps d'évacuation et la vitesse de déplacement. Il a également été démontré que la vitesse de déplacement dans la fumée dépend non seulement de la visibilité mais aussi de la connaissance de l'infrastructure du tunnel, de l'attitude des évacués et de la familiarité avec l'environnement et les procédures d'évacuation.

1. INTRODUCTION

While traveling through road tunnels, users are exposed to many threats to their health and even lives. From the point of view of the scale of the threat, fire is the greatest risk and the most dangerous event that can happen in a tunnel. All the more so because tunnels are contained, hence it is obvious that smoke generated by the fire will pose a serious threat to the evacuation of people. The behavior of people during evacuation from a road tunnel in the event of a fire will be different than in an ordinary building [1].

In the event of a fire in a road tunnel, the priority is to evacuate people at risk in the shortest time possible. The evacuation process is a complex issue, depending on many factors determining the success of the withdrawal of people from the endangered place. The disastrous consequences of various tunnel fires have prompted researchers to make investigations focusing on different aspects of the evacuation: [2, 3, 4, 5], etc.

Accidents involving buses are very dangerous in tunnels. Firstly, passengers have to leave the bus and, secondly, they have to leave the tunnel. Over a few recent years such accidents were reported: for example, the bus fire in the Taojiakuang tunnel in Weihai (Shandong Province, China, 09/05/2017, 12 fatalities), the school bus fire in Jack Lynch Tunnel in Cork (Ireland, 04/06/2013), the accident in the Dullin tunnel (France, 18/01/2004) or the bus fire in the Homer tunnel (New Zealand, 03/11/2002) [6].

This article presents results of the experimental studies on evacuation from a bus on a real-life scale, carried out in the Emilia road tunnel in Laliki in smoke conditions. In each of the three experiments pedestrians were gathered in a bus, the bus was stopped in a tunnel, and then the tunnel was filled with artificial smoke and the pedestrians had to evacuate.

The pre-movement time was estimated, the flow and movement velocities were compared, and slowdowns were analyzed for different levels of visibility, as determined by the range of the extinction coefficient, Cs.

Valuable for the development of science are empirical studies conducted at a real scale, as they provide knowledge about phenomena and processes closest to real situations or events. However, the organization of such tests is not an easy task due to the need for ensuring safety of participants, high costs and the necessary support from various services, such as a fire brigade or ambulance. In any case, experimental results are essentially both for better understanding of the behaviors of evacuees and for the calibration and validation of computerized evacuation models or risk assessment.

2. RESEARCH METHODOLOGY

The evacuation experiment was carried out in the Emilia tunnel in Laliki, consisting of a two-lane, two-way road tunnel and a parallel evacuation tunnel for pedestrian traffic. The tunnel is 678 m long, has a horseshoe shape cross-section and the following dimensions: tunnel width 11.2 m, two lanes' width 7.0 m, tunnel height 6.55 m, cross-section area 83.1 m2. The tunnel has 4 transverse passages connecting the road tunnel with the evacuation tunnel, located every 150 m, through which people can evacuate from the endangered place.

In the experiment, 50 students of the AGH University of Science and Technology in Krakow, 34 women and 16 men, undertook the evacuation exercise. The mean age of the participant was 21.32, the standard deviation (SD), σ, 1.477, min. 19, max. 24 years. Also details of the height, weight and shoulder width of the participants were collected (Table 1).

Table 1 Selected parameters of the experiment participants

Parameter	Min.	Max.	Mean	SD
Age (years)	19	24	21.32	1.477
Height (cm)	160	188	177	7.113
Weight (kg)	53	95	69.22	9.248
Shoulder width (cm)	38	56	48.2	4.669

Non-toxic cold smoke was used during the test. In addition, to ensure safe conditions, the experiment was carried out with the participation of the Police, Fire Brigade and rescue services.

During the 1st experiment, the participants did not receive any information about: the purpose of the event, the rules of behavior, the presence of smoke, the infrastructure of the tunnel (the presence and location of emergency exits), or the place of stopping the bus. The bus, riding straight from Krakow, entered the tunnel without stopping before, in order to obtain an element of surprise among the participants of the experiment. During each experiment the driver stopped in the middle of the tunnel.

The signal to start the evacuation for the participants of the experiment was identical as it would be in event of the outbreak of a real fire. Smoke appeared in the tunnel and the fire procedure was started (the fire lighting, voice messages and fire alarm went on). It should be noted that the organizers of the experiment did not give any signal to start the evacuation and the bus driver (who knew the plan of the experiment) was asked to stay in place and do nothing (such as giving instructions to the participants or revealing the plan of the experiment) except opening the door in the bus after hearing the fire alarm. During the first experiment, when there was slight smoke in the tunnel (Cs approx. 0.1-0.2 m-1), the task for the participants was not clearly explained. The next two experiment were carried out in a similar way but with some changes. During the 2nd experiment, with medium smoke (Cs approx. 0.4-0.5 m-1), the participants were tasked to evacuate. During the 3rd experiment, with thick smoke (Cs approx. 0.8-0.9 m-1), the participants were asked to leave the tunnel as soon as possible. The density of smoke was increased in each subsequent experiment (Fig. 1).

Fig. 1 An empirical comparison of the representative levels of visibility in experiments 1, 2 and 3

3. THE DISCUSSION OF THE RESULTS

3.1 The pre-movement time

In the 1st experiment, after the bus stopped and smoke appeared, the participants did not leave the bus. After the alarm signal was triggered, they stayed on their seats (Fig. 2). Only the voice message given during the fire procedure encouraged the first participants to leave the vehicle (t = 27 s). At this stage of the experiment, 9 people decided to leave the bus. Others followed after another 23 seconds (t = 50 s).

Fig. 2 The moment of making the evacuation decision during experiment 1

During the 1st experiment, the pre-movement time (alarm realization time + response time + within the bus movement time) was longest (Fig. 3). In this experiment the first person left the bus after almost 36 seconds, while in the two remaining ones 5 and 3 seconds, respectively. However, it is the 1st experiment that is most representative for the estimation of the pre-movement time, mainly due to the element of surprise. The participants did not know the purpose or the scenario and were unfamiliar with the tunnel infrastructure, so their reactions were most representative for the real-life situation. The subsequent, much shorter times, were due to the learning effect. The participation in the previous experiments and the knowledge gained about the evacuation procedures allowed the participants to respond faster and leave the dangerous area sooner.

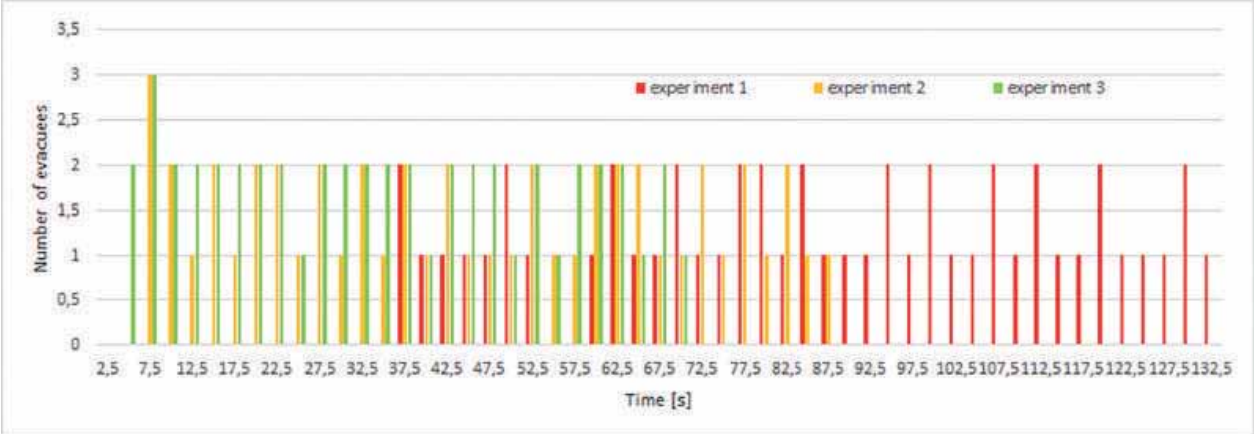


Fig. 3 The pre-movement times in experiments 1-3

3.2 The speed of movement

The movement speed velocity was calculated for each experiment, separately for the road tunnel and for the escape tunnel, mainly due to the significantly different conditions in the both spaces (e.g. no smoke in the escape tunnel). The speed was calculated using the modeling method proposed by [7] and the results are shown in Figs. 4 and 5 and in Table 2.

Table 2 The mean speed of movement of people in the main tunnel and in the evacuation tunnel during experiments 1-3

Experiment (number) Tunnel (type)	**1 Main**	**1 Evac.**	**2 Main**	**2 Evac.**	**3 Main**	**3 Evac.**
Mean speed (m/s)	1.056	1.706	1.321	1.653	1.221	3.835
SD	0.083	0.058	0.375	0.081	0.295	0.719

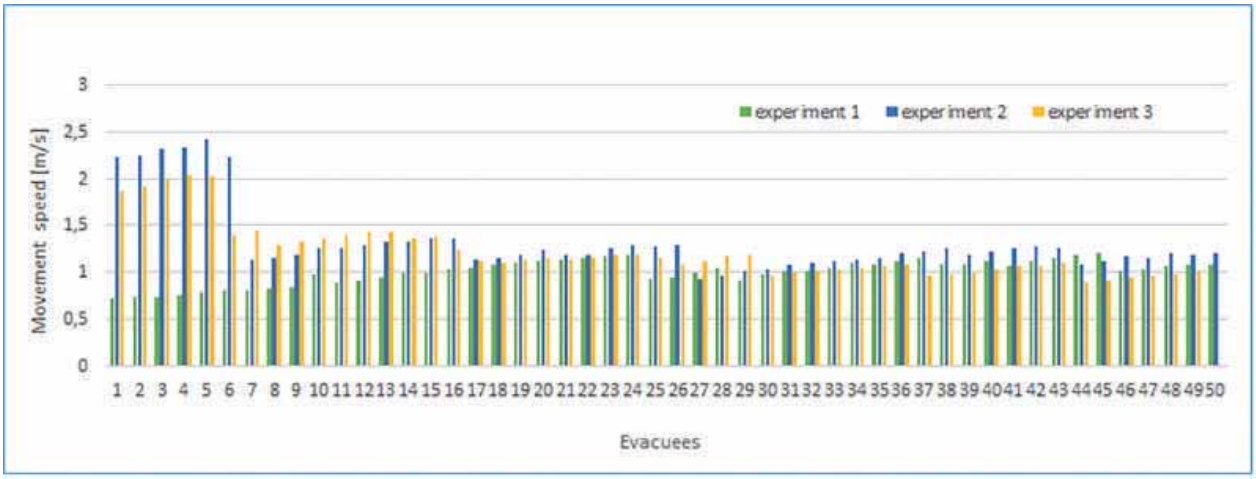


Fig. 4 The speed of movement in the main tunnel in the subsequent experiments

Fig. 5 The speed of movement in the evacuation tunnel in the subsequent experiments

The minimum movement speeds in the main tunnel were similar in all the three experiments (0.895, 0.917 an 0.893 m/s). Although the highest mean speed was expected from experiment 3 (due to the purpose of the test), it occurred in experiment 2 (1.321 m/s). This is probably a result of much denser smoke during the 3rd experiment (Cs approx. 0.8-0.9 m-1) compared to the 2nd experiment (Cs approx. 0.4-0.5 m-1). A similar situation can be observed while analyzing the maximum speeds in the main tunnel: the highest value was recorded for experiment 2 (2.422 m/s), slightly lower for experiment 3 (2.044 m/s) (the poorest visibility) and the lowest for the experiment 1 (1.211 m/s).

In the first two experiments, participants moved within the evac tunnel at almost the same speed (Fig. 5). The difference is visible in experiment 3, where students were tasked to evacuate as soon as possible. The mean and max. speeds in this case were 3.835 and 5.760 m/s, which demonstrates strong motivation in students during this attempt.

3.3 The effect of smoke on the movement speed

The analyses made it possible to determine the slowing down effect of smoke in the main tunnel. For this purpose, the speed of movement of each participant in the main tunnel was calculated as a percentage of the expected speed, understood as the speed of free movement achieved in the evac tunnel. The escape tunnel during the tests was smoke-free and wide enough to allow free movement with a speed corresponding to the purpose of each experiment. These values were considered to be representative (achievable) speeds in the main tunnel.

During the 1st experiment the mean speed of movement of the participants in the main tunnel was 62.56% of the expected speed (Table 3). Surprisingly, during the 2nd experiment, despite denser smoke, the evacuation speed in the main tunnel accounted for 73.17% of the expected speed. A significantly smaller value was achieved in the 3rd experiment, only 31.46%, as the mean representative speed in this test was relatively high (3.835 m/s).

Table 3 The speed of movement in the main tunnel as a percentage of the representative speed (the free movement speed achieved in the escape tunnel)

Experiment	1	2	3
Mean value	62.56 %	73.17 %	31.46 %
SD	6.12 %	5.90 %	3.12 %

3.4 The flow of the evacuees

The total evacuation times for the 3 subsequent experiments were 340, 301 and 215 seconds, respectively. The time of leaving the most dangerous space during the fire (the main tunnel) was the longest in the 1st experiment (84-163 s) and the shortest in the 3rd experiment (21-102 s) (Fig. 8).

The rate flow of the participants through the bus door does not change in the experiments. It was not high and did not change much between the experiments (Fig. 6). The only significant difference, noted in the 1st experiment, was due to the longer initial response time.

The actual differences in the flow rates between the experiments occurred only at the exit from the escape tunnel (Fig. 7). In experiments 1 and 2, the evacuation proceeded in distinct widely spaced groups. In the 3rd experiment the flow at the exit of the escape tunnel was constant and, in addition, no formation of larger groups was observed.

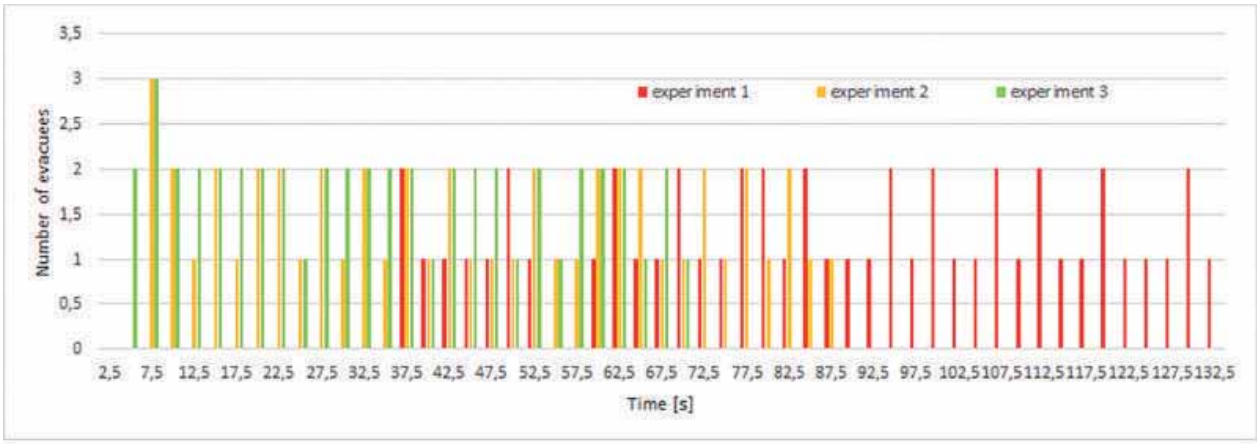


Fig. 6 A comparison of the times at the checkpoint in the experiments – the bus door

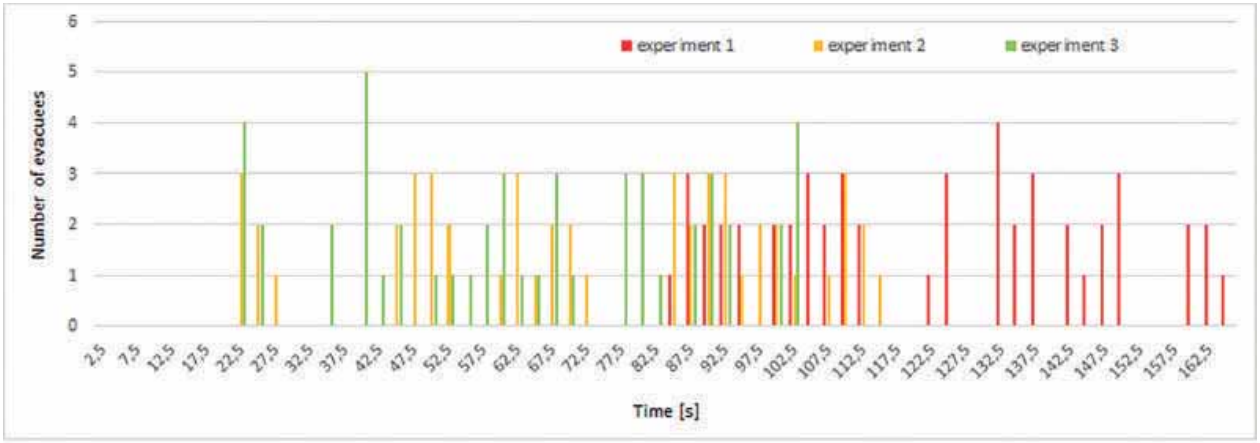


Fig. 7 A comparison of the times at the checkpoint in the experiments – the passage between the main and evacuation tunnels

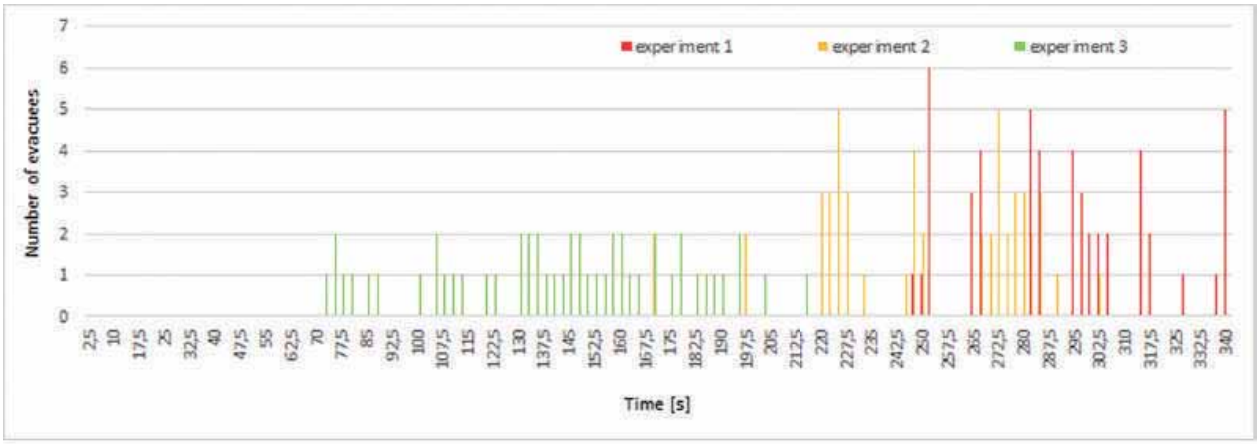


Fig. 8 A comparison of the times at the checkpoint in the experiments – the exit from the evacuation tunnel

The flow times of the evacuees through the bus door and through the inter-tunnel passage were similar in experiments 2 and 3 (Figs. 6 and 7). However, the participants were much faster at the exit from the evac tunnel (Fig. 8) compared to experiment 2, which is due to their stronger motivation. In addition to smoke, the time to leave the most dangerous area (the main tunnel) depended mainly on the participants' experience and knowledge of the tunnel and the evacuation process.

It seems interesting to analyze the time differences at the checkpoints, especially the difference between the first and last evacuated person. The exact data for the time comparison are given in Table 4 and in Fig. 9.

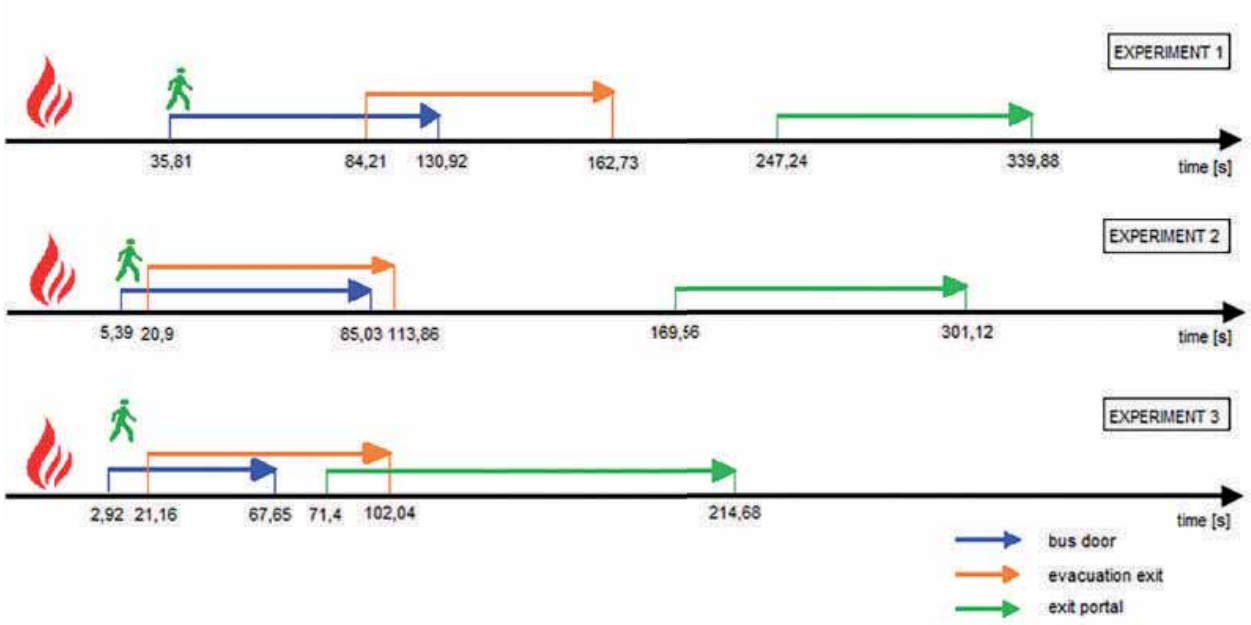


Fig. 9 The first and the last persons' passing times recorded at the checkpoints in the subsequent experiments

It can be seen that the subjects left the bus increasingly more effectively with each attempt: the time difference between the first and the last person to leave decreases. In turn, for the emergency exit, this value is more or less similar (except for a small increase in the 2nd experiment). Unlike for the bus door, the difference in the times of the passage through the exit from the escape tunnel (portal) increased in the subsequent experiments. The reason for this may be the fact that during each evacuation the participants had to walk (slightly uphill) a section of 300 m, so the difference in their physical condition and in motivation may be the reason for the increase in the time difference.

Only during the 1st experiment the time difference between the first checkpoint (the bus door) and the last one (the exit from the escape tunnel) was similar. During the next two tests these times were longer and the reason may be similar to the one mentioned in the above paragraph.

Table 4 A comparison of the difference in the first and the last persons' passage times obtained at the checkpoints in the subsequent experiments.

Experiment	Bus door	Main /evacuation tunnel passage	Evacuation tunnel exit
1	95.1 s	78.5 s	92.6 s
2	79.6 s	92.9 s	131.5 s
3	64.7 s	80.8 s	143.2 s

4. CONCLUSION

Safety aspects in road tunnels are the subject of many studies but experiments conducted on a real-life scale in smoke are carried out relatively rarely [7-12]. Previous studies and analyses have focused mainly on the decision to start evacuation by drivers [9], the speed of movement in smoke [7, 12], the marking of emergency exits [11, 13] and individual behaviors in thick smoke [8, 9, 10].

In this paper the process of evacuation was analyzed in the context of the most important parameter: the evacuation time. For this purpose, the pre-movement time was estimated, the flow rates and movement speeds were compared, and the movement delays caused by smoke were analyzed – for different levels of visibility determined by the range of the extinction coefficient, Cs.

The pre-movement time, i.e. the alarm realization times and the response times (including the time of movement within the bus) in subsequent experiments were 36, 5 and 3 seconds, respectively (Figs. 3, 6 and 9). The most representative value of this time is the result of the 1st experiment where there was the element of surprise. Despite the presence of smoke and the triggered fire alarm, the decision to evacuate was not made. It was only after a while, about 36 seconds, that the evacuation was started. This is because people usually stick to their roles (e.g. as a passenger) in the event of an accident until they realize the seriousness of the situation and/or until they are given clear instructions on what to do. Similar behaviors were observed during the actual tunnel fires [13, 14, 15]. Probably it was the voice message that made the first people evacuate and the rest of the participants just followed after another 23 seconds. The indifference to the alarm signal was also noted during other evacuation experiments [8, 16].

The speed achieved in the escape tunnel (smoke-free) was much higher in the 3rd experiment (the subjects were encouraged to run) (Fig. 5), which indicates that the tunnel evacuation efficiency depends only on the attitudes (motivation) of the users. The highest speed of movement in the main tunnel (smoky space) was recorded during the 2nd experiment (1.321 m/s) (Fig. 4). Due to the goals of the subsequent experiments, the maximum values were expected from the 3rd one. However, apparently, this parameter depends on the density of smoke and it was thickest in the 3rd experiment (Cs approx. 0.8-0.9 m-1). The actual speed achieved in the main tunnel accounted for 31.46% of the expected speed achievable in the escape tunnel (Table 3). This matrix shows how big the impact of smoke can be on the speed of movement. It is worth noting that, although during experiments 1, 2 and 3 the density of smoke was increased, the subjects managed to achieve better speeds of movement (Figure 4). The total evacuation times in the subsequent experiments were 340, 301 and 215 seconds, respectively.

These results clearly indicate that the speed of movement in smoke depends not only on the density of smoke (the visibility determined by the extinction coefficient) but also on the very attitude of the participants and knowledge of the tunnel. In previous studies, the speed of pedestrian movement was often considered as a function of the extinction coefficient alone [7, 8, 12]. The foregoing results indicate that both the knowledge of the surrounding environment (experiment 2) and the attitude of the evacuees (experiment 3) also affect the speeds of their movement.

The time to leave the most dangerous space during the fire (the main tunnel) was the longest in experiment 1 and the shortest in experiment 3(Figs. 7 and 9). The results indicate that the adverse impact of low visibility on the evacuation time is as important as the motivation of the evacuees and the effect of learning, which was also observed in [9].

REFERENCES

[1] M. Seike, N. Kawabata, M. Hasegawa, and F. Tanaka. Experimental Investigations about Visibility in a Fire Accident Using a Scale Model Tunnel. 2012.

[2] D. Purser. Application of human behaviour and toxic hazard analysis to the validation of cfd modeling for the mont blanc tunnel fire incident. In Proceedings of the Advanced Research Workshop on Fire Protection and Life Safety in Buildings and Transportation Systems, pages 23–57, 2009.

[3] E. Ronchi, D. Alvear, N. Berloco, J. Capote, P. Colonna, and A. Cuesta. Human behaviour in road tunnel fires: Comparison between egress models (fds+ evac, steps, pathfinder). In Proceedings of the 12th international Interflam 2010 conference, Nottingham, UK, pages 837–848, 2010.

[4] D. Nilsson. Exit choice in fire emergencies-Influencing choice of exit with flashing lights. Lund University, 2009.

[5] Schmidt-Polończyk, N.; Wąs, J.; Porzycki, J. What Is the Knowledge of Evacuation Procedures in Road Tunnels? Survey Results of Users in Poland. Buildings 2021, 11, 146. https://doi.org/10.3390/buildings11040146

[6] Beard A, Carvel R. Handbook of Tunnel Fire Safety. Second edition ed. Carvel R, Beard A, editors. ICE Publishing; 2012. Available from:

https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/htfs.41530.

[7] Jin T. and Yamada T.: Irritating effects of fire smoke on visibility. Fire Science and Technology, 5(1):79–90, 1985

[8] Fridolf K., Nilsson D., and Frantzich H.: Fire evacuation in underground transportation systems: A review of accidents and empirical research. Fire Technology, 49(2):451–475, 2013.

[9] Seike M., Kawabata N., and Hasegawa M.: Experiments of evacuation speed in smoke-filled tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology, 53:61 – 67, 2016.

[10] Kinateder M., Pauli P., Mller M., Krieger J., Heimbecher F., Rnnau I., Bergerhausen U., Vollmann G., Vogt P., and Mhlberger A.: Human behaviour in severe tunnel accidents: Effects of information and behavioural training. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 17:20 – 32, 2013.

[11] Nilsson D., Johansson M., and Frantzich H.: Evacuation experiment in a road tunnel: A study of human behaviour and technical installations. Fire Safety Journal, 44(4):458 – 468, 2009.

[12] Seike M., Kawabata N., Hasegawa M., and Tanaka F.: Experimental Investigations about Visibility in a Fire Accident Using a Scale Model Tunnel. 2012.

[13] Fridolf K., Ronchi E., Nilsson D., and Frantzich H.: Movement speed and exit choice in smoke-filled rail tunnels. Fire Safety Journal, 59:8 – 21, 2013.

[14] Donald I. and Canter D.: Intentionality and fatality during the king's cross underground fire. European Journal of Social Psychology, 22(3):203–218, 1992.

[15] Voeltzel A., Dix A.: A comparative analysis of the Mont Blanc, Tauern and Gotthard tunnel fires, 2004

[16] Frantzich H. Utrymning av tunnelbanetg. experimentell utvrdering av mjligheten att utrymma i sprtunnel, 2000.

IMPROVED INCIDENT MANAGEMENT THROUGH A RESILIENT ORGANISATION

André Stein
Graduate Engineer in Civil Engineering
Tunnel Safety Officer in Luxembourg

The directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network achieves improved organization in the extended tunnel environment by definition of four independent organs (administrative authority, tunnel manager, tunnel safety officer, inspection entity) as well as better preparation for incidents in the tunnel through preventive incident management, consisting of the phases organizing, training, exercise, post-processing and adaptation of the organizational guidelines. Nonetheless, it is impossible to ensure that every incident in a tunnel is overcome optimally and without delay. Many years of experience, observations and extensive research in the disciplines of safety, organization, management and resilience research suggest that further progress is possible through proactive event management (PEM). PEM consists of a distinctly established safety culture, resilient organization and resilient technical tunnel concept. Optimized incident management (figure 1) can be achieved through the collaboration of the preventive incident management covered by the European directive and the new concept of the PEM.

Due to lack of time, I will deal in this article only with the subject "resilient organisation", one of the 3 parts of PEM.

MEJORA DE LA GESTIÓN DE INCIDENTES MEDIANTE UNA ORGANIZACIÓN RESILIENTE

La directiva 2004/54/CE sobre los requisitos mínimos de seguridad para los túneles de la red transeuropea de carreteras permite alcanzar mejoras organizativas en el ámbito de los túneles mediante la definición de cuatro organismos independientes (autoridad administrativa, gestor del túnel, responsable de la seguridad del túnel y organismo de inspección), así como una mejor preparación para los incidentes en el túnel mediante la gestión preventiva de incidentes, que consta de las fases de organización, formación, ejercicios, postproceso y adaptación de las directrices en las organizaciones. Sin embargo, es imposible asegurar que cada incidente en un túnel se resuelva de forma óptima y sin demora. Las observaciones y extensas investigaciones en las disciplinas de seguridad, organización, gestión e investigación de la resiliencia, acumuladas durante muchos años de experiencia, sugieren que es posible seguir avanzando mediante la gestión proactiva de eventos (PEM, del inglés Proactive Event Management). PEM se basa en una cultura de seguridad claramente establecida, una organización resiliente y un concepto de túnel resiliente desde el punto de vista técnico. La gestión optimizada de incidentes (Figura 1) puede lograrse mediante la colaboración de la gestión preventiva de incidentes contemplada en la directiva europea y el nuevo concepto de PEM.

Por falta de tiempo, en este artículo sólo trataré el tema de la "organización resiliente", una de las 3 partes de la PEM.

AMELIORATION DE LA GESTION D'INCIDENTS GRACE A UNE ORGANISATION RESILIENTE

La directive 2004/54/CE concernant les exigences de sécurité minimales applicables aux tunnels du réseau routier transeuropéen permet d'obtenir des améliorations organisationnelles dans le domaine des tunnels grâce à la définition de quatre organismes indépendants (autorité administrative, gestionnaire du tunnel, agent de sécurité du tunnel et entité de contrôle), ainsi qu'une meilleure préparation aux incidents dans le tunnel grâce à la gestion préventive des incidents, qui comprend les phases d'organisation, de formation, d'exercices, de post-traitement et d'adaptation des directives dans les organisations. Cependant, il est impossible de garantir que chaque incident dans un tunnel sera résolu de manière optimale et sans retard. Les observations et les recherches approfondies dans les disciplines de la sécurité, de l'organisation, de la gestion et de la recherche sur la résilience, accumulées au cours de nombreuses années d'expérience, suggèrent qu'il est possible de continuer à avancer grâce à la gestion proactive des événements (PEM, de l'anglais Proactive Event Management). La PEM se base sur une culture de la sécurité clairement établie, une organisation résiliente et un concept de tunnel résilient du point de vue technique. La gestion optimisée d'incidents (Figure 1) peut être obtenue par la collaboration de la gestion préventive d'incidents prise en compte dans la directive européenne et du nouveau concept de PEM.

Pour des raisons de manque de temps, dans cet article je n'aborderai que le sujet de « l'organisation résiliente », l'une des 3 parties de la PEM.

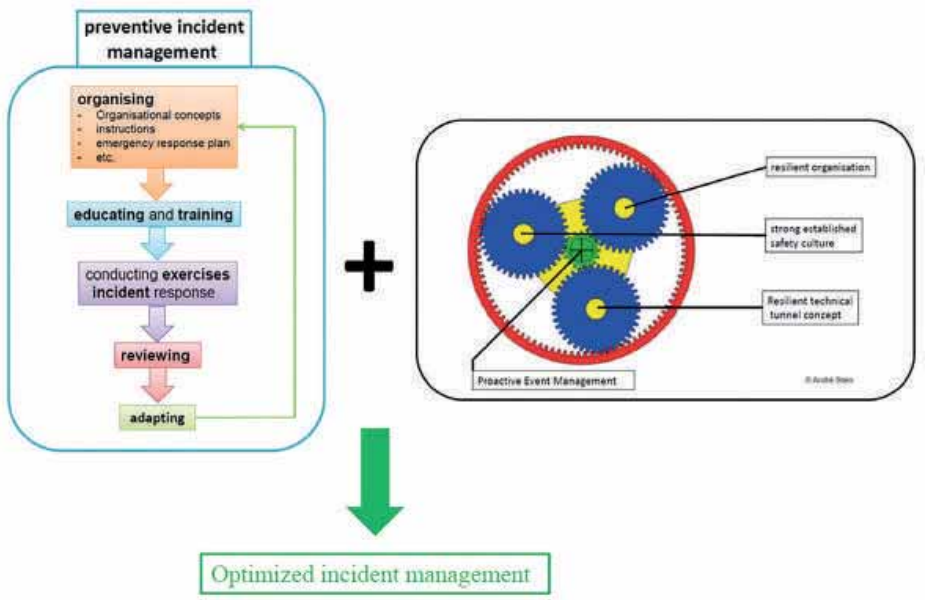


Figure 1.

1. INTRODUCTION

While I was on a sojourn in Brussels in late 2001 at the invitation of the EU Commission to take part in the preparations for the future directive on tunnel safety, it was clear to everyone involved that it was imperative to position ourselves better as organisations, especially with respect to the preparation of emergency services. At that time, we spoke about preventive incident management (Figure 2), consisting of organising (instructions, alarm and emergency response plan, etc.), educating and training, conducting exercises (together with the emergency services), reviewing (training exercises and real incidents) and adapting (the organisational aspects).

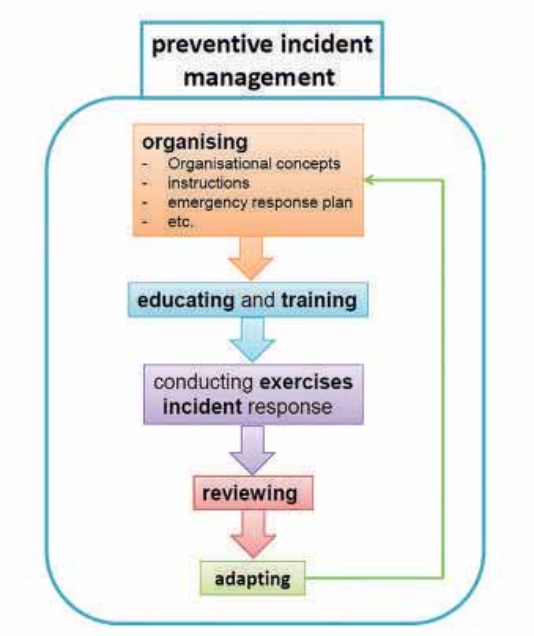


Figure 2.

For years, I was convinced that this would lead sooner or later to a certain success, meaning that every incident could be handled optimally, thus achieving flawless incident management as a result. Twenty years later, following numerous large-scale exercises and real incidents in tunnels, I am no longer convinced of this.

It happens to be in the nature of incidents in tunnels that they never follow the "script" of an alarm and emergency response plan. Experience teaches us that an incident which is difficult to manage occurs as a result of a combination of several unforeseeable events, each one being non-critical when regarded in isolation, but having catastrophic effects when combined.

It should also be noted that we have neglected the human dimension of incident management too much up to now. The members of the emergency services team do not usually know the tunnel well enough, are often not familiar enough with the operational concepts and all too often conduct themselves in a suboptimal manner; in other words, they lose a lot of time through hesitation, reluctance to take responsibility and/or a lack of self-efficacy or acceptance of the situation and flexibility.

In light of the observations above, I have adopted a new approach, which I will call "**P**roactive **E**vent **M**anagement" or PEM. In the process, optimised incident management can only be achieved by the combined effects of "preventive incident management" covered by the European directive 2004/54/EC (on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network) and the new concept of "**Proactive Event Management" (PEM).**

PEM (figure 3) consists of the following sub-aspects:

- a highly developed, consolidated safety culture,
- a resilient organisation,
- a resilient (technical) tunnel concept.

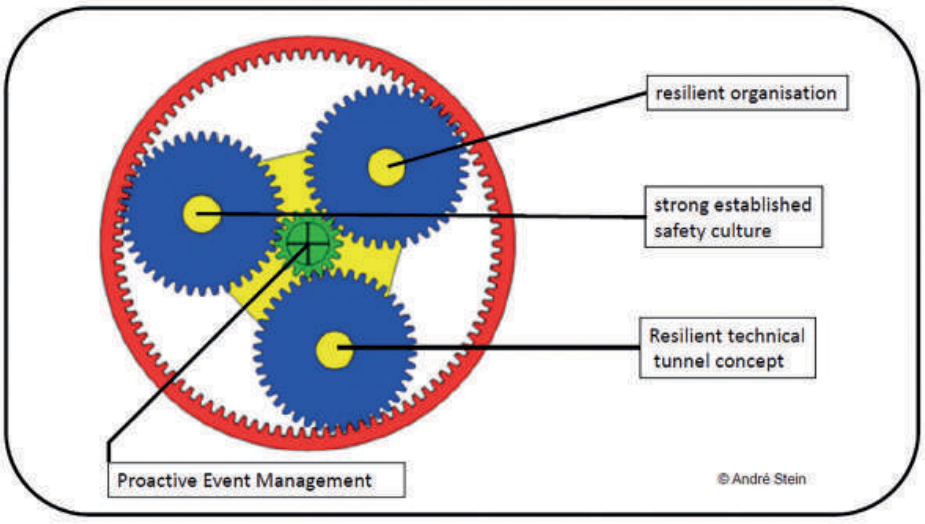


Figure 3.

Due to lack of time, I will deal in this article only with the subject "resilient organisation", one of the 3 parts of PEM.

2. THE RESILIENT ORGANISATION

The unpredictability, diversity and complexity of critical situations in tunnels and the crucial impact that the time sequence has on their consequences require emergency services to be organised resiliently.

An organisation is only resilient when it demonstrates a systemic resistance to disruptions and changes in its environment. Such an organisation is characterised by a high degree of self-regulation and remains capable of acting even in adverse circumstances, i.e. it retains the ability to operate in accordance with its purpose. This is certainly also facilitated by preparatory planning as well as educating and training employees, but above all, by having recourse to the personal and social skills of its employees at all levels of the hierarchy.

A resilient system can cope with changes in its environment and adapt to the circumstances and conditions. It is highly disruption-tolerant, so to speak.

The resilience of an organisation (Figure 4) is based on the concepts of **robustness**, **agility** and i**ntersubjectivity.**

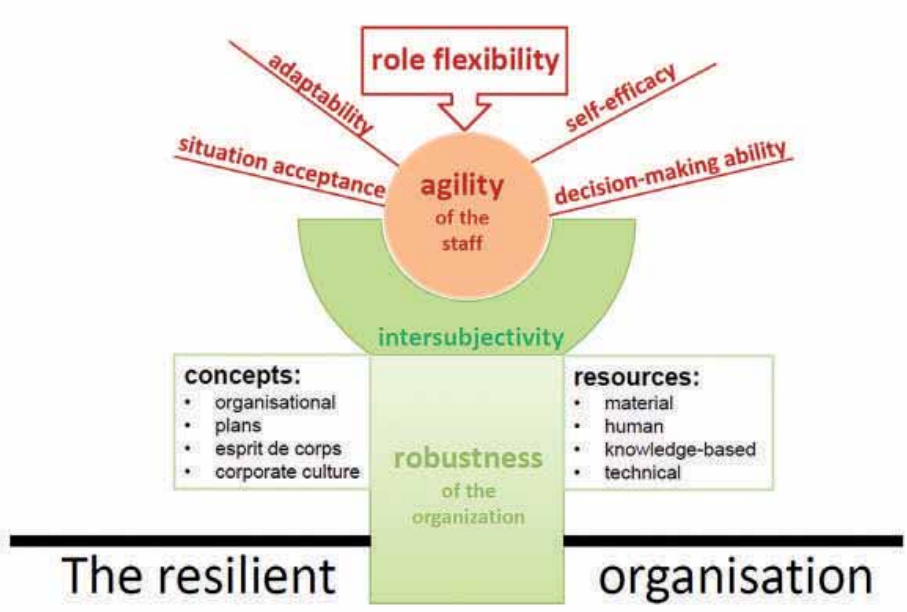


Figure 4.

"**Robustness**" is the proactive form of resilience. A robust organisation possesses the necessary resources (material, human, knowledge-based and technical) and concepts (organisational structure, plans, esprit de corps and corporate culture) to be able to react promptly. Forward-looking planning and competent, adaptable employees make it possible to meet the organisational goals when disruptions and problems arise. Ultimately, in order to remain capable of acting in difficult situations and react appropriately in such situations, a generally positive assessment of the situation within an organisation is indispensable. Every single employee within an organisation must be convinced that the resources, skills, expertise and practical experience that were acquired during comparable crises in the past will be sufficient to cope with each and every situation. In a nutshell, there is an esprit de corps and a sense of "we can do it".

"Agility" is the reactive form of resilience, often also called "vitality". Disaster response demands measures that can stabilise the situation as quickly as possible. The members of the emergency services team need space for creative solutions and thinking "outside the box". For many people, innovative improvisation is certainly a surprising but necessary counterbalance to the highly structured alarm and emergency response plan.

Agile organisations work iteratively and incrementally and make constant progress through "small steps", which are taken quickly as the situation dictates and are not necessarily contained in a manual. Freedom to make decisions and act are central to the desired innovative improvisation and are based on an open corporate culture, where creative solutions are fostered with positive encouragement and error tolerance is routine.

When major problems need to be addressed, the employees must strive for quick results and make incremental improvements. To achieve this requires acceptance of the situation, rapid adaptation to a changed environment, early detection of problems that arise and prompt implementation of countermeasures, if necessary.

Another key feature of resilient organisations is harmonious interaction between employees who shared and taken-for-granted background assumptions. In social science this refer to the expression "**Intersubjectivity**".

This intersubjectivity has to be concept inherent, meaning that there is unity within the organisation, at all levels of the hierarchy and in every team, with regard to how to assess, classify, perceive and manage a situation (such as a tunnel fire). There is intersubjectivity between people if they agree on a given set of meanings or a definition of the situation.

The creation of a resilient organisation is first and foremost a task for the strategic management level, since it requires a clear top-down approach. A company's trust in its own staff and leadership is the lynchpin of successful implementation within that company, since the fundamental prerequisite for an agile organisation is the partial transfer of responsibility away from management towards the team. It is only by decentralising responsibility that agile organisations attain the required stability and ability to act.

Creating a resilient organisation of tunnel operation requires a holistic concept with the aim of minimising the effects of a wide range of disruptions on the regular process of incident management. A considerable commitment on the part of managers and a coherent approach to targeted staff development are necessary to "leverage" non-knowledge-based human resources. Transactional leadership, error tolerance and the creation of trust between the employees and management tiers are here core elements of management skills.

The objective is to have employees who have a high level of self-efficacy and are therefore capable of making decisions, to accept challenges and assume responsibility.

In an ideal scenario, this is how we achieve **"role flexibility**", a concept which contradicts the narrowly defined organisational structures. Karl Weick, Professor of Organisational Behaviour and Psychology at the University of Michigan, also speaks of "virtual role systems" in this context and refers to role theory (social behaviour and role expectation). He emphasises that it is necessary for every member of an incident response team to be at least mentally capable of taking on any role within that group. That is the only way to ensure that a vacuum is not created in the organisation when there is an acute need for action. This self-regulation is also decisive for the self-care of every member of an incident response team, not least in the event of a disaster.

If role flexibility can be developed successfully amongst the staff, then the goal of the resilient organisation is not so far off.

However, it must be mentioned in conclusion that emergency service employees must be empowered to assess and accept a situation devoid of emotion in order to be able to manage disasters effectively. Good and effective training and education, practical experience, esprit de corps and camaraderie within the team are milestones along the way to achieving this goal.

In summary, it can be said that **resilient organisations** are nothing other than **groups of resilient individuals inspired by *esprit de corps***. The management, organisational and safety culture in a company determines whether organisational resilience can be achieved.

COORDINACIÓN DE ACTUACIONES SANITARIAS EN TÚNELES INTERNACIONALES DE GRAN LONGITUD. EL CASO DEL TÚNEL DE SOMPORT

Diego Lagunas Pardos[1]
Noelia Soria Villanueva[1]
Marta García Luengo[1]
Miguel Ángel Clavero Forcén[2]
Antoine Ruiz[3]
Emilio Leo Ferrando[4]

[1] *061 Aragón*
[2] *Servicio de Seguridad y Protección Civil Gobierno de Aragón*
[3] *Servicio de Bomberos de Pirineos Atlánticos, Francia*
[4] *Protección Civil Subdelegación del Gobierno en Huesca*

Los túneles de gran longitud presentan características particulares en las intervenciones para todos los servicios de emergencia. En el caso de los sanitarios, además de la singularidad de las patologías, es preciso establecer la organización para la atención a las víctimas, ruedas de ambulancias, lugares de triage y ubicación del Puesto Sanitario Avanzado. Si además el túnel es internacional e intervienen servicios sanitarios de países diferentes es imprescindible tener previamente determinada la organización del mando y el mecanismo de traslado de responsabilidades de un país a otro, si es necesario.

Esta situación se da en el túnel de Somport en la que con independencia del país, España o Francia, en el que se produce el accidente, la asistencia sanitaria se presta conforme se van incorporando los medios, realizando cambios de mando en función de la disponibilidad. Este método de trabajo requiere una importante tarea previa de planificación a cargo de los sanitarios de ambos países, formación específica para los actuantes y práctica en el trabajo conjunto para poder integrar en un único dispositivo de respuesta las diferentes prácticas profesionales y organizativas de cada país.

La experiencia indica la necesidad de tener dispuestos y ensayados planes operativos que contemplen la movilización de medios, la organización del mando, la distribución de funciones, la coordinación con otros servicios de emergencia (protección civil, policía, bomberos, asistencia psicosocial, …) y la posible ubicación de Puestos Sanitarios Avanzados.

COORDINATION OF HEALTH ACTIONS IN LONG INTERNATIONAL TUNNELS. THE CASE OF THE SOMPORT TUNNEL

Long tunnels present particular characteristics in the interventions for all emergency services. In the case of the health services, in addition to the singularity of the pathologies, it is necessary to establish the organisation for the care of victims, ambulance wheels, triage sites and the location of the Advanced Health Post. If the tunnel is also international and health services from different countries are involved, it is essential to have previously determined the organisation of the command and the mechanism for transferring responsibilities from one country to another, if necessary.

This is the situation in the Somport tunnel where, regardless of the country, Spain or France, in which the accident occurs, health care is provided as resources are incorporated, with changes of command depending on availability. This method of working requires considerable prior planning by the medical staff of both countries, specific training for those involved and practice in working together to be able to integrate the different professional and organisational practices of each country into a single response mechanism.

Experience indicates the need to have operational plans ready and tested that include the mobilisation of resources, the organisation of the command, the distribution of functions, coordination with other emergency services (civil protection, police, fire brigade, psychosocial assistance, etc.) and the possible location of Advanced Health Posts.

LA COORDINATION DES ACTIONS SANITAIRES DANS LES LONGS TUNNELS INTERNATIONAUX. L'AFFAIRE DU TUNNEL DU SOMPORT

Les tunnels longs ont des caractéristiques particulières dans les interventions pour tous les services de secours. Dans le cas des agents de santé, outre la singularité des pathologies, il faut établir l'organisation de la prise en charge des victimes, les roues d'ambulance, les lieux de triage et l'emplacement du Poste Médical Avancé. Si, en plus, le tunnel est international et que des services de santé de différents pays sont impliqués, il est indispensable d'avoir préalablement déterminé l'organisation du commandement et le mécanisme de transfert des responsabilités d'un pays à l'autre, si nécessaire.

Cette situation se produit dans le tunnel du Somport dans lequel quel que soit le pays, Espagne ou France, dans lequel l'accident se produit, les soins de santé sont assurés au fur et à mesure que les moyens sont incorporés, en effectuant des changements de commandement en fonction des disponibilités. Cette méthode de travail nécessite un important travail de planification préalable de la part des professionnels de santé des deux pays, une formation spécifique des intervenants et une pratique du travail en commun pour pouvoir intégrer les différentes pratiques professionnelles et organisationnelles de chaque pays dans un dispositif d'intervention unique.

L'expérience montre la nécessité d'avoir préparé et répété des plans opérationnels qui comprennent la mobilisation des moyens, l'organisation du commandement, la répartition des fonctions, la coordination avec les autres services d'urgence (protection civile, police, pompiers, assistance psychosociale, ...) et la emplacement possible des postes de santé avancés.

1. INTRODUCCIÓN. LAS EMERGENCIAS EN TÚNELES INTERNACIONALES DESDE EL PUNTO DE VISTA SANITARIO. EL TÚNEL DE SOMPORT.

Los túneles de gran longitud presentan características particulares en las intervenciones para todos los servicios de emergencia. En el caso de los sanitarios, además de la singularidad de las patologías, es preciso establecer la organización para la atención a las víctimas puesto que va a ser prácticamente imposible o muy difícil atender a las víctimas en el mismo lugar del incidente. Por definición un túnel es un entorno hostil, peligroso y no seguro para los sanitarios, hasta que los especialistas indiquen que estamos en zona segura.

Por todo ello hay que pensar y planificar una serie de características típicas de los entornos hostiles e Incidentes de Múltiples Víctimas (IMV):

- Triage/Triaje
- Rescate
- Nido de Heridos
- Norias de evacuación
- Triage/Triage Avanzado
- Puesto Sanitario Avanzado
- Norias de Traslado a centro útil

Las patologías que con más frecuencia se pueden dar en estas situaciones, son las traumáticas debido a colisiones dentro del túnel o respiratorias debido a la inhalación de humos que son difíciles de evacuar en túneles de este tamaño. En algún caso extremo se podría dar irritación de piel y mucosas en el caso de dispersión y contacto con mercancías peligrosas, si estas se extravasaran debido al accidente.

Hablamos de una actuación en donde los sanitarios no nos encontramos en nuestro ecosistema habitual, y debemos aprovechar al máximo las capacidades que el entorno nos facilita. Los profesionales que trabajamos en emergencias, en general, solemos tener buena capacidad de aprovechamiento del entorno, de adaptabilidad e improvisación. Pero la mejor improvisación debe ir siempre acompañada de entrenamiento y práctica para evitar las dudas y que todo salga bien es la que se entrena y practica, hasta que ya no sale mal.

La mayoría de estos escenarios se pueden solucionar con las propias instalaciones que posee el túnel, no obstante para alcanzar la mejor solución es necesaria una buena coordinación y comunicación entre los diferentes servicios de emergencias, y por supuesto entre los dos países que une el túnel. Y no olvidemos que son 2 países que hablan distintos idiomas, no solo dialéctico, sino "sanitario" e incluso distintas maneras de entender las emergencias en general. Para que ello se realice de forma fluida y sin dudas, son necesarias muchas horas de trabajo conjunto a lo largo de los años. Un sistema de trabajo conjunto que ya no depende de las personas, sino que ha sido interiorizado por los propios servicios de emergencias de ambos países.

El túnel del Somport es un túnel de 8.608 metros de los cuales 5.759 son en territorio español y los 2.849 restantes son en territorio francés. El túnel, es un túnel binacional que une España con Francia a través del macizo pirenaico en su parte central. Este túnel se encuentra en la frontera pirenaica entre España y Francia, en la provincia de Huesca, cerca de la histórica estación de ferrocarril de Canfranc (de gran importancia durante la segunda guerra mundial). Es una zona de baja densidad poblacional la mayor parte del año (salvo los meses de invierno y verano debido a la afluencia de turistas), por lo que los recursos sanitarios son escasos y están a cierta distancia del túnel. Los hospitales más cercanos se encuentran: Jaca a 30 km de la Boca España, y Oloron-Sainte-Marie a 57 km y más de una hora de la Boca Francia..

En la parte española está situado en el valle del Aragón y el pueblo más cercano a la boca española es Canfranc-Estación, por la vertiente francesa tenemos la localidad francesa de Urdos, en el valle del Aspe.

En la entrada de la boca española se encuentra el Centro de Control del túnel. Es la parte administrativa y de control de todos los sistemas de seguridad del propio túnel. En la boca francesa hay un pequeño edificio que permite actividades de vigilancia y control. También dispone de una nave en dónde se encuentra un camión de intervención específico para túneles (Titan) que está especialmente preparado para actuar en unas condiciones de falta de luz, gran cantidad de humo, etc.) En boca española se dispone de otro vehículo de iguales características. Cada uno de ellos está atendido 24/365 por tres agentes de explotación formados específicamente para dar la primera respuesta a una emergencia hasta la llegada de los servicios de emergencia exterior de España y Francia.

Pero además el túnel dispone de 19 refugios a lo largo del túnel (13 en España y 6 en Francia) que comunica con un túnel paralelo (túnel ferroviario) y se utilizan como vías de evacuación. Los refugios disponen de bancos, un arcón con material y comunicaciones con el Centro de Control del túnel. Disponen de puertas anti incendios y ventilación propia. Lo que en caso de necesidad permite utilizarlos como nido de heridos y/o Puesto Sanitario Avanzado seguros puesto que a sus características estructurales y dotación de materiales, se le une el hecho de que disponen de una vía de escape conectada al exterior a través de su conexión con el antiguo túnel ferroviario, lo suficientemente amplia para permitir el acceso de ambulancias.

En el túnel del Somport, al ser un túnel internacional e intervenir servicios sanitarios de países diferentes se dan todas estas circunstancias comentadas anteriormente, por ello es imprescindible tener previamente determinada la organización del mando y el mecanismo de traslado de responsabilidades de un país a otro, si fuera necesario. En cualquier intervención, pero más en estas de las que estamos hablando, es fundamental conocer quién es el responsable último, y por lo tanto quien ostenta el mando, ya que sin mando no hay organización.

Por ello todos los años se realizan varias reuniones entre los diferentes grupos operativos y gremios para poder llegar a acuerdos antes de que se produzca la situación en sí y luego se practica en los simulacros y ejercicios de mesa que se realizan a lo largo del año. Y esta es la base del trabajo conjunto que guía todas actuaciones, no se toman decisiones unilaterales, sino que todo se lleva a reuniones de trabajo y cuenta con el visto bueno de ambos sistemas sanitarios. Obviamente de estas reuniones se levantan actas para que todo quede por escrito y pueda incorporarse a la documentación oficial.

GOBIERNO DE ESPAÑA

PSB TÚNEL DE SOMPORT

GRUPO DE TRABAJO SANITARIO

RESUMEN REUNIÓN 29/04/2014

Asistentes:

Pierre	: *Prefectura Pirineos Atlánticos. Pau. Secretario francés CTS*
Laurence	: *Prefectura Pirineos Atlánticos. Pau*
Paulet	: SDIS64
Jean François	: SDIS64
Antoine	: SDIS64
Bruce	: SAMU 64B
Nicolas	: SAMU 64B
Emilio	: Subdelegación Gobierno Huesca. Secretario español CTS
José Martín	: Subdelegación Gobierno Huesca
Roberto	: 061 Aragón
Juan José	: 061 Aragón

La reunión fue coordinada por los secretarios de la Comisión Técnica de Seguimiento (CTS) del Plan Binacional del túnel de Somport (PSB).

Antes de la finalización se ausentaron el SSSM y el GGDR de los bomberos del SDIS64.

Se recuerda a los servicios sanitarios (SAMU y 061 Aragón) el acuerdo tomado en la 18ª reunión del la Comisión Intergubernamental del Túnel de Somport celebrada el 10 de diciembre de 2013 por el que se *"supiese que los servicios sanitarios reflexionen sobre el modus operandi de ambos países, del mismo modo que lo hicieron los servicios de socorro públicos, para que cada uno conozca los procedimientos del otro"*, así como los acuerdos de la Comisión Técnica de Seguimiento del Plan Binacional del túnel de Somport sobre la necesidad de establecer un sistema de reuniones periódicas del grupo sanitario para conocerse y profundizar en el sistema de trabajo de cada país con el objetivo final de trabajar de forma conjunta en los accidentes que se produzcan en el túnel de Somport.

Organización:
Se propone que la función de Dirección de los Servicios Médicos (DSM), como la de Director del Plan (DOS) y Jefe de Operaciones (COS), debe estar basada en la territorialidad.

El DSM territorialmente competente debería desempeñar esta función.

El primer DSM será el primer médico en llegar al lugar del incidente. Después deberá efectuarse una transferencia de mando, aunque pueden darse casos especiales.

El balance de las evacuaciones a los hospitales lo proporcionará el DSM al Jefe de Operaciones (COS). Esta cuestión se realizará en el Puesto de Mando Estratégico, ya que es en este nivel donde la información sea necesaria.

El Jefe del SAMU propondrá un borrador de intercambio de mando a su homólogo español. Esta tarea deberá finalizarse antes de finales de julio para probarlo en el simulacro de 2014 e incorporarlo como anejo al PSB del túnel de Somport. En la planificación del simulacro de 2014, por convención, la llegada del primer médico francés será al menos 30 minutos después de la llegada del primer médico español.

Medios:
El 061 entrega al SAMU un documento con los medios de que se dispone en Aragón.

El SAMU de Pau explica al 061 Aragón los medios de los que dispone.

Los medios de salida para una situación "comprometida" serían:
SAMU: SMUR Oloron Sainte Marie + SMUR Pau
061: Médico familia Canfranc + UME Jaca + UME Sabiñánigo (UME o UVI = SMUR)

En Francia existe una planificación específica para accidentes con múltiples víctimas llamada "ORSEC-NOVI".

Vocabulario:
Se ha validado por el SAMU y el 061 la terminología utilizada por los bomberos (Túnel, España y Francia) para el triage.
Se ha intercambiado información sobre el vocabulario utilizado por SAMU y 061 Aragón.

Conocimiento mutuo:
Se constata el intercambio de información entre los servicios sanitarios y la posibilidad de realizar visitas a ambos países.

Huesca, 30 de abril de 2014

2. LA INTERVENCIÓN SANITARIA.

Por ello una de las primeras acciones a decidir, o más bien la primera, es saber quién estará al mando. Para ello se ha establecido de manera conjunta que el responsable de la primera unidad en llegar asumirá el mando inicialmente, obviamente, y cuando ya han llegado al lugar responsables de ambos países, se decide quién llevará el mando dependiendo de en qué parte del túnel (Española-Francesa) afecta más o hay mayor necesidad de intervención. Aunque por términos generales se tiende a respetar el principio de territorialidad.

Si el primer responsable que ha llegado, no va a ser el responsable final, pasará el mando a su compañero u homólogo del otro país. Para ello se vienen realizando varios ejercicios de cambio de mando, para que todo esté practicado y no sea en el momento de estrés de un accidente real en donde haya que hacerlo por primera vez. También disponemos, tanto en el túnel, como en el Plan de Socorro Binacional una guía, en ambos idiomas, en donde se detalle este proceso de intercambio de mandos, poniendo los 4 supuestos que se puedan dar, y que resulte más fácil todo este proceso.

Hay 4 casos posibles según el lugar del accidente y el orden de llegada de las ayudas exteriores.

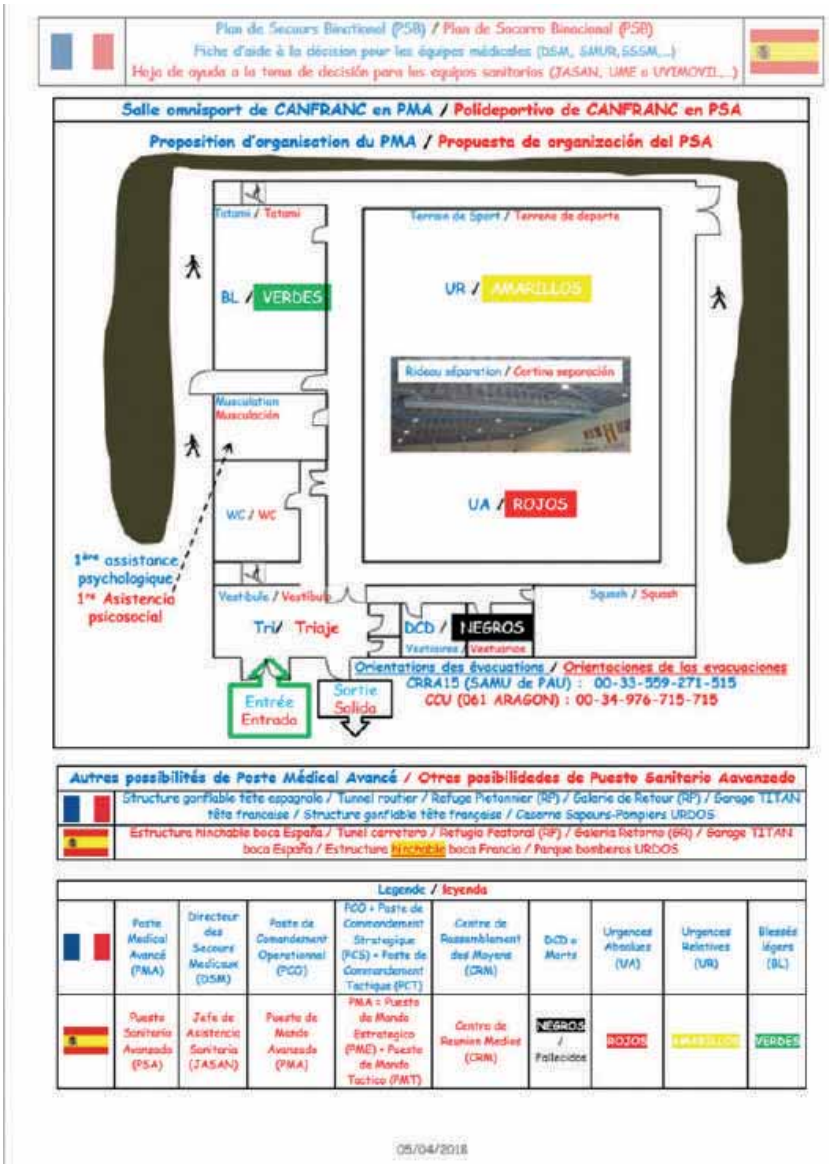
1. El caso en el que el incidente tenga lugar en el territorio francés y las ayudas públicas del Servicio de Asistencia Médica Urgente francés (SAMU) lleguen antes que las ayudas públicas del servicio de emergencias sanitario español (061 ó 061 Aragón).
2. El caso en el que el incidente tenga lugar en el territorio francés y las ayudas públicas del SAMU lleguen después que las ayudas públicas del 061.
3. El caso en el que el incidente tenga lugar en el territorio español y las ayudas públicas del SAMU lleguen antes que las ayudas públicas del 061.
4. El caso en el que el incidente tenga lugar en el territorio español y las ayudas públicas del SAMU lleguen después que las ayudas públicas del 061.

Otro punto crítico en las actuaciones sanitarias sería el Puesto Sanitario Avanzado (PSA) ya que sería el último gran punto de intervención, más o menos cercano y dependiente en cierta medida, del túnel. Desde ahí, el traslado debería ser ya directamente al centro útil. Por ello se han realizado varias reuniones para decidir la mejor ubicación del Puesto Sanitario Avanzado en caso de que las propias instalaciones no fueran suficiente por el número de víctimas. El PSA es, más que un lugar, un concepto en sí mismo. Por lo que la decisión de donde debe instalarse no se debería dejar a la inercia de la intervención. El lugar donde debe ubicarse tiene que reunir una serie de características que deben ser conocidas por todos los cuerpos de intervención. Es por ellos que la decisión se debe tomar en el Puesto de Mando, y ser validada a su vez tanto por el Jefe de Asistencia Sanitaria (JASAN) como por el Director de Operaciones

Y aunque para constituirlo se pueden emplear instalaciones del túnel como refugios, o estructuras movibles de los sistemas de emergencias de ambos países, lo que también se ha planificado, diseñado y ejercitado es recurrir a una instalación externa pero anexa al túnel como es el polideportivo de Canfranc. Su diseño se ha trabajado sobre plano, y en varios simulacros anuales, con sanitarios de ambos países, ya que contaba con la posibilidad de sectorizar zonas de atención para los heridos de diversa gravedad, así como salas de contención de ilesos, y la organización en uno de sus vestuarios de una pequeña morgue si fuera necesaria.

Por definición este lugar, aunque ubicado como hemos comentado anteriormente en la pequeña localidad española de Canfranc Estación, queda a disposición de quien tome el mando de ambos países, a través del Plan de Socorro Binacional (PSB, que contempla las intervenciones de las autoridades y servicios de emergencia de ambos países) y hace la función de salvaguarda. Ya que si en una intervención no se encuentra otro lugar mejor para la ubicación del PSA siempre se puede recurrir al Polideportivo, que está ya previamente trabajado y diseñado para albergar un número muy amplio de víctimas.

Un factor importante a la hora de escoger la ubicación del PSA es la meteorología existente en la zona, con bajas temperaturas e importantes nevadas.



Esta situación se da en el túnel de Somport en la que con independencia del país, España o Francia, en el que se produce el accidente, la asistencia sanitaria se presta conforme se van incorporando los medios, realizando cambios de mando en función de la disponibilidad. Este método de trabajo requiere una importante tarea previa de planificación a cargo de los sanitarios de ambos países, formación específica para los actuantes y práctica en el trabajo conjunto para poder integrar en un único dispositivo de respuesta las diferentes prácticas profesionales y organizativas de cada país.

Para ello se han elaborado unas fichas para que todo el personal sepa cómo trabajar en todo momento. La experiencia nos indica la necesidad de tener dispuestos y ensayados planes operativos que contemplen la movilización de medios, la organización del mando, la distribución de funciones, la coordinación con otros servicios de emergencia (protección civil, policía, bomberos, asistencia psicosocial, …) y la posible ubicación de Puestos Sanitarios Avanzados.

Cuando se produce una emergencia sanitaria en el túnel se movilizan recursos tanto de Francia como de España.

Los recursos sanitarios españoles que atienden inicialmente la emergencia son:

- Médico de Atención Primaria de Canfranc Estación en horario 15-9h
- Ambulancias de Servicio Vital Avanzado (SVA) de Jaca y de Servicio Vital Básico (SVB) con una isocrona de 22´
- SVA de Sabiñanigo (32´) de Jaca y en época de mayor afluencia en la zona hay un refuerzo estacional con una ambulancia convencional (AC) de Canfranc (15´).
- Helicóptero 112 Aragón

Los recursos sanitarios franceses son:

- Bomberos SDIS64 con ambulancias y sanitarios que hacen la primera intervención en emergencia, el transporte de heridos y la asistencia logística para el PSA
- Servicio Médico Urgente del hospital de Oloron Sainte-Marie (SMUR OSM) que desplaza los médicos de urgencias y SMUR del Hospital de Pau.
- Si el accidente es en Francia se envía un médico para que sea JASAN/DSM (Director de Servicios Médicos en francés)
- Helicóptero Dragón64 Protección Civil francesa

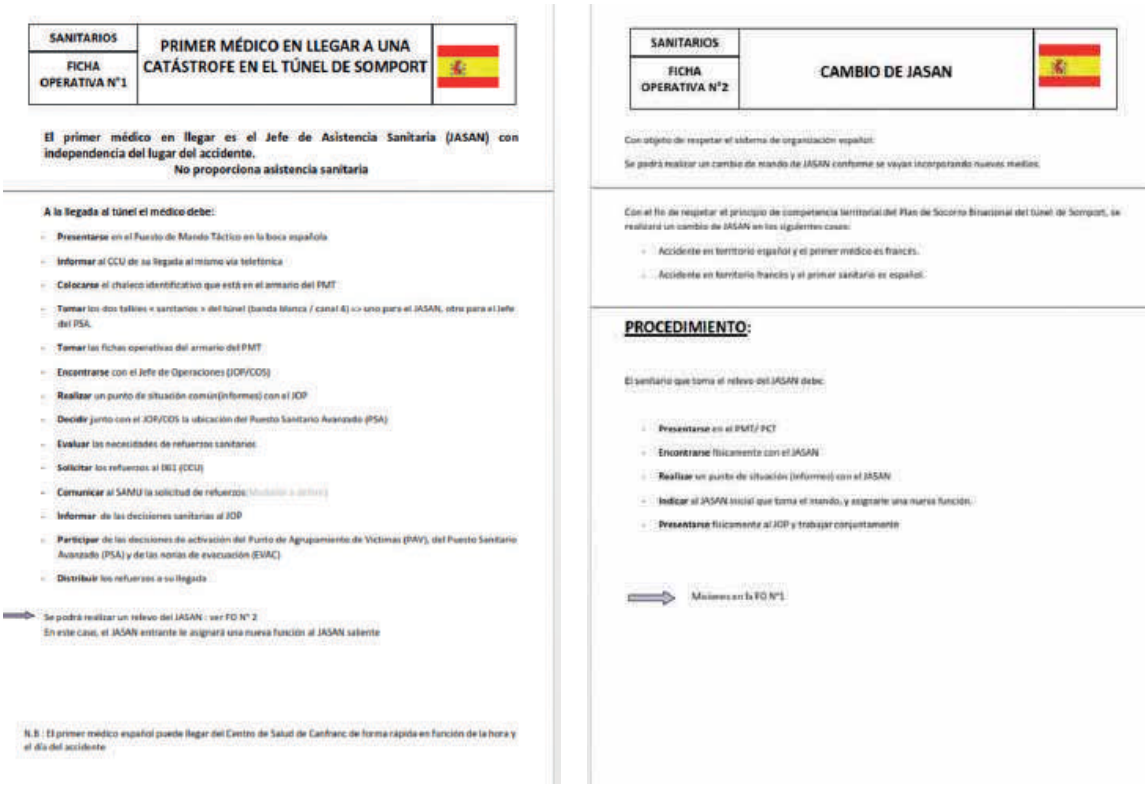
Son estos recursos sanitarios, más quizá algunos derivados de zonas limítrofes adyacentes en caso necesario, los que se van a hacer cargo de la asistencia sanitaria en caso de accidente en el túnel. Son los recursos operativos de la zona (comarcales, regionales y autonómicos) los que asumen la asistencia, no los servicios centrales de ambos países (los ubicados en Madrid o París). Los pacientes que necesiten ser trasladados lo serán a los hospitales que sean útiles en función de su patología (lo que en argot sanitario se llama "traslado a centro útil"), no necesariamente al hospital más cercano u "hospital de referencia". Esto ocasiona que algunos deban ser trasladados a hospitales que se encuentran a mayor distancia, para lo cual puede ser necesario movilizar ambulancias y helicópteros sanitarios habitualmente no ubicados en la zona del túnel.

El primer recurso avanzado que llega acude al Centro de Control y asume el mando sanitario, presentándose al Director de Operaciones, y colabora con el resto de organismos (Bomberos, Guardia Civil, Protección Civil). Una vez allí le explican la situación actual (nº de personal afectadas aproximadas, localización exacta del incidente y todo aquello que pueda afectar a la asistencia (humo, gases, riesgos para los intervinientes…)

Con ello, siguiendo la operativa española, si la zona es segura y tiene la autorización del jefe de Operaciones, se le da 1 "walkie talkie" del túnel al enfermero del SVA (UVI Móvil) y se dirige al interior del túnel para realizar y/o continuar el triage básico. Por otro lado el médico permanece en el Centro de Control con otro "walkie talkie" para estar informado de todo lo que va aconteciendo en el túnel con información de primera mano. Estos equipos de radio proporcionados por el túnel permiten asegurar las comunicaciones con el Centro de Control, independientemente de los medios que aporten las emergencias sanitarias, ya que la comunicación vía móvil es imposible dentro del túnel.

Si el incidente es en España, como hemos comentado anteriormente el mando de la intervención lo asumirá España, por lo que el médico, convertido en Jefe de Asistencia SANitaria (JASAN) por la activación de distintos planes de emergencias, tendrá que ir tomando una serie de decisiones; cómo dónde hacer el nido de heridos, dónde montar el PSA (Puesto Sanitario Avanzado), dónde y cómo evacuar a los paciente y solicitará los recursos sanitarios necesarios acorde las necesidades y disponibilidad de los mismos en colaboración con su igual francés.

Si el incidente es en Francia el mando lo asumirá Francia, y debido a que los recursos españoles están más cerca, suele ser necesario en este caso hacer un cambio de mando del médico español al francés, para ello y por evitar complicaciones por la barrera idiomática se hicieron varias reuniones para explicar cómo debe hacerse y se crearon fichas para tal hecho que están en ambos idiomas, en las que se recoge toda la información que se va recabando que también está en ambos idiomas para facilitar tanto la transición de los mandos como el avance de la emergencia.



SANITARIOS
FICHA OPERATIVA N°1

PRIMER MÉDICO EN LLEGAR A UNA CATÁSTROFE EN EL TÚNEL DE SOMPORT

El primer médico en llegar es el Jefe de Asistencia Sanitaria (JASAN) con independencia del lugar del accidente.
No proporciona asistencia sanitaria

A la llegada al túnel el médico debe:

- **Presentarse** en el Puesto de Mando Táctico en la boca española
- **Informar** al CCU de su llegada al mismo vía telefónica
- **Colocarse** el chaleco identificativo que está en el armario del PMT
- **Tomar** los dos talkies « sanitarios » del túnel (banda blanca / canal 4) => uno para el JASAN, otro para el Jefe del PSA.
- **Tomar** las fichas operativas del armario del PMT
- **Encontrarse** con el Jefe de Operaciones (JOP/COS)
- **Realizar** un punto de situación común(informes) con el JOP
- **Decidir** junto con el JOP/COS la ubicación del Puesto Sanitario Avanzado (PSA)
- **Evaluar** las necesidades de refuerzos sanitarios
- **Solicitar** los refuerzos al 061 (CCU)
- **Comunicar** al SAMU la solicitud de refuerzos
- **Informar** de las decisiones sanitarias al JOP
- **Participar** de las decisiones de activación del Punto de Agrupamiento de Víctimas (PAV), del Puesto Sanitario Avanzado (PSA) y de las rutas de evacuación (EVAC)
- **Distribuir** los refuerzos a su llegada

Se podrá realizar un relevo del JASAN : ver FO N° 2
En este caso, el JASAN entrante le asignará una nueva función al JASAN saliente

N.B : El primer médico español puede llegar del Centro de Salud de Canfranc de forma rápida en función de la hora y el día del accidente

SANITARIOS
FICHA OPERATIVA N°2

CAMBIO DE JASAN

Con objeto de respetar el sistema de organización español:

Se podrá realizar un cambio de mando de JASAN conforme se vayan incorporando nuevos medios.

Con el fin de respetar el principio de competencia territorial del Plan de Socorro Binacional del túnel de Somport, se realizará un cambio de JASAN en los siguientes casos:

- Accidente en territorio español y el primer médico es francés.
- Accidente en territorio francés y el primer sanitario es español.

PROCEDIMIENTO:

El sanitario que toma el relevo del JASAN debe:

- **Presentarse** en el PMT/ PCT
- **Encontrarse** físicamente con el JASAN
- **Realizar** un punto de situación (informes) con el JASAN
- **Indicar** al JASAN inicial que toma el mando, y asignarle una nueva función.
- **Presentarse** físicamente al JOP y trabajar conjuntamente

Mismos en la FO N°1

El segundo SVA en llegar, asumirá las funciones de Jefe de PSA (médico) y Jefe de triaje PSA (enfermero). Para ello, como todas unidades que llegan al túnel, deben acudir al centro de Control, y se presentarán ante JASAN, informando que recurso son, y éste le informará de la situación actual. Le dará indicaciones sobre cómo va el triaje y dónde se deberá colocar el PSA.

El médico de la segunda unidad cogerá un chaleco de mando de PSA, que se encuentra en las dependencias del túnel, y si el enfermero de dentro del túnel, ha finalizado el triaje le dará su equipo de radio, si no es así se comunicará con JASAN con otro equipos de radio, o vía telefónica. Tanto JASAN, como el jefe del PSA deben ser de la misma nacionalidad.

SANITARIOS

FICHA OPERATIVA N°3

PSA

• El PSA se constituye por el personal del 061 Aragón que podrá ser asistido por otros grupos (AVPC, ...). El JEFE PSA se identifica por un chaleco presente en los Kits de Gestión de Catástrofes del 061 o por el chaleco unificado presente en el túnel.

• El PSA se compone de varias zonas distintas:

- Entrada (con una mesa para la de clasificación)
- Cuatro zonas para atención en función de la gravedad de las víctimas:

  Rojos – Amarillos – Verdes – Fallecidos (Morgue)
- Salida (Diferente de la entrada si es posible) => EVACUACIÓN (con una mesa para la gestión)
- Una zona logística / Terraplén

Las zonas deben estar diferenciadas por colores y supervisadas por el Jefe del PSA (España) / PMA (Francia) que designará los responsables para cada zona y asigna funciones a los equipos que llegan de refuerzo.

En Francia, el médico Jefe del PSA / PMA está en contacto con un oficial de bomberos => El Jefe del PSA + IDE Jefe PSA.

Misiones del Jefe del PSA:

- Gestión logística de la organización del espacio interno del PSA / PMA
- Gestión de la zona de entrada (identificación de víctimas)
- Gestión de la zona de salida (Evacuación)

SANITARIOS

FICHA OPERATIVA N°4

SANITARIO JEFE PSA

El Jefe del PSA/PMA es nombrado por el JASAN/DSM en función de los medios disponibles en cada momento.

El Jefe del PSA/PMA se identifica con un chaleco que se encuentra en cada boca

El Jefe del PSA/PMA será de la misma nacionalidad que el JASAN/DSM.

PRIMERAS ACTUACIONES:

- **Dirigirse** al PMT/PCT (Puesto de Mando Táctico/Poste de Commandement Tactique) en la boca española del túnel.
- **Encontrar** físicamente al JASAN/DSM si no ha llegado a la vez que él/ella (caso de DUE de UME/UVI 061).
- **Tomar** del JASAN un talkie del túnel (Cinta blanca / canal 4)
- **Tomar** un chaleco identificativo de Jefe de PSA/PMA
- **Dirigirse** al lugar donde se instalará el PSA/PMA según decisión tomada conjuntamente por JOP/COS-JASAN/DSM
- **Establecer** las transmisiones entre JASAN y Jefe PSA.

ACTUACIÓN EN EL PSA:

- **Dirigirse** al PSA/PMA
- **Identificarse** con el chaleco «Jefe PSA/Chef PMA»
- **Supervisar** la organización del PSA/PMA (Ver ficha técnica PSA/PMA)
- **Designar** otras «subjefaturas». (En el Caso de Francia, ¿Trabajar con un oficial de Bomberos y con un "IDE CHEF PMA"?)
- **Organizar** las zonas de trabajo con el resto de profesionales (Policía, Gendarmería, Guardia Civil, ...)
- **Coordinar** las tareas asignadas a los equipos de refuerzo del PSA/PMA

COMUNICACIÓN:

- **Ser** el único interlocutor con JASAN/DSM en el PSA/PMA
- **Realizar** puntos de situación (informes) cada 30 minutos
- **Permanecer** en el lugar hasta recibir la orden del JASAN/DSM de cerrar el PSA/PMA

Los posibles PSA están decididos de antemano debido a los acuerdos tomados en las reuniones que se realizaron entre ambos países para evitar complicaciones en el momento de la emergencia y que se van actualizando cada cierto tiempo. Pero como hemos señalado anteriormente el Polideportivo de Canfranc sería el espacio al que siempre se puede recurrir si durante la intervención no se encuentra nada que lo mejore como opción.

UBICACIONES POSIBLES PARA LA INSTALACIÓN DE PUESTO SANITARIO AVANZADO BOCA ESPAÑA

1. EDIFICIO EXPLOTACIÓN TÚNEL DEL SOMPORT.

2. POLIDEPORTIVO CANFRANC ESTACIÓN

3. COMISARÍA TRANSFRONTERIZA DE CANFRANC ESTACIÓN

El PSA está pensado desde el principio de la intervención dado que su montaje y preparación conlleva tiempo. Es un trabajo sincronizado con la propia intervención. En un primer momento el caso estará instaurado en el punto del incidente, pero poco a poco conforme se vaya resolviendo esa situación, ese caos se irá trasladando a lo largo de la cadena asistencial. Así que en un momento dado llegará al PSA, y tiene que estar listo para recibirlo. La seguridad del PSA la proporcionan las fuerzas de seguridad españolas que, además, elaboran la lista de implicados para el atestado policial que se coteja con el elaborado por los servicios sanitarios.

Conforme se van recepcionando heridos, se clasifican y se estabilizan. Y si se cuentan con medios suficientes, se va procediendo a su traslado. Como hemos comentado, no se traslada al hospital más cercano, si no al centro útil. Ya que si ese hospital cercano no puede gestionar el caos que le va a llegar sufriría riesgo de colapso. Estamos en este momento en una situación muy dinámica. No hay que esperar a que todas víctimas estén en el PSA, hay pacientes que requieren tempranas evacuaciones y hay traslado que empiezan incluso antes de saber el número total de víctimas, por lo que la logística de la atención sanitaria confronta directamente con la logística de la información, teniendo que ir muy de la mano, pero eso sería tema de análisis en otro artículo.

Al finalizar de cualquier intervención binacional será necesario una revisión y análisis de la misma, tanto en caliente, como en frío. Incluyendo por supuesto, la actuación y labor sanitaria en el mismo. Como todas reuniones de trabajo del PSB, sería una reunión binacional y conjunta.

3. CONCLUSIONES

- En túneles de gran longitud, más aún si son internacionales, es imprescindible disponer de planificación sanitaria de emergencias que permita trabajar sin improvisaciones.
- También es imprescindible realizar simulacros periódicos de gran envergadura en los que se pueda testar la instalación de las diferentes estructuras sanitarias implicadas e la emergencia: rueda de ambulancias, Puesto Sanitario Avanzado, dispositivo de evacuación a hospitales …

ESTUDIO SOBRE LA EXPLOTACIÓN DE TÚNELES Y LA GESTIÓN DE RIESGOS. CASO PRÁCTICO DE TÚNELES LARGOS EUROPEOS

Oscar Borobia Cuesta
IDOM Consulting, Engineering, Architecture, S.A.U.
Juan Manuel Leaño
Banco Interamericano de Desarrollo (BID)
José Moreno Vasco
Túneles y Asistencia Técnica

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) promovió el proyecto "Study for Tunnel Operation and Risk Management. Case Study from Europe on Operation and Risk Management", cuyo objetivo principal es el de apoyar a los países de Latinoamérica y Caribe con conocimientos operativos y técnicos sobre la Explotación de Túneles y la Gestión de Riesgos durante la etapa operativa de los proyectos de túneles largos.

Ante la ausencia de un marco regulatorio común referente a túneles de carretera en Latinoamérica y Caribe, este Estudio pretende establecer los principales criterios que se recomienda tener en cuenta a lo largo de toda la vida útil de un túnel de carretera, desde la fase de diseño, pasando por la construcción, hasta su apertura y puesta en servicio.

Para alcanzar este objetivo, se han estudiado en profundidad 13 túneles largos europeos, recopilando información de cada uno de ellos en base a la revisión de la literatura existente y el contacto con los profesionales que han estado o están actualmente involucrados en el diseño y la operación de los túneles.

En base a experiencias previas, se han estudiado patrones comunes a todas las infraestructuras, puntos singulares, lecciones aprendidas, etc., desde las primeras fases de desarrollo hasta las experiencias proporcionadas en túneles con muchos años de operación.

Por último, tras analizar y clasificar toda la información recopilada dio comienzo la etapa de extracción de conclusiones y recomendaciones para el desarrollo de un potencial nuevo mega túnel, en lo referente a las instalaciones de gestión de riesgos, la estructura organizativa para la operación y mantenimiento y los roles y responsabilidades de cada agencia involucrada en la gestión de emergencias, así como una propuesta para la estructura de funcionamiento binacional de un túnel transfronterizo.

STUDY FOR TUNNEL OPERATION AND RISK MANAGEMENT. CASE STUDY ON EUROPEAN LONG TUNNELS

The Inter-American Development Bank (IDB) promoted the project "Study for Tunnel Operation and Risk Management. Case Study from Europe on Operation and Risk Management", whose main objective is to support Latin American and Caribbean countries with operational and technical knowledge on Tunnel Operation and Risk Management during the operational stage of long tunnel projects.

In the absence of a common regulatory framework for road tunnels in Latin America and the Caribbean, this study aims to establish the main criteria that are recommended to be taken into account along the whole life cycle of a road tunnel, from the design phase, through construction, to its commissioning and operation.

To achieve this objective, 13 European long tunnels have been deeply studied, gathering information on each of them by means of reviewing the existing bibliography and contacting the professionals who have been or are currently involved in the design and operation of the tunnels.

Based on previous experiences, common patterns to all infrastructures, singular points, lessons learned, etc., have been studied, from the early stages of development to the experiences provided in tunnels with many years of operation.

Finally, after analyzing and classifying all the compiled information, the stage of drafting conclusions and recommendations for the development of a potential new mega-tunnel began, regarding risk management facilities, the organizational structure for operation and maintenance, and the roles and responsibilities of each agency involved in emergency management, as well as a proposal for the binational operation structure of a cross-border tunnel.

This article describes this work and the conclusions reached.

ÉTUDE SUR L'EXPLOITATION DES TUNNELS ET LA GESTION DES RISQUES. ÉTUDE DE CAS DES LONGS TUNNELS EUROPÉENS

La Banque interaméricaine de développement (BID) a promu le projet "Étude pour l'exploitation des tunnels et la gestion des risques. Étude de cas d'Europe sur l'exploitation et la gestion des risques ", dont l'objectif principal est de soutenir les pays d'Amérique latine et des Caraïbes en leur apportant des connaissances opérationnelles et techniques sur l'exploitation des tunnels et la gestion des risques pendant la phase opérationnelle des projets de tunnels longs.

En l'absence d'un cadre réglementaire commun pour les tunnels routiers en Amérique Latine et dans les Caraïbes, cette étude vise à établir les principaux critères qu'il est recommandé de prendre en compte tout au long de la vie utile d'un tunnel routier, depuis la phase de conception, allant tout au long de la construction, jusqu'à son ouverture et sa mise en service.

Pour atteindre cet objectif, 13 longs tunnels européens ont été étudiés en profondeur, recueillant des informations sur chacun d'entre eux sur la base d'une revue de la littérature existante et de contacts avec des professionnels qui ont été ou sont actuellement impliqués dans la conception et l'exploitation des tunnels.

Sur la base des expériences précédentes, on a étudié les modèles communs à toutes les infrastructures, les points singuliers, les leçons apprises, etc., depuis les premières phases de développement jusqu'aux expériences fournies dans les tunnels ayant de nombreuses années d'exploitation.

Enfin, après avoir analysé et classé toutes les informations recueillies, a débuté l'étape consistant à tirer des conclusions et à formuler des recommandations pour le développement d'un nouveau méga-tunnel potentiel, concernant les installations de gestion des risques, la structure organisationnelle pour l'exploitation et l'entretien et les rôles et responsabilités de chaque agence impliquée dans la gestion des urgences, ainsi qu'une proposition de structure d'exploitation binationale d'un tunnel transfrontalier.

Cet article décrit les travaux effectués ainsi que les conclusions auxquelles ils sont parvenus.

(*) Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Las actuales necesidades de comunicación entre territorios en un entorno económico globalizado generan una demanda de infraestructuras de transporte de calidad que permitan salvar grandes barreras naturales, como masas de agua o cadenas montañosas. El avance tecnológico en el diseño y construcción de obra civil permite afrontar retos cada vez más ambiciosos, por lo que el número de megaproyectos aumenta año a año, en todo el mundo.

Latinoamérica reúne dos características clave para el impulso de este tipo de obras: cuenta con importantes economías en crecimiento que buscan aumentar su competitividad y presenta zonas de orografía compleja para el transporte. A este respecto, destaca la cordillera de los Andes, que recorre Sudamérica de Norte a Sur con altitudes de más de 6000 m, las sierras de Brasil y México, o grandes ríos como el Amazonas, de la Plata o Paraguay.

Los megaproyectos presentan beneficios claros y directos para la sociedad, fortaleciendo lazos comerciales entre regiones y, con ello, su crecimiento económico y cohesión social. Sin embargo, también conllevan importantes dificultades de planificación, diseño, construcción y operación. Estas cuestiones deben abordarse convenientemente desde las primeras fases de desarrollo.

Los túneles, por su parte, son tramos que requieren una especial atención dentro de las redes de transporte. No porque en ellos se registre un mayor número de accidentes (estadísticamente ocurre lo contrario), sino porque pueden provocar unas consecuencias más graves que a cielo abierto. El confinamiento de los usuarios, la afección del humo, las dificultades de evacuación o los trabajos de los servicios de emergencia son algunos de sus aspectos característicos. Los mega túneles presentan estos mismos problemas y, además, añaden nuevos aspectos a considerar:

- Requieren un minucioso planteamiento inicial, incluyendo un estudio de riesgos de todo el proyecto, ya que pequeñas desviaciones pueden representar elevados sobrecostes.
- Los estudios geotécnicos previos son fundamentales, pero suelen presentar una ejecución compleja debido al propio obstáculo atravesado por el túnel. Este mismo obstáculo geográfico suele dificultar la realización de pozos de ventilación o evacuación intermedios, por lo que el uso de soluciones alternativas supone costes importantes.
- Su operación presenta costes anuales elevados e implica gran complejidad de gestión.
- El cierre ocasional del túnel genera importantes afecciones a los usuarios, ya que estas infraestructuras suelen convertirse en un eje de comunicación fundamental de la zona.
- La bibliografía sobre ellos no es tan abundante como sobre otras infraestructuras.
- Si se encuentran entre dos países, su gestión binacional exige una coordinación adecuada entre gobiernos y otras entidades; en especial, los servicios de emergencia.

Por ello, el intercambio de información y el retorno de la experiencia entre los diferentes agentes relacionados con mega infraestructuras de todo el mundo es de vital importancia para la optimización de beneficios y el mantenimiento de la seguridad. Este es el objetivo del presente Estudio, recabando información en el ámbito europeo y constituyendo un riguroso análisis comparativo para extraer conclusiones aplicables al desarrollo de un futuro mega túnel.

2. ANTECEDENTES EN EUROPA

Los trágicos incendios ocurridos en 1999 en los túneles de Mont Blanc (Francia-Italia) y Tauern (Austria) provocaron un cambio radical en la forma de considerar los túneles de carretera, cuya seguridad paso a ser una cuestión de interés público. Este hecho se vio reforzado dos años después por el incendio del túnel de St. Gotthard (Suiza). Como consecuencia de estos incendios, y tras numerosas reuniones, comités de expertos y decisiones a nivel político y gubernamental, en abril del año 2004 se publicó la Directiva Europea 2004/54/CE sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la Red Transeuropea de Carreteras, que se estableció como la principal norma de aplicación a los túneles de carretera europeos. Entre otros innovadores aspectos para la época, esta Directiva propuso armonizar la estructura organizativa de cada túnel, definió el procedimiento para autorizar la apertura del túnel al tráfico y estableció unos requisitos mínimos de infraestructura con los que el túnel debería contar.

La Directiva alentó a los Estados Miembros de la Unión Europea a transponer dicha Norma al ordenamiento jurídico nacional de cada uno, promulgando leyes nacionales sobre seguridad que constituyen la base para el equipamiento y explotación de sus túneles de carretera.

Dado que se previó que en muchos de los túneles existentes iba a resultar complejo cumplir con determinados requisitos mínimos de la Directiva, se abrió la puerta a la herramienta del análisis de riesgo, que permitía justificar la aplicación de medidas alternativas de reducción de riesgo que proporcionaran un nivel de seguridad equivalente (o superior). Esta circunstancia novedosa suponía pasar de un planteamiento prescriptivo puro a la incorporación de un planteamiento prestacional basado en el riesgo, permitiendo garantizar la seguridad de forma más racional y económica. Realmente, la Directiva adoptó un planteamiento mixto: definió el nivel mínimo de seguridad a alcanzar en los túneles de una manera prescriptiva, pero permitiendo a la Autoridad Administrativa aceptar medidas alternativas en caso de que alguno de los requisitos prescriptivos no pudiera cumplirse. El objetivo último que se debe perseguir es que la infraestructura sea segura, y ese hecho no necesariamente se alcanza únicamente mediante el cumplimiento estricto de los requerimientos prescriptivos de la normativa.

3. LISTA DE MEGA-TÚNELES ESTUDIADOS

El conjunto de mega túneles analizados en el ámbito de este Estudio incluía, entre otros, los tres mega túneles europeos de carretera más largos (Laerdal, St. Gotthard y Arlberg):

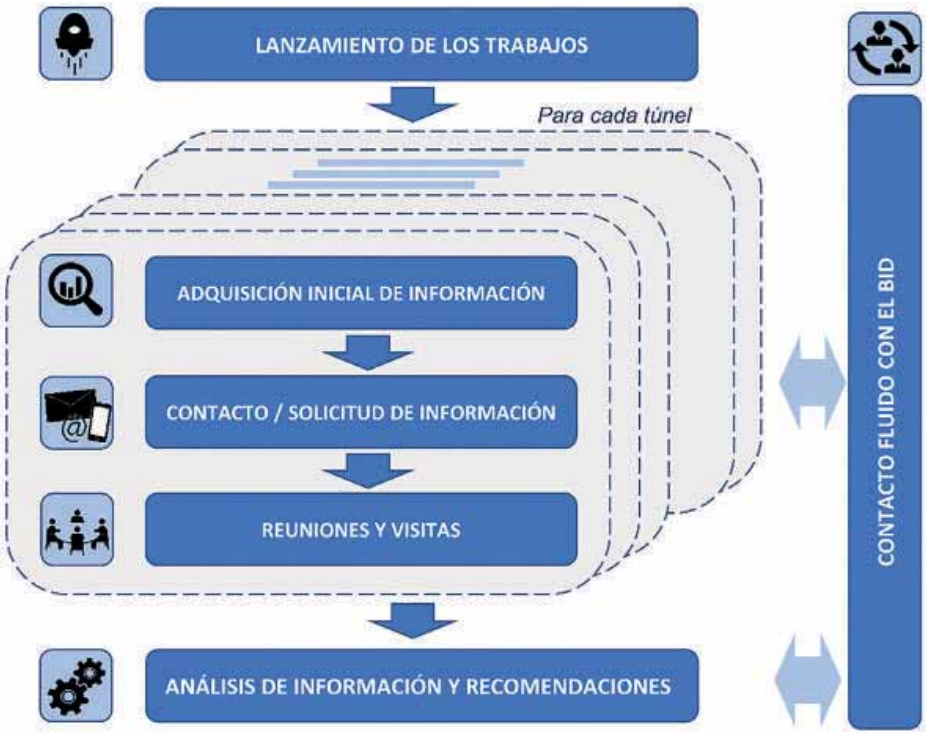
	Nombre del túnel	Long (km)	Apertura	Tubos	País(es)	Binacional
A	Laerdal	24,5	2000	1	Noruega	
B	St. Gotthard	16,9	1980	1	Suiza	
C	Arlberg	13,9	1978	1	Austria	
1	Somport	8,6	2003	1	España – Francia	X
2	Vielha Juan Carlos I	5,2	2007	1	España	
3	Marão	5,7	2016	2	Portugal	
4	Oslofjordtunnel	7,3	2000	1	Noruega	
5	Mont-Blanc	11,6	1965	1	Francia – Italia	X
6	Fréjus	12,9	1980	1	Francia – Italia	X
7	Gran San Bernardo	5,8	1964	1	Suiza – Italia	X
8	Karawanks	7,8 / 7,9	1991	1	Austria – Eslovenia	X
9	Seelisberg	9,3	1980	2	Suiza	
10	Rennsteig	7,9	2003	2	Alemania	

Las razones por las que se escogieron estos trece túneles son las siguientes:

- Dispersión geográfica. Pese a que la mayor parte de los mega túneles europeos se encuentran en la cordillera montañosa más significativa, los Alpes, los túneles seleccionados intentan abarcar el máximo número posible de países, alcanzando un total de 9 países distintos.
- Túneles binacionales. Se priorizó la selección de túneles binacionales.
- Túneles de doble tubo. Entre los túneles no binacionales, se trató de seleccionar el mayor número posible de túneles de doble tubo. Esta característica es relevante porque algunos aspectos de seguridad (salidas de emergencia, tipo de ventilación, etc.) y procedimientos de gestión de emergencias varían en estos tipos de configuraciones.
- Fecha de apertura. Igualmente, se trató de seleccionar túneles cuya puesta en servicio se hubiera producido en diferentes épocas.
- Longitud. Todos tienen longitudes de más de 5 km, con una longitud media de 10,7 km.

4. PLANTEAMIENTO TÉCNICO DE LOS TRABAJOS

El Planteamiento Técnico de los trabajos se dividió en varias fases, cuyo núcleo se estableció en una etapa central de Recopilación de Información y su posterior Análisis.



La primera fase del Estudio se correspondió con el lanzamiento de los trabajos. A continuación, para todos los túneles se realizaron búsquedas de información pública y artículos técnicos incluidos publicaciones de reconocido prestigio (por ejemplo, las relacionadas con PIARC, AETOS, etc.). Estos datos iniciales permitieron ajustar la petición de información posterior.

Para cada uno de los túneles, el primer contacto se realizó con el Gestor del Túnel, organismo público o privado responsable de la gestión de la infraestructura. En esta primera comunicación, se realizó una presentación del Estudio, de los objetivos perseguidos y una descripción general de la información que se pretende recopilar del túnel correspondiente. Tras la respuesta del Gestor, se procedió a informarle sobre los datos concretos que el Estudio requería. Algunos los proporcionaron ellos mismos y, en otros casos, derivaron la consulta a la correspondiente Empresa Explotadora, involucradas en el día a día de la operación de los túneles, por lo que podían proporcionar información concreta sobre problemas, mejoras o lecciones aprendidas.

Con el fin de facilitar la respuesta y de uniformizar la información proporcionada por los distintos túneles, se remitieron tres documentos que especificaban claramente la información necesaria:

- Listado recopilatorio de la información completa necesaria de cada túnel
- Formulario complementario con cuestiones sobre lecciones aprendidas, planes de mejora de la infraestructura o apreciaciones subjetivas del funcionamiento actual
- Formulario COVID-19, incluyendo preguntas para la recopilación de acciones preventivas y correctivas ante la pandemia del virus SARS-CoV-2.

El Estudio se ha realizado, por tanto, mediante la revisión de la literatura existente y el contacto con los profesionales que han estado o están actualmente involucrados en el diseño y la operación de estos túneles. El proceso de toma de contacto con los responsables de cada túnel fue lento, dados los trámites burocráticos que, en muchos casos, ha habido que solventar.

La previsión inicial del proyecto incluía una visita a cada uno de los túneles objetos del Estudio, con el objetivo de mantener una reunión con los responsables de todos ellos y de posibilitar la recopilación de datos in situ. Sin embargo, la declaración de pandemia, unida a las fuertes restricciones de movilidad impuestas por la mayor parte de los países europeos, imposibilitaron los desplazamientos, lo que redundó en una traba adicional a este proceso de toma de contacto.

No obstante, a la afección propia de la pandemia hay que añadir los criterios de confidencialidad impuestos y exigidos en determinados países y, principalmente, en determinados organismos gestores. Esto se ha visto agravado en el caso de los túneles transfronterizos, cuya gestión se realiza por medio de consorcios o comités de carácter binacional, compuestos por personal de las administraciones públicas de ambos territorios. Este hecho supone que la información referente a un túnel transfronterizo afecta e implica a los gobiernos de dos países y, en ocasiones, de las regiones entre las que se ubica el túnel, así como a los respectivos servicios de emergencia, lo que supone que dicha información es considerada sensible y confidencial. Por ello, la información que ha podido obtenerse de los túneles transfronterizos (y de alguno del resto de túneles) se ha hecho exclusivamente a partir de consultas a la literatura existente, información considerada de carácter público y no confidencial. Esto implica que el volumen de información recopilada sobre los túneles es muy variable, con grandes diferencias en lo que respecta, principalmente, a la descripción de instalaciones y a la gestión de las emergencias.

Una vez se hubo obtenido toda la información disponible de los trece túneles, se analizó y clasificó, tras lo que comenzó la etapa de elaboración del Estudio, en el que se incluyeron las conclusiones del trabajo realizado y recomendaciones para el desarrollo de futuros mega túneles en Latinoamérica y Caribe.

5. ASPECTOS ESTUDIADOS

De cada uno de los túneles estudiados se solicitó, analizó y estudió la siguiente información:

- Información general del túnel e información sobre el proceso de contratación. Información geométrica y geográfica del túnel, del proceso de contratación, los reglamentos y normas de aplicación, el sistema de gestión de emergencias durante la etapa de construcción, así como limitaciones geológicas específicas de la zona.
- Características técnicas de las instalaciones utilizadas en la operación normal y la gestión de riesgos, y estructura organizativa para la operación y el mantenimiento. Descripción de las instalaciones utilizadas en la operación normal y para la gestión de riesgos, del sistema de gestión de emergencias, de los simulacros de emergencias realizados, de los procedimientos de gestión, de la estructura organizativa utilizada en la operación y mantenimiento, de los criterios de funcionamiento para la operación y el mantenimiento, y de los reglamentos y normas de aplicación para las instalaciones.
- Funciones y responsabilidades de los agentes involucrados en emergencias. Roles y Responsabilidades de cada agencia, y procedimientos de actuación.
- Lecciones aprendidas y previsión de acciones para la mejora de la infraestructura. Aspectos relevantes de la explotación y la gestión de emergencias en el túnel, lecciones aprendidas, planes de mejora futura, particularidades de los túneles transfronterizos, ...
- Acciones preventivas y correctivas ante la pandemia del virus SARS-CoV-2. Afecciones a la explotación, medidas de refuerzo, particularidades de los túneles transfronterizos, medidas adoptadas para

garantizar la seguridad de los empleados y para gestionar equipos humanos, licitaciones relacionadas con túneles, medidas relacionadas con la seguridad y protección de datos, proyectos relacionados con la pandemia, ...

6. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN RECOPILADA

La información recopilada de los 13 túneles fue analizada, buscando similitudes y diferencias con el objeto de establecer los principales puntos en común de los mega-túneles europeos.

6.1. Información constructiva, proceso de contratación y costes

De la información recopilada se deduce que, a la hora de decidir el método constructivo de los túneles, han influido una serie de aspectos, entre otros:

- Año de construcción del túnel. Por ejemplo, el tubo original del túnel de Frèjus se construyó en 1980 con métodos de voladura tradicionales, mientras que el segundo tubo, de reciente construcción, se ha construido con tuneladora (TMB).
- Longitud del túnel
- País. En determinados países, está muy extendido el uso de determinados métodos constructivos, influenciados por el tipo de roca o la orografía característica del país.
- Secciones del túnel. Si es túnel tiene una sección única se puede pensar en utilizar tuneladora. Si el túnel dispone de varias secciones diferentes a lo largo de su trazado, con ampliaciones o cavernas en las ubicaciones de los apartaderos y/o los accesos a las salidas de emergencia, se desaconseja este método constructivo.

Por otro lado, los procesos de contratación para la construcción de los túneles han sido variados, desde una licitación pública en la que se elige al contratista que presenta la mejor propuesta en términos técnico-económicos (en los túneles noruegos y españoles), hasta una construcción por parte de concesionarias encargadas de la construcción y explotación del túnel (Mont-Blanc).

6.2. Datos de tráfico y peajes

Mayoritariamente, estos mega-túneles europeos no soportan un tráfico demasiado elevado, al menos en media anual, dado que en muchos túneles se observa una gran estacionalidad (tráfico elevado en verano por turismo, diferencias entre días laborales y fines de semana, ...). De los datos de tráfico de los 13 túneles objeto de este Estudio, se puede deducir el uso mayoritario de algunos de ellos. En el caso de Laerdal, Somport, Vielha-Juan Carlos I, Mont Blanc y Frèjus, con porcentaje de pesados superior al 25%, los datos hacen suponer que pertenecen a rutas comerciales y son utilizados preferentemente por vehículos de mercancías. En el túnel de Gran San Bernardo, su bajo porcentaje de vehículos pesados (5%) hace pensar en un tráfico utilizado principalmente por vehículos privados con fines turísticos.

Por otro lado, es muy importante mantener el nivel de servicio en los túneles, y asegurar que permanezcan abiertos durante el mayor tiempo posible, ya que su cierre provoca afecciones al entorno:

- El desvío del tráfico por puertos de montaña dificulta la circulación, aumenta los tiempos de recorrido e incrementa el riesgo de accidente.
- En épocas de vialidad invernal es altamente improbable que se pueda circular haciendo el 'bypass' al túnel cerrado a través del puerto de montaña.

- Si el cierre se prolonga en el tiempo, el tráfico se "recoloca" a través de otros pasos y/o túneles, provocándoles incrementos en el volumen del tráfico y congestión.
- Incluso en épocas completamente anómalas, como durante los meses más restrictivos de la pandemia en Europa, los vehículos pesados siguen circulando. Un aumento en el volumen de vehículos pesados por un túnel, debido al cierre de otro, incrementa las probabilidades de que ocurra un accidente grave.

Asimismo, varios túneles imponen el pago de un peaje para sufragar los gastos de construcción, modernización de instalaciones, ... El cierre de estos túneles por obras y/o mantenimiento, supone una reducción drástica de los ingresos, a sumar a los gastos extra que suponen las tareas realizadas. Es vital, por tanto, planificar correctamente la construcción del túnel y la dotación de instalaciones, realizar un estudio de tráfico realista que delimite claramente el volumen de tráfico que va a circular, realizar un mantenimiento preventivo (y predictivo, a poder ser) bien planificado y un rápido mantenimiento correctivo, y gestionar de manera eficaz la operación normal del túnel y, sobre todo, las emergencias, para minimizar las afecciones de las mismas.

6.3. Instalaciones para la operación normal y la gestión de riesgos

De la práctica totalidad de los trece túneles se recopiló información completa de las instalaciones de que disponen para la operación normal y la gestión de riesgos.

Una de las instalaciones más destacables en la dotación de sistemas de seguridad de los túneles de esta longitud es la ventilación, debido a su impacto en la construcción del túnel, a la necesidad de espacios adicionales (incluso, a la reserva de espacio sobre la clave del túnel o bajo el firme) y a la potencia eléctrica necesaria. Merece la pena destacar que todos los túneles constan de sistemas de ventilación transversal o semitransversal, a excepción de los túneles de Laerdal (longitudinal con pozos de extracción), Marao (longitudinal) y Oslofjord (longitudinal).

6.4. Sistemas de gestión de emergencias

Todos los túneles de los que se ha conseguido información al respecto disponen de un plan de gestión de las emergencias en el que se clasifican los incidentes y las emergencias por niveles de severidad que, a su vez, están relacionados con la capacidad de la propia empresa de explotación de gestionarlos o, en casos más graves, con la necesidad de notificar del evento a los servicios exteriores de emergencia.

Los criterios para clasificar los incidentes, los modos de notificación, la respuesta ante incidentes y la integración del plan de emergencias del túnel con los planes de emergencia jerárquicamente superiores son diferentes en cada caso y responden a las características intrínsecas del propio túnel o de la organización interna del país o países a los que pertenece el túnel.

En el caso de los túneles transfronterizos, se establece una estructura intergubernamental binacional, de la que dependen los organismos encargados de la gestión del túnel y de su explotación. La gestión de las emergencias depende directamente de esta estructura binacional.

Asimismo, dos de los túneles objeto de este Estudio (Somport y Arlberg) transcurren de forma más o menos paralela con un túnel ferroviario, al que se encuentran conectados mediante galerías de interconexión, hecho que obliga a las Administraciones gestoras de ambos tipos de túnel (carretero y ferroviario) a establecer protocolos de acción conjuntos, y a definir un plan de seguridad recíproca que permita evacuar un túnel a través del adyacente en caso de emergencia.

6.5. Estructura organizativa utilizada en la Operación y Mantenimiento

La estructura organizativa, en cada caso, para la gestión de la operación y del mantenimiento depende, principalmente, de la longitud del túnel, del nivel de equipamiento y de los kilómetros de carretera a cielo abierto que la empresa de conservación debe gestionar, además del propio túnel. El personal y la maquinaria asociados a esta estructura organizativa, además del número de actuaciones adicionales que se le exigen por contrato a la empresa de conservación, definen el presupuesto anual asociado a estas labores.

Análogamente a la gestión de emergencias, la organización de la explotación en el caso de los túneles transfronterizos depende la citada estructura intergubernamental binacional.

6.6. Roles y responsabilidades de cada agencia

En cada túnel se describen los procedimientos de notificación y de cambio de mando en el Jefe de la Emergencia, así como de las acciones que debe llevar a cabo cada uno de los servicios de emergencia implicados. Destaca el caso de los túneles de Mont Blanc y Frèjus, que en sus respectivos puestos de peaje ofrecen a los usuarios que acceden al túnel una hoja informativa con las instrucciones pertinentes en caso de funcionamiento normal y en caso de emergencia.

6.7. Procedimientos de actuación

En determinados túneles, los procedimientos de actuación constituyen una información de seguridad que las Administraciones gestoras consideran sensible y de carácter no público. Por ello, no ha sido posible recopilar información sobre los protocolos de actuación en caso de incidente de todos los túneles. No obstante, en todos ellos se ha constatado que, en base a una clasificación de incidentes y emergencias, se plantean un conjunto de fichas que describen las actuaciones que se deben llevar a cabo cuando sucede alguno de dichos incidentes. La composición de estas fichas es variable, aunque lo habitual es que incluyan la definición del tipo de incidente, los eventos que lo desencadenan y un conjunto de actuaciones que deben ejecutarse por parte del sistema de control y del propio personal del Centro de Control.

6.8. Gestión de túneles transfronterizos

Para cada uno de los cinco túneles transfronterizos analizados en el Estudio (Somport, Mont-Blanc, Frèjus, Gran San Bernardo y Karawanks), se recopiló la información referente a los arreglos institucionales bilaterales que se llevaron a cabo para todas las etapas de la vida útil de los mismos: fase de concepción, fase de proyecto/diseño, fase de construcción y fase de diseño.

6.9. Lecciones aprendidas y acciones para la mejora de la infraestructura

Este capítulo contiene la información más ilustrativa e interesante del Estudio, dado que la información que se ha obtenido directamente de los gestores y/o responsables de explotación de los túneles, por lo que contienen información de primera mano sobre el estado de los túneles, sobre las medidas implantadas y sobre las lecciones aprendidas de la explotación. A continuación, se recogen algunos de los puntos más destacables de esta recopilación.

6.9.1. Aspectos relevantes de la explotación de los túneles

Todos los túneles consultados disponen de un Responsable de Seguridad y de un Organismo de Inspección, según lo establecido en la Directiva Europea 2004/54/CE.

La mayor parte de los responsables de los túneles aseguran que se realizan campañas de comunicación a usuarios sobre el túnel y las acciones que deben llevarse a cabo en emergencia.

Casi el 90% de los responsables de los túneles mantienen un contacto habitual con otros mega túneles, siendo muy común que este contacto se realice con los responsables de otros túneles a nivel regional y nacional. Cabe destacar la existencia de asociaciones internacionales como la "Mesa redonda de túneles de carretera monotubo bidireccionales", constituida por representantes de los túneles de St. Gotthard, Arlberg, Frèjus, Mont Blanc, Somport, Gt. St. Bernard, Mappo Morettina, Maurice Lemaire y Bielsa-Aragnouet, con el objetivo de permitir que los miembros intercambien información a partir de experiencias de construcción, gestión y mantenimiento, a fin de profundizar en estos conocimientos, mejorar la eficacia de sus organizaciones y alcanzar los máximos niveles de calidad y seguridad del servicio.

6.9.2. Aspectos relevantes de la gestión de emergencias en los túneles

Del mismo modo que en el caso de los aspectos de las tareas habituaciones de operación, los responsables de los túneles consideran que los aspectos mejorables de las tareas relacionadas con la gestión de riesgos y emergencias está relacionadas con el equipamiento de los túneles, y con su modernización (reciente o futura).

En cuanto a las valoraciones subjetivas de las consecuencias en la zona de un cierre de túnel, se ha obtenido un 7,4 como promedio de las puntuaciones de los responsables. De esto se deduce que, en general, el cierre de un túnel de estas características (largos, de montaña, en puertos de difícil acceso, con escasas vías alternativas, ...) provoca consecuencias graves en la zona.

6.9.3. Recopilación de lecciones aprendidas

Las mejoras extraídas de las lecciones aprendidas más comunes relacionadas con las tareas habituales de explotación son:

- Detección más rápida de incidentes y mejor gestión de los incidentes/accidentes.
- Mejor conocimiento del funcionamiento de los sistemas y equipos.
- Creación de rutinas para comprobar el estado de los equipos;
- Coordinación con los usuarios de la infraestructura.
- Tener un objetivo claro para mejorar la fiabilidad de los sistemas, la disponibilidad del túnel y el mantenimiento de los equipos, la construcción y los sistemas.

En general, el trabajo día a día proporciona un aprendizaje continuo en términos de eficiencia en el trabajo, de conocimiento de las instalaciones, detección precoz de fallos, ...

En lo que respecta a la gestión de los riesgos y las emergencias, las principales lecciones aprendidas son:

- La mejora de la fiabilidad de los sistemas repercutirá en el riesgo y, sobre la base de la experiencia de los incendios en túneles similares, hay que mejorar y aplicar nuevos sistemas de seguridad para aumentar la capacidad de autorrescate en caso de incendio.
- Los medios de primera intervención son claves para reducir daños en caso de accidente.
- Los incidentes pueden ayudar a implementar nuevos dispositivos de seguridad.
- Los propios incidentes, los simulacros y los ejercicios internos, implican un aprendizaje sobre cómo gestionar las emergencias y una resolución más rápida de los incidentes.
- Debe asegurarse la coordinación con medios de emergencia y autoridades policiales.
- La conciencia del riesgo de los usuarios del túnel debe mantenerse constantemente.

En general, deben realizarse evaluaciones periódicas de los riesgos a nivel nacional e internacional, así como mejoras.

6.10. Recopilación de acciones preventivas y correctivas ante la pandemia

Aunque ninguno de los túneles consultados requirió un cierre completo durante la pandemia del virus SARS-CoV-2, en todos ellos se impusieron medidas higiénico-sanitarias y de seguridad para minimizar los riesgos de contagio entre el personal de la explotación. Para este fin, en varios de los túneles se llegaron a modificar los procedimientos operativos, reduciendo al mínimo las inspecciones a campo y priorizando las operaciones esenciales de mantenimiento.

En general, se reprogramaron trabajos y redujeron desplazamientos y se dotó de dispositivos seguros para el teletrabajo del mayor número posible de empleados.

7. RECOMENDACIONES PARA NUEVOS MEGA-TÚNELES

7.1. Recomendaciones para las instalaciones de gestión de riesgos

Cabe destacar el carácter multidisciplinario del equipamiento de seguridad de los túneles: alimentación eléctrica, sistema de iluminación, sistema de ventilación, sistema SCADA, ... Asimismo, existen innumerables equipos específicos para túneles, diseñados principalmente para la operativa normal, así como para colaborar en la gestión de las emergencias. Estos equipos se describen en las distintas normativas y recomendaciones, y constituyen la base para la planificación de un túnel. En el Estudio se describen recomendaciones para todos ellos, basados en el análisis de la información recopilada de los túneles, en experiencias previas, en el know-how de los autores y en las publicaciones, normativas y recomendaciones analizadas.

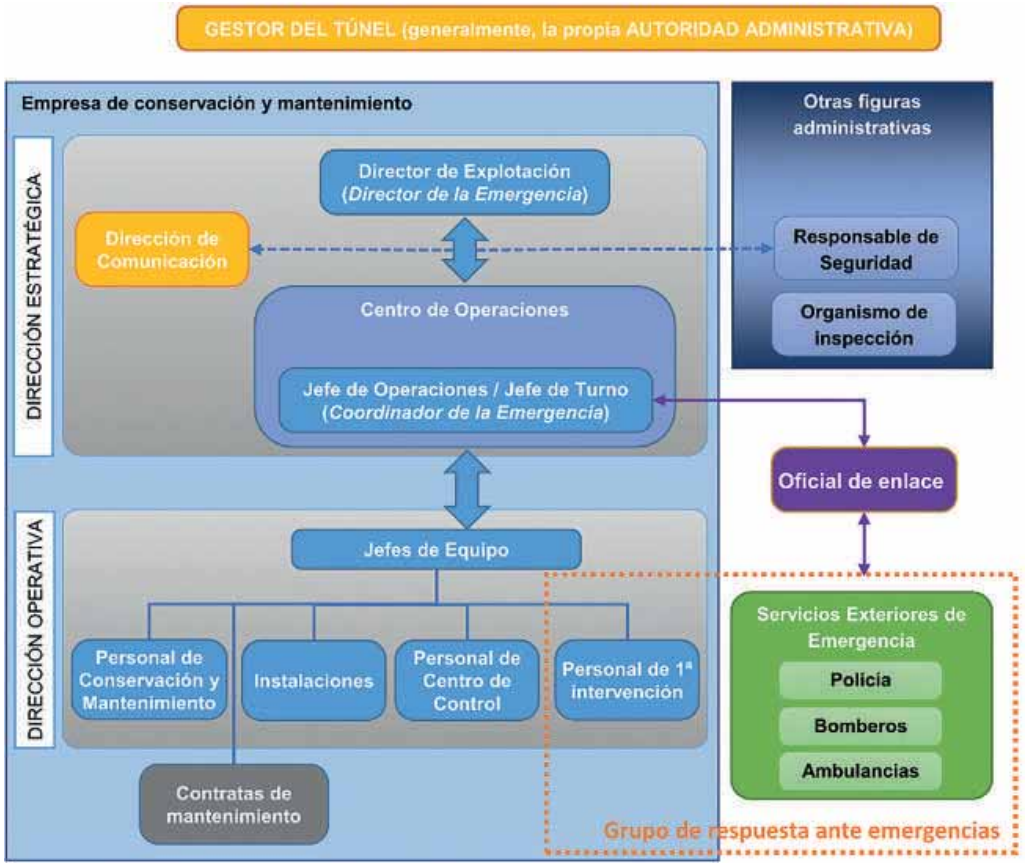
7.2. Recomendaciones para la estructura organizativa y funcional para las labores de operación y mantenimiento

7.2.1. Estructura organizativa

La estructura organizativa debe particularizarse para cada explotación concreta, por lo que se debe tener en cuenta que los profesionales a contratar deben diferenciarse por una formación académica –específica de cada puesto de trabajo– y por una formación complementaria –que les añade competencias indispensables para incorporarse a la organización– permitiendo ajustar el número de trabajadores a las necesidades reales de la explotación y del mantenimiento. Ambas formaciones definen cada puesto de trabajo, así como las tareas secundarias a desempeñar en caso necesario. Esta premisa se considera fundamental para el éxito de la organización: los puestos de trabajo deben cubrirse por personal polivalente y pluridisciplinar.

Por tanto, el primer análisis que debe realizarse la hora de diseñar la estructura de la organización consistirá en dimensionar el personal necesario, en formación y en número, para cubrir las necesidades de toda la explotación. A continuación, se adjunta un organigrama tipo para la gestión de la conservación y mantenimiento, así como para la gestión de las emergencias, de un túnel o conjunto de túneles de carretera.

Según la Directiva Europea 2004/54/CE se definen 4 figuras administrativas de especial importancia en el organigrama de conservación y explotación de un túnel, con el objetivo de proporcionar unos niveles mínimos de seguridad: Autoridad Administrativa, Gestor del túnel, Responsable de Seguridad y Organismo de inspección. El organigrama se completa con el Grupo de Respuesta ante Emergencias, compuesto por el Personal de Primera Intervención y por los Servicios Exteriores de Emergencia.



Cada túnel exige un estudio específico para determinar las necesidades de su explotación, no sólo en lo referente a la estructura organizativa y al personal, sino también en lo relacionado con los medios materiales que deben ponerse a disposición de la conservación y mantenimiento. Dentro de estos medios materiales se incluyen, al menos:

- Herramientas de primera intervención (EPIs, herramientas, extintores, ...)
- Materiales propios de cada profesión, para el desempeño de sus funciones.
- Vehículos (turismos, camiones, retroexcavadoras, plataformas elevadoras, ...)

7.2.2. Labores de mantenimiento

La empresa de conservación y mantenimiento tiene la responsabilidad de garantizar unas buenas condiciones de seguridad y un alto grado de comodidad para los usuarios que la utilizan, aún más si en dicha explotación viaria se encuentran puntos de mayor riesgo como pueden ser los túneles. Los objetivos de los trabajos de operación y mantenimiento de las instalaciones son:

- Garantizar el nivel de seguridad vial en el túnel.
- Asegurar unas condiciones óptimas de conservación de instalaciones, equipamiento y servicios, con elevado nivel de servicio y vida útil de la estructura e instalaciones.
- Optimizar los costes de explotación.

Las actividades de operación y mantenimiento de una red viaria se clasificarse en tres grupos:

- Operaciones normales: Actuaciones necesarias en ausencia de incidentes que, bien estructuradas y ejecutadas, favorecen la reducción de incidencias en el tramo.
- Operaciones de mantenimiento preventivo: Actuaciones rutinarias que contribuyen a que los equipos mantengan las prestaciones exigidas, alargando su vida útil.
- Operaciones de mantenimiento correctivo: Actuaciones consistentes en la reparación de averías inesperadas o no, que ocasionan defectos funcionales.

A partir de las operaciones de mantenimiento previstas y de su frecuencia de realización, se elaborará un Programa Anual de Operaciones de Mantenimiento que posibilite una doble labor:

- Dimensionar los recursos de la explotación dedicados al mantenimiento.
- Programar las operaciones a realizar.

Este Programa Anual de Operaciones de Mantenimiento deberá incluir el listado de equipos, donde se indique la actuación de mantenimiento a realizar en cada mes para cada equipo.

La mayor dificultad a la hora de definir un Plan de Mantenimiento es la elección de la periodicidad de las tareas preventivas de un determinado equipamiento, en busca de un equilibrio entre realizar el mantenimiento demasiado pronto (gasto excesivo e innecesario de recursos) y demasiado tarde (riesgo de avería y, por tanto, de activación de urgencia del mantenimiento correctivo, con la consiguiente pérdida de funcionalidad y afección a usuarios).

Asimismo, la planificación del mantenimiento deberá tener en cuenta las franjas horarias en las que es más conveniente realizar determinadas tareas. El mantenimiento debe organizarse para:

- Asegurar el mayor nivel de servicio posible.
- Minimizar los riesgos para el propio personal de mantenimiento.
- Minimizar los riesgos para los usuarios de la infraestructura.

Con idea de optimizar al máximo las tareas de mantenimiento, se recomienda incorporar a la explotación las medidas necesarias para poder activar un tercer tipo de mantenimiento, el mantenimiento predictivo, que permita, mediante la monitorización continua de un conjunto de señales, analizar el estado del equipamiento y medir el desgaste de sus elementos, para poder sustituirlos al detectar cualquier síntoma de fallo con anterioridad a que se produzca una avería. El Programa Anual de Operaciones de Mantenimiento deberá buscar un equilibrio los tres tipos de mantenimiento.

7.2.3. Gestión del trafico

Se entiende por Gestión del Tráfico al conjunto de acciones dirigidas a garantizar unas condiciones de tráfico seguras y cómodas ante circunstancias que puedan dificultarlo. Las competencias de la gestión de tráfico de los túneles deberían estar normalizadas, de tal modo que todos los actores implicados en la explotación no tuvieran duda de las acciones en las que son competentes. La Gestión del Tráfico se ve afectada por:

- Normativas de trazado de carreteras, vehículos, señalización vial, conducción, ...
- Tipo de vía (autovía/autopista, carretera, ...) e intensidad y composición del tráfico
- Geometría del túnel (número y anchura de carriles, número y anchura de arcenes, ...)
- Climatología
- Ubicación del túnel

- Grado de equipamiento que la normativa de aplicación requiere para el túnel
- Proyecto constructivo del túnel

Independientemente de la longitud del túnel y su ubicación, la gestión del tráfico debe tener continuidad a lo largo de toda la vía. Así, se homogeneizarán los mensajes que los usuarios de dicha vía reciben mientras circulan por la misma, evitándose la posibilidad de que reciban mensajes contradictorios, superfluos o, incluso, que puedan provocarles una distracción.

Esto implica el desarrollo de un estudio específico de la señalización disponible, estableciendo una serie de criterios de decisión basados siempre en datos objetivos, es decir, que han sido ensayados previamente, ya que las decisiones no pueden tomarse sobre la marcha. Aquí reside la importancia de los simulacros y de los ejercicios periódicos de simulación, ya que aportarán una visión global de las afecciones que se pueden producir en determinadas situaciones:

- Incidencia sobre el entorno.
- Incidencia sobre los usuarios de la vía.

En todo caso, la prioridad fundamental es que las decisiones deben tomarse siempre según criterios de seguridad vial, y deben estar amparadas por las normativas, tanto internas como externas a la explotación, destinadas a asegurar las condiciones de tráfico. Por tanto, la gestión del tráfico se basa en un análisis previo de los eventos que pueden producirse en el túnel, para posteriormente determinar la actuación a realizar en cada uno de ellos.

Es importante tener en cuenta que las infraestructuras no se pueden diseñar para los momentos más críticos, en el caso de infraestructura vial, para los momentos de mayor intensidad de tráfico. Por ello, un aspecto muy importante de la gestión del tráfico reside en la forma que se gestionan los eventos de congestión de tráfico. Desde el Centro de Control existen varios mecanismos encaminados a que pueden facilitar esta gestión, permitiendo reducir el impacto y el riesgo de estas situaciones: regular la velocidad de circulación, autorizar una circulación alternativa de forma temporal, prohibir temporalmente los cambios de carril, restringir el acceso al túnel a determinados vehículos, ...

El tiempo es clave a la hora de aplicar estos mecanismos, por lo que las decisiones deben tomarse con la mayor celeridad posible. Para ello, será de gran utilidad disponer de información continua del estado de tráfico. En caso de que no se disponga de esta información, la decisión dependerá del criterio del operador, por lo que su formación será determinante para minimizar el tiempo de reacción, así como para el éxito de la intervención. Es decir, el éxito de la gestión del tráfico reside, en una parte muy importante, en la correcta formación de los operadores.

7.2.4. Vialidad invernal

Las condiciones de vialidad con meteorología adversa (nieve, niebla, granizo, viento fuerte, lluvia, ...) junto con el aseguramiento de unos servicios mínimos definen el concepto de "vialidad invernal", que requiere una maquinaria, equipamiento y dotación mínimos que deben dimensionarse específicamente para el túnel en cuestión. Debe garantizarse, en todo momento, que usuarios del túnel y vehículos de emergencia pueden entrar y salir del túnel, asegurando la evacuación.

La vialidad invernal tiene una compleja operativa que obtiene y envía información de/hacia múltiples equipamientos (radares, PMV, sensores de estado de la superficie de la calzada, ...), y en la que las decisiones se deben tomar con muy poco tiempo, ya que los efectos y la evolución de los fenómenos meteorológicos suceden muy rápidamente.

Al hablar de vialidad invernal, los puntos más delicados en un túnel son los accesos y las salidas. Se considera muy importante que, en fase de Proyecto, se contemplen los denominados espacios dedicados para la vialidad invernal, como pueden ser unas zonas equipadas antes y después del túnel, con aspersores de fundentes

y/o calzada calefactada, donde los usuarios puedan detenerse para poner y quitar cadenas en las ruedas de sus vehículos.

Otro aspecto muy importante en el diseño de un túnel en el que la vialidad invernal estará activa durante varios meses es el firme, tanto en los accesos y salidas como en el interior del túnel, así como el tipo de revestimiento. Deben considerarse los efectos que los fundentes provocan en la atmósfera del túnel, ya que pueden provocar daños estructurales muy graves en el revestimiento y el sostenimiento del túnel, provocando corrosión que, a veces, llega hasta la armadura del hormigón. La ventilación también se ve muy afectada por esa atmósfera agresiva.

Otro parámetro importante a tener en cuenta en el diseño es la heladicidad de las instalaciones, principalmente del equipamiento de agua, que debe estar muy bien aislado térmicamente.

La información a los usuarios es de vital importancia a la hora de minimizar tanto la probabilidad de que se produzcan incidentes, como sus consecuencias. Para ello, en el diseño cada túnel deberá particularizarse el equipamiento de señalización, atendiendo siempre a los criterios vigentes de normalización, tanto en el equipamiento como en los mensajes que se proporciona a los usuarios.

El Centro de Control del túnel debe disponer de elementos que le permitan conocer, en todo momento, lo que está sucediendo en el túnel y en sus accesos: estaciones meteorológicas adecuadas, monitorización del suministro eléctrico, datos de tráfico, sistema CCTV, sistema de Detección Automática de Incidentes (DAI), ... Asimismo, la iluminación y la ventilación deben estar plenamente operativas para poder hacer frente a estas situaciones adversas.

Es muy importante no infravalorar la información meteorológica disponible y actuar en consecuencia con celeridad. En la gestión del tráfico en vialidad invernal es fundamental que las decisiones se tomen rápido y en el momento preciso ya que, de lo contrario, se producirá un colapso. Un retraso en la aplicación de medidas puede provocar que se tarden varios días en poder recuperar una cierta normalidad.

Aquellos túneles en los que la vialidad invernal estará activa durante varios meses deberán disponer de un Plan de Vialidad Invernal, que deberá ser conocidos por todas las administraciones competentes, incluyendo los protocolos descritos en los mismos.

7.2.5. Formación del personal

En la explotación existen puestos con necesidades de formación reglada, técnicos de diferentes especialidades, formación profesional, ingenierías, etc. Todo este personal debe recibir la formación adecuada a las labores que va a desarrollar. Los objetivos de esta formación son:

- Resaltar la importancia de las experiencias pasadas en la toma de decisiones.
- Fomentar el intercambio de información entre los miembros de una misma explotación.
- Poner en valor las lecciones aprendidas para el manejo de las experiencias.

En fase de explotación, el personal de la empresa explotadora realizará un proceso de formación continua que se centrará por un lado en la descripción de los túneles y sus instalaciones, y por otro, en las actuaciones en situación de emergencia. Los cursos de formación se organizarán de forma modular, orientándose hacia las necesidades de formación de cada colectivo dentro de la organización de la explotación. Deberá existir un Plan de Formación anual donde se mencionen los cursos a impartir entre el personal. Deberán impartirse, cursos de formación en las siguientes circunstancias:

1. Incorporación a la explotación de nuevo personal.
2. Realización de cambios significativos en la explotación (modificación de la estructura de los túneles, sus instalaciones de seguridad, las funciones del sistema de control, etc.)

3. Incorporación de nuevos túneles a la misma explotación.
4. Siempre que sean identificadas carencias en la instrucción del personal de explotación.
5. Al menos una vez al año, deberán preverse cursos de revisión de los conocimientos.

El explotador debe evaluar regularmente la eficiencia del personal y de los procedimientos establecidos, y asegurarse de que su personal esté familiarizado con los sistemas instalados en la carretera y en los túneles y, por tanto, que sea capaz de detectar posibles deficiencias. Esta formación continua se realimentará de los resultados de los ejercicios periódicos y simulacros.

7.2.6. Plan de simulacros

Los incidentes más graves son los de menor frecuencia; cuando tienen lugar, se hace uso de recursos de emergencia habitualmente no utilizados y se espera del personal de explotación la ejecución de actuaciones extraordinarias. Se deberán realizar periódicamente simulacros de incidentes como contribución a la garantía de la seguridad del túnel, cuyos objetivos son:

- Consolidar la formación del personal de explotación
- Evaluación de la capacitación del personal de explotación.
- Evaluación de la eficacia de los procedimientos de explotación, verificando que son operativos y se ajustan a las situaciones de emergencia reales de la explotación.
- Evaluación de la coordinación de los colectivos implicados en emergencias para garantizar tiempos de respuesta cortos y cumplimiento de las competencias asignadas.

Con el fin de mantener correctamente adiestrado al personal de explotación y verificar la adecuación de procedimientos y grado de disponibilidad de medios de emergencia, se realizarán simulacros de incidentes con una periodicidad mínima anual. Estos ejercicios se ejecutarán de acuerdo con un Plan de Simulacros, en el que se describirá uno o más incidentes tipificados en los procedimientos en respuesta a situaciones de emergencia del Manual de Explotación que se van a ensayar en los simulacros. Se recomienda la intervención de los colectivos externos de emergencia durante los simulacros de incidencias que los requieran.

El diseño de los simulacros se realizará de forma que no sólo se prueben las actuaciones de los distintos colectivos, sino también el funcionamiento de las diversas instalaciones de emergencia, incluyendo los casos de funcionamiento degradado para sistemas redundantes.

7.3. Recomendaciones para el funcionamiento de la operación y el mantenimiento

7.3.1. Condiciones nominales de funcionamiento

Se trata de las condiciones de funcionamiento en las que el 100% de los recursos de explotación del túnel (personal y equipamiento) están disponibles, y no se precisa informar o avisar a los usuarios del túnel. En estas condiciones, las instalaciones del túnel deben controlarse desde el sistema de control, según dos modos de funcionamiento: manual y automático.

- En el modo de funcionamiento manual, las decisiones sobre el funcionamiento de las instalaciones en caso de emergencia las tomarán los operadores del centro de control.
- En el modo de funcionamiento automático, el sistema de control del túnel estará programado para desencadenar una serie de secuencias ante diferentes escenarios. En ese caso, por tanto, las decisiones sobre el funcionamiento de las instalaciones del túnel se establecerán en directrices previas.

Al tratarse de un sistema crítico, más aún en el modo de funcionamiento automático, el sistema de control deberá estar diseñado para garantizar unas funciones mínimas que incluyan la ventilación, la extinción de incendios y el suministro eléctrico de emergencia en caso de fallo del sistema de control.

7.3.2. Modos degradados de operación y afección al tráfico

En los informes "2007R04ES. Guía para la organización, contratación y formación del personal de explotación de túneles de carretera" (PIARC, 2007) y "Guide to Road Tunnel Safety Documentation. Booklet 5. Emergency Response Plans" (CETU, 2006), se recogen unos gráficos en los que se muestran los incidentes que afectan al tráfico, en el eje de abscisas, frente a los medios humanos y equipamientos disponibles, en el eje de ordenadas. Cada eje está dividido en tres zonas, correspondientes a la explotación normal, modo degradado y cierre de túnel.

Cualquier desajuste importante que altere el funcionamiento nominal de los recursos del túnel requerirá la aplicación de medidas correctoras para corregir el modo de funcionamiento degradado, que se corresponde con alguna de las situaciones de funcionamiento identificadas en la zona intermedia de los citados gráficos. En esta zona podría estimarse conveniente definir más niveles degradados de forma gradual:

- Nivel 1. Se detecta un fallo en un elemento/sistema, pero existe un equipo redundante, lo que implica que el funcionamiento global no se ve afectado.
- Nivel 2. Se detecta un fallo en un elemento/sistema para el que no existe un equipo redundante, por lo que se establecen las medidas compensatorias que deben aplicarse.
- Nivel 3. Se detecta un fallo en un sistema para el que no existe redundancia. Las medidas compensatorias propuestas no son suficientes y/o no se pueden aplicar. El Director de Explotación y la Autoridad Administrativa decidirán si debe cerrarse al tráfico el túnel.

El punto crítico dentro del funcionamiento degradado es la evacuación. En el momento en el que no se puede garantizar la evacuación del túnel, debe cerrarse al tráfico.

En cualquier caso, cuando la situación empeora, puede alcanzarse el umbral crítico que delimita las zonas de modo degradado y cierre de túnel, lo que indica que el túnel ha salido de las Condiciones Mínimas de Explotación y, por tanto, las medidas compensatorias ya no pueden garantizar la seguridad de las personas en su interior.

7.3.3. Condiciones mínimas de explotación

Las Condiciones Mínimas de Explotación (CME) hacen referencia al estado de disponibilidad y rendimiento mínimo de los dispositivos de seguridad y del personal por debajo del cual debe cerrarse el túnel al tráfico. Es decir, las condiciones mínimas establecidas para el funcionamiento normal de un túnel pretenden delimitar el grado necesario de funcionamiento de los diferentes sistemas e instalaciones para realizar las tareas de funcionamiento nominal con unas garantías mínimas de seguridad para los usuarios del túnel.

7.3.4. Criterios de evaluación del correcto funcionamiento de los sistemas

La dirección de la explotación debe disponer de una visión global del servicio que está proporcionando la infraestructura, para poder decidir en qué situaciones se está proporcionando un servicio degradado y, por supuesto, en qué situaciones es obligatorio el cierre de tráfico al no alcanzarse las condiciones mínimas de explotación. Por tanto, con anterioridad a la puesta en servicio de un túnel se debe definir, para cada equipo, familia de equipos o combinación de familias de equipos, las condiciones nominales de funcionamiento, los modos de funcionamiento degradado y las condiciones mínimas de explotación.

Para los modos degradados y las condiciones mínimas de explotación, la definición del estado de funcionamiento se hará especificando la cuantificación del umbral de indisponibilidad, las medidas compensatorias que deben aplicarse y la duración máxima permitida.

Todo ello se deberá plasmar en un Manual de Actuación para el funcionamiento degradado, en el que se analizan los servicios que debe proporcionar un túnel según la normativa específica de aplicación que, evidentemente, no se puede incumplir.

7.3.4.1. Cuantificación del umbral de indisponibilidad

La no disponibilidad al 100% de un sistema provoca que no se encuentre en modo nominal, sino que pase a un modo degradado. A la hora de determinar cuándo se producirán las transiciones entre los distintos modos de funcionamiento, se deberán establecer una serie de indicadores que permitirán analizar el estado del túnel. Específicamente para cada túnel, se deben decidir los umbrales que determinan el tipo de modo degradado para cada uno de estos indicadores, así como la transición al modo de cierre de túnel (por no alcanzar las condiciones mínimas de explotación). Estos indicadores se pueden clasificar en dos grandes bloques:

- Indicadores de funcionamiento del túnel: Tiempo de recorrido, velocidad de circulación por el túnel, fluidez del tráfico, siniestralidad, ... Asimismo, existen indicadores de funcionamiento en los que la superación de los umbrales previstos no implica necesariamente un modo degradado. En estos casos, la estrategia no es aplicar medidas compensatorias, sino revisar lo que está sucediendo y corregir la desviación: tiempo máximo en resolver un incidente, tiempo máximo en llegar al lugar de un incidente tras la notificación, tiempo transcurrido hasta la vuelta a la normalidad del tráfico, ...
- Indicadores de equipamiento. Para cada túnel en particular, deberá establecerse uno o más indicadores por sistema presente en el túnel. Por ejemplo:
    - Sistema de iluminación (Niveles de iluminación, luminarias fundidas, ...)
    - Ventilación (número de ventiladores no operativos, velocidad del aire, número de horas al día con elevado nivel de contaminación (CO, NO2, opacidad), ...

En este bloque también deben incluirse los relacionados con la obra civil del túnel: rozamiento transversal de la calzada, comodidad del asfalto, integridad de la estructura (grietas, fisuras, humedades, ...), movimientos de la estructura, ...

7.3.4.2. Medidas compensatorias que deben aplicarse

Las medidas compensatorias para cada indicador determinan el camino establecido para tomar decisiones cuando algo falla en el túnel. La definición de estas medidas establece cuáles son los mecanismos que se ponen en marcha para garantizar la seguridad de todos los elementos implicados (vehículos, usuarios, infraestructura, instalaciones, ...) y la evacuación del túnel.

7.3.4.3. Duración máxima permitida

Los modos de funcionamiento degradados pueden incorporar una duración máxima permitida. Lo mismo se aplica a las condiciones mínimas de explotación; cuando dicha duración se supera, esta indisponibilidad continuada de los equipos puede llevar al cierre del túnel. Esta duración puede permitir al personal de mantenimiento restablecer el sistema defectuoso. La duración máxima permitida deberá cuantificarse en función de las funcionalidades del equipo y de la capacidad de la explotación para mantener las medidas compensatorias con el paso del tiempo.

7.3.4.4. Manual de Actuación para el funcionamiento degradado

El Manual de Actuación para el funcionamiento degradado incluirá un conjunto de fichas, una por cada indicador definido previamente. En cada una de estas fichas se puede incluir un árbol de decisiones, que deter-

mina los pasos a llevar a cabo en cada caso. En primer lugar, se deben determinar los estados de servicio para el indicador en cuestión:

- Nominal (funcionamiento al 100%)
- Degradado (alguna anomalía). Desglosado en niveles 1, 2 y 3 previstos anteriormente.

Tras la definición de estos estados, se va completando el árbol de decisión con las medidas compensatorias establecidas para cada umbral de incumplimiento, la duración máxima permitida en cada caso y las condiciones que determinan el incumplimiento de las condiciones mínimas de explotación y que, por tanto, pueden implicar el cierre del túnel.

7.4. Recomendaciones para los roles y responsabilidades en caso de emergencia

En la operación de un túnel, tanto en caso de funcionamiento normal como de emergencia, existe un conjunto de agentes implicados. Algunos de los agentes pueden formar parte de un grupo mayor, como el "grupo de respuesta ante emergencias", que comprende al personal de primera intervención y los servicios exteriores de emergencia.

En modo de funcionamiento normal, se hace necesario describir los correspondientes a la operación del túnel en caso de emergencia, dado que la experiencia ha demostrado que la falta de organización y planificación puede provocar que una pequeña incidencia ocasione una catástrofe. Al diseñar la estructura organizativa que sea capaz de dar respuesta a una emergencia, debe ponerse el foco en dos aspectos fundamentales:

- Especificar claramente las acciones a desarrollar
- Potenciar la habilidad y destreza de los recursos humanos

El objetivo de estas acciones tiene como objetivo liberar estos recursos de acciones genéricas, centrándolos en aspectos específicos de actuación ante la emergencia, para optimizar el uso de medios técnicos y humanos, así como las acciones tácticas y estratégicas encaminadas a dar una solución satisfactoria bajo los principios de rapidez, eficacia y seguridad.

Todos los servicios intervinientes en una emergencia deben tener definidas por protocolo las acciones a desempeñar en la intervención y conocer de antemano quién es el responsable.

La gestión de una emergencia de cualquier tipo requiere una planificación previa y una preparación, de modo que la respuesta ante cualquier incidente se realice adecuadamente, con suficiente anticipación, cooperación y coordinación.

7.5. Propuesta de estructura para el funcionamiento binacional de un túnel gestionado por dos países

Los tres grandes incendios de túneles en Europa entre 1999 y 2001 desencadenaron importantes actividades en todo el mundo: evaluaciones de riesgo, programas especiales de investigación y, por último, normas, estándares y directrices para los requisitos mínimos en materia de seguridad de los túneles. Una de las principales lecciones aprendidas fue también la asignación clara de funciones y tareas en caso de emergencia o incidente.

Una de las conclusiones, como es bien sabido, fue que ciertas respuestas a los eventos deben ser automáticas, y que las intervenciones específicas en las operaciones sólo pueden ser realizadas por un único organismo, lo que no era en general el caso de los túneles transfronterizos en ese momento.

A este respecto, cabe destacar que la principal recomendación es que se establezca un mando único para gestionar las emergencias. En general, la estructura binacional de gestión de la explotación pasa a tener una

relevancia menor, siendo la gestión de las emergencias el principal objetivo de los convenios de colaboración que deben establecerse por parte de la Dirección Estratégica de la Explotación. Es decir, sólo uno de los gestores del túnel debe llevar a cabo la coordinación en caso de incidente.

En términos generales, un túnel binacional debe cumplir los siguientes requisitos en materia de organización:

- El gestor del túnel es responsable de la planificación, el funcionamiento y el mantenimiento del túnel.
- Un responsable de seguridad independiente verifica los requisitos de seguridad. Ambos países se ponen de acuerdo sobre este responsable independiente.
- Se recomienda operar el túnel desde un solo centro de control, aunque las responsabilidades cambien.

8. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

Ante la ausencia en Latinoamérica y Caribe de un marco regulatorio común en lo que respecta a túneles de carretera, el Estudio pretendía exponer los principales criterios a tener en cuenta a lo largo de todo el ciclo de vida de un túnel carretero, tomando como base el exhaustivo análisis realizado sobre trece de los principales túneles de carretera en Europa, analizando patrones comunes, puntos singulares y lecciones aprendidas.

El fin último del Estudio era el de elaborar unas recomendaciones homogéneas y coherentes con las necesidades de los futuros mega túneles en Latinoamérica y Caribe, para lo que se consultaron reglamentos estadounidenses y recomendaciones y directrices de diseño publicadas por PIARC, el CETU y otros organismos internacionales.

El Estudio ha puesto de manifiesto el elevado coste que supone la construcción y el mantenimiento de los túneles, así como el enorme impacto económico y social que puede suponer el cierre temporal de un túnel debido a un accidente o un incendio.

El conjunto de recomendaciones del Estudio están encaminadas a un objetivo común: la seguridad del túnel debe enfocarse a asegurar la autoevacuación y el rescate de los usuarios en caso de emergencia. La educación a los usuarios de los túneles en la mejora de su capacidad de autoevacuación es de absoluta necesidad en este tipo de infraestructuras de gran longitud.

En lo referente a la estructura organizativa y funcional de las organizaciones dedicadas a la operación y mantenimiento de los túneles de carretera, se propuso un conjunto de recomendaciones, abogando por particularizar dicha estructura para cada explotación concreta, mediante el dimensionado óptimo del equipo humano. De esta forma, se consigue ajustar el número de trabajadores a las necesidades reales de la explotación y del mantenimiento. Asimismo, se destacó la premisa de que los puestos de trabajo deben ser cubiertos por personal polivalente y pluridisciplinar, para el éxito de cualquier organización dedicada a la operación y mantenimiento de túneles de carretera.

El Estudio continuó con unas recomendaciones para la operación y mantenimiento, definiendo las condiciones nominales de funcionamiento de un túnel y analizando las potenciales disconformidades que alteran el funcionamiento habitual del túnel hasta situarlo en un modo de funcionamiento degradado, que conlleva la aplicación de medidas correctoras, con el objetivo primordial, una vez más, de asegurar la evacuación: en el momento en el que no se puede garantizar la evacuación de los usuarios, el túnel debe cerrarse al tráfico, por no cumplirse las Condiciones Mínimas de Explotación.

Otros aspectos que aborda el Estudio son los criterios para definir los roles y responsabilidades de cada agente implicado en la operación de un túnel en caso de una emergencia. La esencia de estas recomendaciones reside en que todos los servicios intervinientes en una emergencia deben tener definidas por protocolo las

acciones a desempeñar en la intervención y deben conocer de antemano quién es el responsable, dado que la experiencia ha demostrado que la falta de organización y planificación puede provocar que una pequeña incidencia ocasione una catástrofe. La respuesta ante un incidente debe realizarse con suficiente anticipación, cooperación y coordinación.

Por último, se incluye una breve reflexión acerca de las estructuras para el funcionamiento binacional de un túnel gestionado por dos países. La coordinación binacional se considera como uno de los grandes riesgos de este tipo de proyectos, ya que se ha constatado que no es suficiente con partir del mejor diseño de ingeniería ni disponer de la mejor empresa constructora, sino que la coordinación internacional con interlocutores adecuados es una condición sine qua non para garantizar el éxito del proyecto.

Esta coordinación debe extenderse no sólo a la planificación, diseño y construcción del túnel, sino que debe ser aplicada al modelo operativo binacional, que establezca los mecanismos necesarios para garantizar el confort y la seguridad de los usuarios de los túneles. En el Estudio se ha partido de la premisa de que la estructura binacional de gestión de la explotación pasa a tener una relevancia menor, siendo la gestión de las emergencias el principal objetivo de los convenios de colaboración que deben establecerse. La principal recomendación que se da en el Estudio es que se establezca un mando único para gestionar las emergencias. Es decir, las intervenciones específicas en las operaciones sólo pueden ser realizadas por un único organismo, lo que no era en general el caso de los túneles transfronterizos en el momento en que ocurrieron aquellos incendios.

En resumen, este Estudio ha pretendido cumplir con el objetivo principal que se estableció, de servir de apoyo a los países de América Latina y el Caribe proporcionando recomendaciones sobre la Explotación de Túneles y la Gestión de Riesgos, desde la perspectiva de garantizar la seguridad a lo largo de todo el ciclo de vida de los túneles. Fruto de este Estudio se ha obtenido un riguroso análisis comparativo que ha permitido extraer conclusiones útiles y aplicables a las diferentes fases de desarrollo de un futuro mega túnel y, además, se han abierto vías de comunicación con otras infraestructuras de similares características ejecutadas en Europa, para futuras colaboraciones que puedan establecerse más allá de este trabajo de consultoría.

9. REFERENCIAS

[1] "Directiva Europea 2004/54/CE, de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras". Comisión Europea, 2004.

[2] "Real Decreto 635/2006 de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado", Ministerio de Fomento, España, 2006.

[3] "Circulaire interministérielle n° 2000- 63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national, Anexe II". Ministere de l'equipement des transports et du logement. Francia. 2000.

[4] "Road Tunnels Manual". PIARC, 2019. https://tunnelsmanual.piarc.org/es"

[5] "Diccionario Vial", PIARC. https://www.piarc.org/es/actividades/Diccionario-Vial-Terminologia-Transporte-Carretera/Diccionario-Terminologia-Traduccion-Definicion-Busqueda-Termino"

[6] "NFPA 502. Standard for Road Tunnels, Bridges and other limited access highways", National Fire Protection Association (NFPA), 2020.

[7] "Les dossiers pilotes du CETU. Ventilation", Centre d'Etudes des Tunnels (CETU), 2003.

[8] "Guide to Road Tunnel Safety Documentation. B5. Emergency Response Plans", CETU, 2006.

[9] "2006 05.16.B. Chapter 3. Lessons learned from recent tunnel fires", PIARC, 2006.

[10] "2007R04. Guide for organizing, recruiting and training road tunnel operating staff," PIARC.

[11] "2007R07EN Integrated approach to road tunnel safety", PIARC, 2007.

[12] "2008R02EN Risk analysis for road tunnels", PIARC, 2008.

[13] "2008R03EN Management of the operator Emergency teams interface in tunnels", PIARC.

[14] "2008R17EN Human factors and road tunnel safety regarding users", PIARC, 2008.

[15] "2012R14EN Life cycle aspects of electrical road tunnel equipment", PIARC, 2012.

[16] "2016R01EN Best practice for life cycle analysis for tunnel equipment", PIARC, 2016.

[17] "A comparative analysis of the Mont-Blanc, Tauern and Gotthard tunnel fires", Routes/Roads 324, 2004

[18] "El camino desde el túnel seguro hasta el túnel excelente. Evolución de la normativa de seguridad en túneles". Ponencia de Juan Ramón López y Javier Borja. 17º Congreso Mundial IRF (International Road Federation). Riad, Arabia Saudí, 9-13 noviembre 2013.

VEHÍCULOS DE ENERGÍA ALTERNATIVA (VEA) A SU PASO POR EL TÚNEL DE SOMPORT

Nuria Romeo Girón[1]
Antoine Ruiz[2]
Óscar Aguarta Nasarre[3]
Daniel Fernández Morlans[3]
Emilio Leo Ferrando[4]

[1] *Túnel de Somport*
[2] *Servicio de Bomberos de Pirineos Atlánticos, Francia*
[3] *Servicio Provincial de Extinción de Incendios y Salvamento, Dip.Provincial de Huesca*
[4] *Protección Civil Subdelegación del Gobierno en Huesca*

La irrupción en el parque automovilístico de vehículos de energía alternativa (VEA -Gas Natural Licuado, Gas Natural Comprimido, Gas Licuado del Petróleo, Eléctricos, Híbridos e Hidrógeno-) supone una novedad en los incidentes con este tipo de vehículos, sobre todo en la extinción de incendios.

En general, es cada vez mayor el tránsito de vehículos pesados de energía alternativa por lo que los explotadores y los servicios de emergencia, se han visto obligados a elaborar procedimientos de explotación para el paso de este tipo de vehículos y de intervención en caso de incidencias en los túneles y sus plataformas.

En el caso concreto del Túnel de Somport todos los camiones son inspeccionados antes de su entrada, de forma que los vehículos pesados de energía alternativa son identificados según el tipo de carburante. Esta información es transmitida al centro de control y en caso de incidencia el personal tiene conocimiento de su existencia.

Accidentes con fuga de gas e incendios con vehículos VEA en el interior de los túneles llevan consigo asociados una serie de riesgos para los intervinientes de forma que la actuación supone la movilización de los servicios de emergencia exteriores.

Se ha elaborado un procedimiento para el personal de explotación que facilita su trabajo garantizando la seguridad de los trabajadores y de los usuarios del túnel. Sirva este procedimiento como base para otros explotadores de túneles y servicios de emergencia.

ALTERNATIVE ENERGY VEHICLES (SEE) AS THEY PASS THROUGH THE SOMPORT TUNNEL

The irruption of alternative energy vehicles (AEV -Liquefied Natural Gas, Compressed Natural Gas, Liquefied Petroleum Gas, Electric, Hybrid and Hydrogen-) is a new development in incidents with this type of vehicle, particularly in the firefighting.

In general, the transit of heavy alternative energy vehicles is increasing, so exploiters and emergency services have been obliged to develop operating procedures for the passage of this type of vehicle and for intervention in the event of incidents in tunnels and their platforms.

In the specific case of the Somport Tunnel, all trucks are inspected before entry, so that alternative energy heavy vehicles are identified according to fuel type. This information is transmitted to the control centre and in the event of an incident, staff are aware of its existence.

Accidents with gas leaks and fires involving AEV vehicles inside tunnels involve a number of risks for those involved, so that action involves the mobilisation of external emergency services.

A procedure has been developed for exploitation personnel to facilitate their work, ensuring the safety of workers and tunnel users. This procedure should serve as a basis for other tunnel exploiters and emergency services.

VÉHICULES À ÉNERGIE ALTERNATIVE (VOIR) LORS DE LEUR PASSAGE DANS LE TUNNEL DU SOMPORT

L'émergence des véhicules à énergie alternative (VEA -Gaz Naturel Liquéfié, Gaz Naturel Comprimé, Gaz de Pétrole Liquéfié, Electriques, Hybrides et Hydrogène-) dans le parc automobile est une nouveauté dans les incidents impliquant ce type de véhicule, notamment dans la Lutte contre l'Incendie.

D'une manière générale, le trafic de poids lourds à énergie alternative est en augmentation, de sorte que les exploitants et les services de secours ont été contraints d'élaborer des modes d'exploitation pour le passage de ce type de véhicules et d'intervention en cas d'incidents dans les tunnels et sur leurs plateformes.

Dans le cas particulier du Tunnel du Somport, tous les camions sont inspectés avant leur entrée, de sorte que les poids lourds à énergie alternative sont identifiés selon le type de carburant. Cette information est transmise au centre de contrôle et en cas d'incident, le personnel a connaissance de leur existence.

Les accidents impliquant des fuites de gaz et des incendies avec des véhicules VEA à l'intérieur des tunnels sont associés à une série de risques pour le personnel intervenant, de sorte que l'intervention implique la mobilisation de services de secours externes.

Une procédure a été établie pour le personnel d'exploitation afin de faciliter son travail, garantissant ainsi la sécurité des travailleurs et des usagers du tunnel. Que cette procédure puisse servir de base pour les autres exploitants de tunnels et les services de secours.

INTRODUCCIÓN

La irrupción en el parque automovilístico de vehículos de energía alternativa, en adelante VEA, y las nuevas tecnologías utilizadas en su motorización, han supuesto una evolución en los procedimientos de actuación ante un incidente con este tipo de vehículos y por ende en los riesgos de los intervinientes en los incidentes, sobre todo en la extinción de incendios.

En general, es cada vez mayor el tránsito de vehículos pesados de energía alternativa por lo que los explotadores de túneles y los servicios de emergencia se han visto obligados a elaborar procedimientos de explotación para el paso de este tipo de vehículos y de intervención en caso de incidencias en los túneles y sus plataformas.

TIPOS DE VEA

Actualmente existen diferentes tipos de VEA en el mercado y todos ellos llevan consigo asociados una serie de riesgos específicos, sobre todo en caso de incidente de envergadura (fuga, accidente o incendio), necesario a tener en cuenta a la hora de realizar una intervención por parte de los servicios de emergencia.

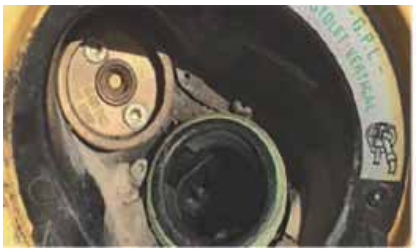
Se detallan a continuación diferentes tipos de vehículos de energía alternativa.

Vehículos alimentados por GLP (Gas licuado del petróleo)

El gas licuado del petróleo GLP es una mezcla de gases propano y butano licuados. Se almacena en depósitos de acero.

Tipo de depósitos

La alimentación a este tipo de vehículos puede ser mediante carburación GLP simple o bifurcación Gasolina-GLP. El orificio de llenado se encuentra habitualmente ubicado junto al orificio de llenado de gasolina.



Orificio de llenado

Este tipo de vehículos disponen de determinados dispositivos intrínsecos de seguridad: depósito de acero, electroválvula (seguridad por defecto), apertura de válvula en caso de presión interna superior a determinados bares y termofusible.

Existen limitaciones de estos dispositivos de seguridad en caso de incendio, las cuales llevan asociadas una serie de riesgos:

- Vehículo tumbado o volcado: la válvula se encuentra en fase líquida. En caso de apertura, a pesar del dardo de fuego, no se produce un cambio de estado en el interior del depósito, por lo que no baja la temperatura: RIESGO DE BLEVE.
- Falta de líquido en el depósito: la presión aumenta, pero no lo suficiente como para permitir que la válvula de seguridad se abra: RIESGO DE ROTURA DE LA ENVOLTURA Y DE QUE ESTALLE EL DEPÓSITO.
- Caso especial de los depósitos cilíndricos: en caso de agresión térmica fuerte, se reduce la resistencia de la parte superior de la pared central. El depósito se abrirá en este punto antes de la válvula de seguridad: RIESGO DE ROTURA DE LA ENVOLTURA.
- Caudal de la válvula insuficiente: al sobrecalentarse el acero se debilita: RIESGO DE ROTURA DE LA ENVOLTURA.

Vehículos de carburación GNC (Gas natural comprimido)

El gas natural comprimido GNC es gas natural urbano almacenado a 200 bares, en depósitos de diferentes formas y composiciones. Llega al motor a través de una red de tuberías específica de acero inoxidable.

Tipo de depósitos

Disponen de un orificio de llenado específico que permite su abastecimiento y se encuentra habitualmente ubicado junto al orificio de llenado tradicional. En los vehículos pesados se ubica generalmente en los laterales (bajos) y en los autobuses en la parte alta.

Orificio de llenado

Este tipo de vehículos disponen de determinados dispositivos intrínsecos de seguridad: depósito de metal o compuesto, electroválvula (seguridad por defecto), válvulas manuales y termofusible.

Las limitaciones de estos dispositivos de seguridad en caso de incendio están asociadas a que se produzca un aumento de la presión en el depósito, en el caso en el que el dispositivo termofusible instalado en un extre-

mo del depósito no se dispare si la agresión térmica ocurre en la parte no equipada con fusible, y por consiguiente un RIESGO DE EXPLOSIÓN.

Vehículos de carburación GNL (Gas natural licuado)

El gas natural licuado es metano licuado por simple disminución de la temperatura a -160º. La licuefacción permite almacenar GNL en un espacio reducido. El GNL no tiene olor. Se almacena en depósitos compuestos por una capa doble de acero inoxidable separada por una capa de aire. Llega al motor vía una red de gas.

Tipo de depósitos

Hoy en día solamente los vehículos pesados disponen de las instalaciones adecuadas para poder utilizar esta energía para desplazarse. Disponen de un orificio de llenado específico y cuentan con uno o varios depósitos.

Orificio de llenado

Este tipo de vehículos disponen de determinados dispositivos intrínsecos de seguridad: depósito doble capa de acero inoxidable, electroválvula (seguridad por defecto) en algunos modelos, válvulas manuales y apertura de una primera válvula si la presión interna es superior a 16 bares y de una segunda válvula a 24 bares.

Los vehículos que no disponen de electroválvulas tienen la particularidad de que si quitamos el contacto no se aísla el acumulador de energía del vehículo.

Las limitaciones de los dispositivos de seguridad en caso de incendio están asociadas a que se produzca una degradación de los dispositivos de la válvula utilizados para regular la presión, ya que puede conducir a un aumento de dicha presión en el interior del depósito con el consiguiente RIESGO DE BLEVE.

Vehículos eléctricos e híbridos

En este tipo de vehículos los cables de alta tensión se identifican con una protección naranja para diferenciarlos del circuito de servicio eléctrico (12 o 24 V). Las baterías más frecuentes utilizadas son de litio-ión, litio metal polímero y níquel metal hidruro. Las tensiones varían de 200 a 600 V y las intensidades de 200 a 600 mA.

En los vehículos eléctricos el modo de funcionamiento es mediante propulsión con motor eléctrico mientras que en los vehículos híbridos es con motor térmico combinado con motor eléctrico.

El enchufe de carga puede ubicarse en cualquier punto del vehículo. En los vehículos cien por cien eléctricos la ausencia de tubo de escape es una de las características visibles principales.

Enchufe de carga

Tanto los vehículos eléctricos como los híbridos disponen de una o varias baterías. En los vehículos pesados los bloques de baterías se encuentran generalmente situados en los laterales (bajos) y en los autobuses en el techo.

Baterías en vehículos pesados

Baterías en autobuses

Este tipo de vehículos disponen de determinados dispositivos intrínsecos de seguridad: bandeja de cables de alta tensión ubicada fuera de las zonas habituales de corte, longitud reducida de los cables de alta tensión, baterías de tracción ubicadas en zonas protegidas (entre las ruedas traseras, posición central…) y cajón de baterías resistente a los golpes. Además, algunos vehículos eléctricos e híbridos llevan uno o varios dispositivos de corte del suministro de energía a las baterías de tracción:

- Automáticos (fusibles, relés) en caso de golpe o elevación de la temperatura.
- Manuales (interruptor de desconexión llamado también interruptor de servicio)

Algunas baterías cuentan con un "Fireman Access", elemento termofusible que en caso de incendio indica exactamente en qué zona de la batería es necesario echar agua.

Es importante destacar que el mayor riesgo de este tipo de vehículos es el RIESGO ELÉCTRICO.

Vehículos de carburación H2 (dihidrógeno)

El principio de funcionamiento del coche H2 es el de la pila de combustible asociada a una monitorización eléctrica. La pila de combustible oxida el dihidrógeno con el oxígeno del aire, produciendo electricidad y va-

por de agua. Un vehículo H2 es un vehículo eléctrico (lleva los mismos dispositivos que un vehículo eléctrico) que produce su propia electricidad para alimentar el motor eléctrico (tecnología full power) o para aumentar la autonomía de la batería de tracción (tecnología range extender).

El H2 se almacena en forma gaseosa en depósitos con presión de 350 a 700 bares y llega a la pila de combustible a través de la red de gas. Los vehículos H2 disponen de un orificio de llenado específico que permite su abastecimiento con hidrógeno y pueden encontrarse ubicados junto a la boca de carga eléctrica.

Orificio de llenado

Este tipo de vehículos cuentan con uno o varios depósitos.

Tipo de depósito

En los autobuses equipados con pila de combustible, los depósitos de H2 y las baterías de alta tensión se colocan generalmente en la parte alta del vehículo.

Este tipo de vehículos disponen de determinados dispositivos intrínsecos de seguridad: electroválvula (seguridad por defecto), tubería de evacuación del H2 y dispositivo de alivio de presión con disparo térmico y dardo de fuego.

Importante destacar que el H2 es un gas inodoro, incoloro, más ligero que el aire y con un rango de explosividad muy amplio (del 4% al 74%), por tanto, es necesario tener en cuenta el RIESGO DE EXPLOSIVIDAD.

PASO DE VEHÍCULOS VEA POR EL TÚNEL DE SOMPORT

En el Túnel de Somport, túnel transfronterizo entre España y Francia, bidireccional y de longitud 8608 m, y situado en la localidad de Canfranc-Estación (Huesca), es cada vez mayor el paso de vehículos pesados de energía alternativa. En la actualidad, los vehículos que mayoritariamente transitan son de GLP, si bien es cierto que en el año actual está aumentando el paso de vehículos de GNL.

La explotación del túnel dispone de diferentes procedimientos para el paso de vehículos (mercancías peligrosas, vehículos especiales, paso alternativo…) enmarcados dentro del Reglamento de Circulación propio del túnel y del Plan de actuación en emergencias/Plan de Intervención y Socorro (PAE/PIS). Dependiendo de la gravedad del incidente y en caso de que la empresa explotadora no disponga de los suficientes medios para solucionarlo, ésta solicitará la activación del Plan de Socorro Binacional (PSB), dispositivo conjunto de intervención que tiene en cuenta los medios propios del explotador y los medios exteriores de cada país.

La detección del tránsito de vehículos de energía alternativa por el túnel ha hecho que la empresa explotadora, con la participación de los medios exteriores españoles y franceses, se haya visto obligada a elaborar un procedimiento interno de explotación para el paso de este tipo de vehículos, así como la definición de la actuación en incidencias de vehículos VEA tanto en el interior del túnel como en las plataformas.

El procedimiento facilita el trabajo para el personal de explotación garantizando la seguridad de los trabajadores y de los usuarios del túnel.

PROCEDIMIENTO DE EXPLOTACIÓN PARA EL PASO DE VEHÍCULOS PESADOS DE ENERGÍA ALTERNATIVA

Identificación y entrada del vea al túnel

En el Túnel de Somport todos los camiones y autobuses son inspeccionados por personal de explotación antes de su entrada en el túnel, de forma que los vehículos pesados de energía alternativa son perfectamente identificados según el tipo de carburante. Esta información junto con el número de pasajeros, el tipo de camión (MMPP o no, cisterna, caja con lona…) y la matrícula de la cabeza tractora, es transmitida al centro de control de forma que en caso de incidencia con este tipo de vehículos el personal tiene conocimiento de su existencia. Si es todo correcto, el personal del centro de control dará entrada al vehículo anotando en el parte de trabajo diario la información proporcionada por el personal encargado de su inspección en las bocas de entrada al túnel.

Incidencias de un vehículo vea de gnc/gnl/glp

Las fugas de gas en las plataformas, accidentes con fuga de gas e incendios con vehículos VEA en el interior y exterior del túnel llevan consigo asociados una serie de riesgos para los intervinientes de forma que la actuación en este tipo de incidentes es de suma relevancia y supone la movilización de los medios de emergencia exteriores.

A continuación, se detallan los procedimientos establecidos en el Túnel de Somport ante incidencias asociadas a vehículos de GNC, GNL y GLP.

- Fuga de gas en las plataformas:

  En el caso de que exista una fuga de gas en cualquiera de las dos plataformas de acceso al interior del túnel, el Agente de explotación en la inspección previa a su entrada al túnel, lo detectará bien por el ruido del recipiente a presión, bien por ver una nube o escarcha o bien por el olor a gas metano. Lo transmitirá al centro de control, realizará mediciones con el detector de explosividad que dispone y lo considerará una avería o incidencia mecánica (en ningún caso se tratará de una fuga de MMPP). Se trasladará con autorización del centro de control el vehículo al helipuerto situado en ambas plataformas (en España y Francia) y se le solicitará al conductor del vehículo VEA avisar a su empresa o asistencia técnica para su reparación.

- Incendio en el interior del túnel:

  En el caso de que se produzca en el interior del túnel un incendio de un VEA de GNC, GNL o GLP, desde el centro de control se considerará un incendio fijo atendiendo a las actuaciones definidas en el Plan de Actuación en Emergencia/Plan de Intervención y Socorro. En este caso, solicitará la activación del Plan de Socorro Binacional comunicando que se trata de un vehículo de energía alternativa, dato sumamente importante para los medios de emergencia exteriores a la hora de realizar el envío de dispositivos y la intervención en el incendio.

Para la primera intervención en el interior del túnel por parte de los Agentes de explotación, deben tener en cuenta la importancia de disponer del mínimo personal en la zona de intervención, así como actuar realizando dos tendidos de 45mm con 500 l/min o utilizar el monitor de agua.

Dependiendo de si el fuego afecta al depósito de gas o no, las actuaciones en la intervención variarán.

Si afecta al depósito es importante comprobar si también afecta a otras partes del camión. En el caso de que sí afecten, se deberá refrigerar los depósitos de gas con jet en cono (jet difuso de ataque), cortar toda fuente de radiación calorífica al resto del camión y en la medida de lo posible no se apagará el incendio del gas en el depósito, esperando a que se vacíe. Por último, se realizará la extinción del resto del camión.

Si no afecta a otras partes del camión, se procederá de igual forma, es decir, refrigeración del depósito, corte de radiación y esperar a que se vacíe.

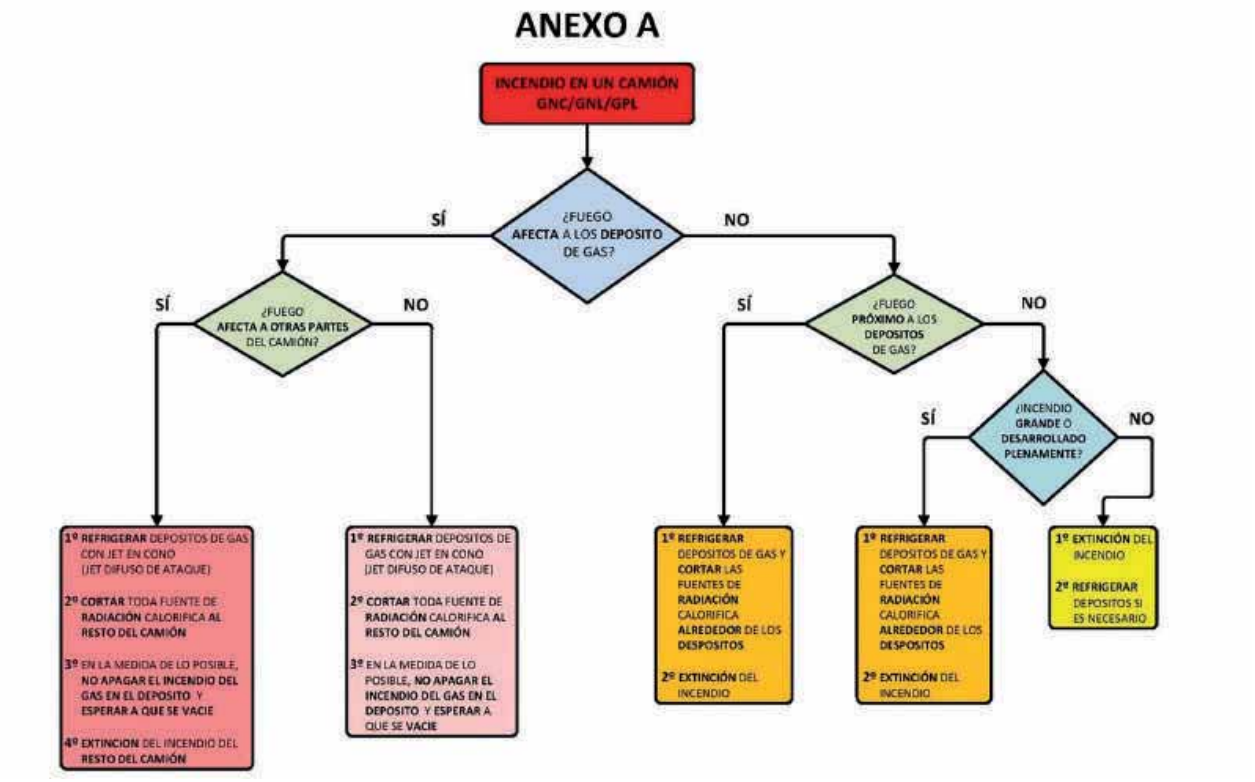
Si no afecta al depósito se debe comprobar la localización del fuego, es decir, si está próximo o no al depósito. En el caso de que no esté próximo, es importante definir si el incendio es grande o está plenamente desarrollado o no lo es.

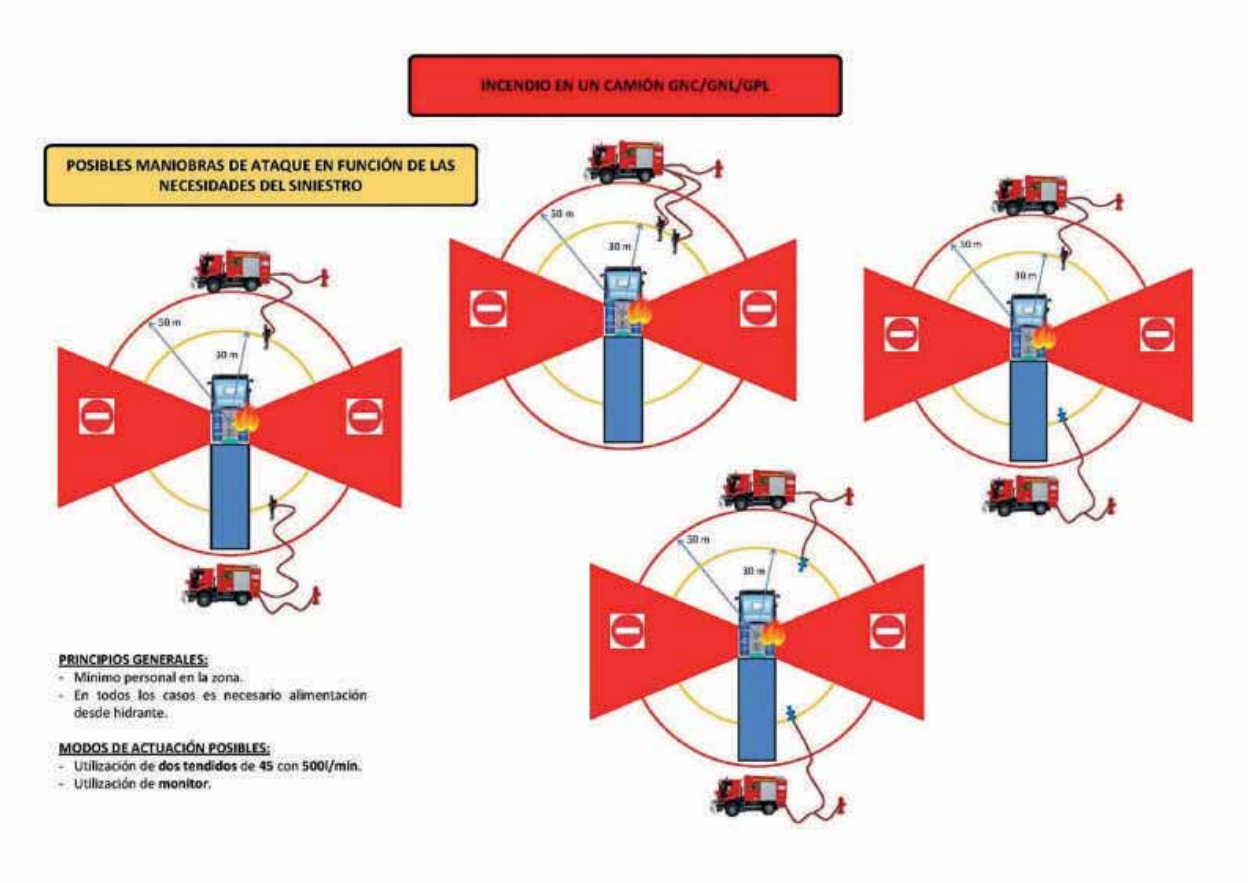
Con un incendio grande del vehículo, se procederá a refrigerar el depósito de gas, cortar las fuentes de radiación calorífica alrededor del depósito y a extinguir el incendio. Pero si no lo es, se extinguirá primero el incendio y posteriormente se refrigerará el depósito si fuera necesario.

Si el fuego afecta al depósito, el procedimiento a seguir consistirá en refrigerar el depósito de gas, cortar las fuentes de radiación calorífica alrededor del depósito y a extinguir el incendio.

Los radios de seguridad vienen descritos en los gráficos.

A continuación, se muestra el anexo del procedimiento donde se detalla gráficamente todo lo anterior.





- Incendio en el exterior del túnel (plataformas):

  En el caso de que se produzca en el exterior del túnel un incendio de un VEA de GNC, GNL o GLP, desde el centro de control se considerará un accidente en la plataforma atendiendo a las actuaciones definidas en el Plan de Actuación en Emergencia/Plan de Intervención y Socorro. En este caso, solicitará la activación del Plan de Socorro Binacional comunicando que se trata de un vehículo de energía alternativa, dato sumamente importante para los medios de emergencia exteriores a la hora de realizar la intervención en el incendio.

  Se aplicarán los mismos protocolos que en el caso de un incendio en el interior del túnel siempre y cuando se tenga en cuenta el análisis operacional de la situación por parte del Agente de explotación encargado de la intervención.

- Accidente con fuga de gas en el interior del túnel:

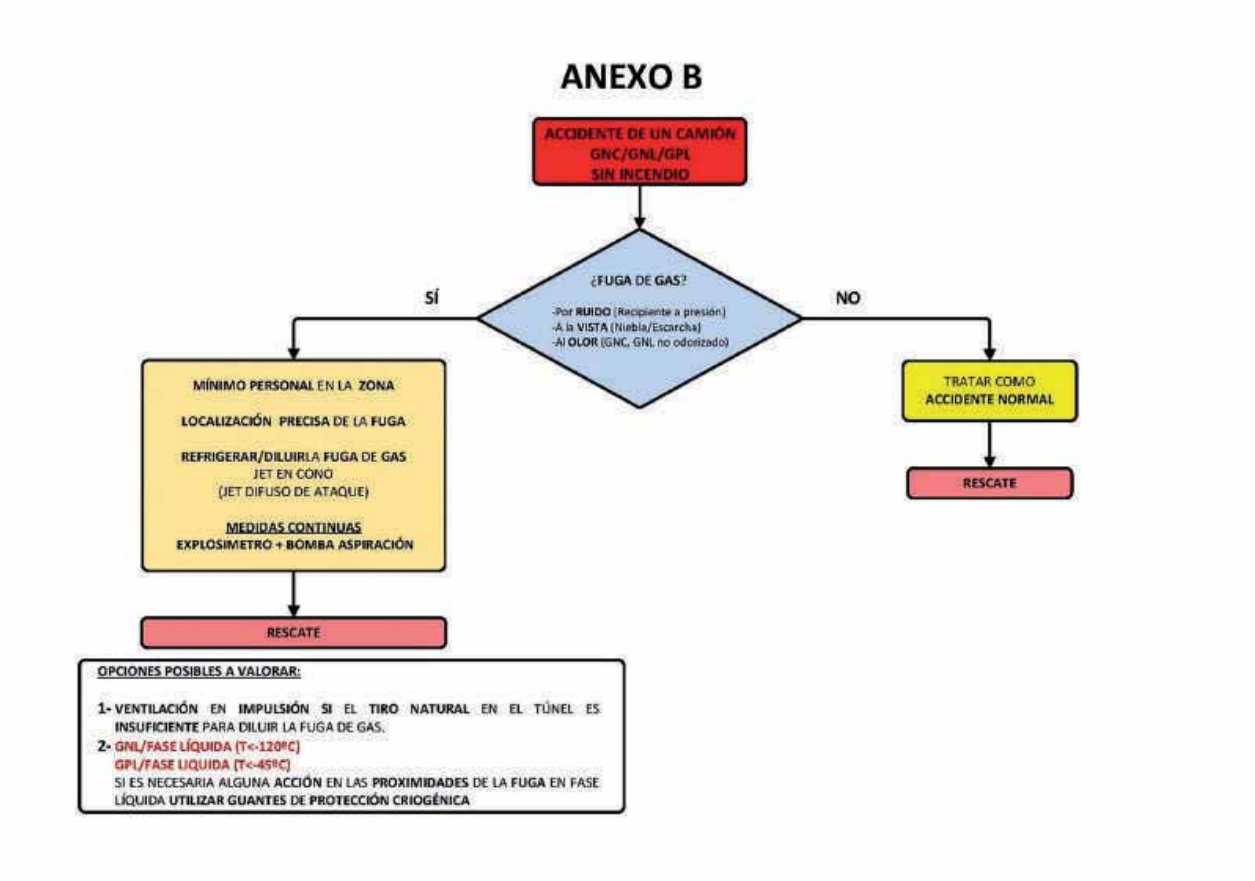
  En el caso de que se produzca en el interior del túnel un accidente con fuga de gas de un VEA de GNC, GNL o GLP, desde el centro de control se considerará un accidente sin incendio atendiendo a las actuaciones definidas en el Plan de Actuación en Emergencia /Plan de Intervención y Socorro. En este caso, solicitará la activación del Plan de Socorro Binacional comunicando que se trata de un vehículo de energía alternativa, dato sumamente importante para los medios de emergencia exteriores a la hora de realizar la intervención en el incendio.

  En el caso de que se produzca un accidente y exista una fuga de gas en el interior del túnel, el Agente de explotación lo detectará bien por el ruido del recipiente a presión, bien por ver una nube o escarcha o bien por el olor a gas. En ese instante, se dispondrá del mínimo personal en la zona, se localiza-

rá el lugar preciso de la fuga, se procederá a refrigerar y/o diluir la fuga con un jet en cono (jet difuso de ataque) y se realizarán medidas continuas en el detector de explosividad, incluyendo la bomba de aspiración destinada para ello. Una vez realizado lo anterior se procederá al rescate de las víctimas.

En el caso de que se produzca un accidente y no exista una fuga de gas en el interior del túnel, se tratará como un accidente normal priorizando el rescate de las víctimas.

A continuación, se muestra el anexo del procedimiento donde se detalla gráficamente todo lo anterior.



CONCLUSIONES

El hecho de que los nuevos sistemas de propulsión utilizados en los vehículos estén aumentando significativamente, permite plantear nuevos horizontes en la explotación de los túneles carreteros, máxime cuando este tipo de vehículos suponen nuevas amenazas que pueden originar daños graves en la infraestructura de los túneles y en los equipos de explotación.

Las intervenciones en los túneles, que ya de por sí son diferentes a las intervenciones a cielo abierto, deben actualizarse a nivel de todos los servicios de emergencia implicados puesto que los vehículos de energía alternativa requieren de un tratamiento específico en caso de emergencia.

Así pues, se abren nuevas perspectivas en cuanto a intervenciones en este tipo de vehículos en los túneles carreteros.

BIBLIOGRAFÍA

Instruction opérationnelle : Interventions pour feu de véhicule á énergie alternative (VEA). SDIS64. Agosto 2016.

Procedimiento de explotación para el paso de vehículos pesados de energía alternativa (VEA). Túnel de Somport. MATINSA. Junio 2019.

A STUDY OF TUNNEL VENTILATION CONTROL AND WATER SPRAY ACTIVATION IN CASE OF FIRE

Atsushi Ichikawa, Musashi Akaishi
East Nippon Expressway Company Ltd., Tokyo, Japan
Nobuyoshi Kawabata
Komatsu University, Komatsu, Japan
Toshiaki Sakaguchi
Sohatsu Systems Laboratory Inc., Kobe, Japan
Bernhard Kohl, Oliver Heger
ILF Consulting Engineers Inc., Graz, Austria

In Japan, water spray systems have been used for more than 50 years and so called semi-automatic operation is adopted by East Nippon Expressway Company Ltd ("NEXCO EAST"). Furthermore, regarding ventilation, "zero flow ventilation", which maintains the airflow speed ideally around 0 m/s to secure safe evacuation environment by holding smoke stratified on the tunnel ceiling in long distance bi-directional tunnel was developed as an effective measure.

On the other hand, in some European countries, a low speed air flow such as from 1 to 3 m/s is kept in case of fire and water spray activation seems to be immediate after fire detection.

The authors have studied the assumed background and main causes of the above water spray and ventilation operational differences between Europe and Japan. Fire Dynamics Simulator ("FDS") developed in the US and the Austrian Tunnel Risk Analysis Model ("TuRisMo") widely used in Europe are adopted to quantify the impact of ventilation control and water spray activation on tunnel fire safety.

According to our study results, NEXCO EAST chooses an operation which secures safe evacuation environment, whereas Europe seems to make a trade-off between a high efficiency of the water spray device and a certain impairment of the environment in the activation zone close to fire. The details are described in the paper with some simulation and risk analysis outcomes. Since both ventilation control and water spray activation play an important role from tunnel safety point of view, the authors consider this report could be fairly contributory for a tunnel safety enhancement.

UN ESTUDIO SOBRE EL CONTROL DE LA VENTILACIÓN DEL TÚNEL Y LA ACTIVACIÓN DEL ROCIADO DE AGUA EN CASO DE INCENDIO

En Japón, los sistemas de pulverización de agua se han utilizado durante más de 50 años y el llamado funcionamiento semiautomático es adoptado por East Nippon Expressway Company Ltd ("NEXCO EAST"). Además, en lo que respecta a la ventilación, se ha desarrollado como medida eficaz la "ventilación de flujo cero", que mantiene la velocidad del flujo de aire idealmente en torno a 0 m/s para garantizar un entorno de evacuación seguro manteniendo el humo estratificado en el techo del túnel en el túnel bidireccional de larga distancia.

Por otra parte, en algunos países europeos, se mantiene un flujo de aire de baja velocidad, de 1 a 3 m/s, en caso de incendio y la activación del agua pulverizada parece ser inmediata tras la detección del fuego.

Los autores han estudiado los supuestos antecedentes y las principales causas de las mencionadas diferencias operativas de rociado de agua y ventilación entre Europa y Japón. Para cuantificar el impacto del control de la ventilación y de la activación del rociado de agua en la seguridad contra incendios en los túneles, se han adoptado el Simulador de Dinámica de Incendios ("FDS"), desarrollado en Estados Unidos, y el Modelo de Análisis de Riesgos en Túneles de Austria ("TuRisMo"), ampliamente utilizado en Europa.

Según los resultados de nuestro estudio, NEXCO EAST elige una operación que garantiza un entorno de evacuación seguro, mientras que Europa parece hacer un compromiso entre una alta eficiencia del dispositivo de rociado de agua y un cierto deterioro del entorno en la zona de activación cercana al incendio. Los detalles se describen en el documento con algunos resultados de simulación y análisis de riesgos. Dado que tanto el control de la ventilación como la activación del agua pulverizada desempeñan un papel importante desde el punto de vista de la seguridad del túnel, los autores consideran que este informe podría contribuir bastante a la mejora de la seguridad del túnel.

UNE ÉTUDE DU CONTRÔLE DE LA VENTILATION DES TUNNELS ET DE L'ACTIVATION DES JETS D'EAU EN CAS D'INCENDIE

Au Japon, les systèmes de pulvérisation d'eau sont utilisés depuis plus de 50 ans et le fonctionnement dit semi-automatique est adopté par la East Nippon Expressway Company Ltd ("NEXCO EAST"). En outre, en ce qui concerne la ventilation, la "ventilation à flux nul", qui maintient la vitesse du flux d'air idéalement autour de 0 m/s pour garantir un environnement d'évacuation sûr en retenant la fumée stratifiée sur le plafond du tunnel dans un tunnel bidirectionnel à longue distance, a été développée comme une mesure efficace.

En revanche, dans certains pays européens, un flux d'air à faible vitesse, de 1 à 3 m/s par exemple, est maintenu en cas d'incendie et l'activation de la pulvérisation d'eau semble être immédiate après la détection du feu.

Les auteurs ont étudié le contexte supposé et les principales causes des différences opérationnelles de pulvérisation d'eau et de ventilation entre l'Europe et le Japon. Le Fire Dynamics Simulator ("FDS") développé aux États-Unis et le modèle autrichien d'analyse des risques dans les tunnels ("TuRisMo") largement utilisé en Europe sont adoptés pour quantifier l'impact du contrôle de la ventilation et de l'activation de l'aspersion d'eau sur la sécurité incendie dans les tunnels.

D'après les résultats de notre étude, NEXCO EAST choisit une opération qui garantit un environnement d'évacuation sûr, tandis que l'Europe semble faire un compromis entre une efficacité élevée du dispositif de pulvérisation d'eau et une certaine dégradation de l'environnement dans la zone d'activation proche du feu. Les détails sont décrits dans l'article avec quelques résultats de simulation et d'analyse des risques. Étant donné que le contrôle de la ventilation et l'activation de la pulvérisation d'eau jouent un rôle important du point de vue de la sécurité des tunnels, les auteurs estiment que ce rapport pourrait contribuer à l'amélioration de la sécurité des tunnels.

1. INTRODUCTION

As PIARC describes in its report 2016, Fixed Fire Fighting Systems (or water spray device in Japan) are gradually recognized worldwide and increasing number of road tunnels install water spray device, but its suitable operation at tunnel fires does not seem to be discussed enough in details.

Among tunnel safety facilities emergency ventilation and water spray are the most critical devices effective usage of which tunnel safety relies on. Each facility has to operate properly and at the same time they have to work together optimally as a whole system.

East Nippon Expressway Company Ltd. ("NEXCO EAST") adopts an operational procedure which blows longitudinal airflow velocity at 2 m/s to extract smoke toward exit portal in unidirectional tunnels, and maintains the lowest airflow speed ideally at 0 m/s to secure safe evacuation space by holding smoke stratified on the tunnel ceiling in long distance bi-directional tunnels. Water spray device for the principal purpose of avoiding spread of fire is activated at three (3) minutes after fire confirmation in unidirectional tunnels, and at ten (10) minutes in bidirectional tunnels to maintain the safe and smooth evacuation space set by low-speed airflow ventilation control. It could be even useful in unidirectional tunnels when a traffic congestion occurs.

On the other hand, the inquiries to European nations on fire safety operations clarify that Germany employs the low-speed longitudinal airflow ventilation control toward tunnel portals at 60 sec after fire detection. They implement the critical velocity of 3 m/s under free-flowing traffic and 1.0~1.5 m/s under congested traffic in unidirectional tunnels [1]. Sweden is planning in the E4 tunnel project the safety operation of the longitudinal airflow at 3.0 m/s towards tunnel portals and water spray activation at the same time immediately after fire detection [2]. Austria and Germany employ water spray activation at 30 sec after fire detection signal is issued within 60 sec of fire breakout.

NEXCO EAST chooses an operation which secures safe evacuation environment and lets people evacuate promptly, whereas Europe (where water spray device is not a standard safety measure) makes a trade-off between a high efficiency of the water spray device and a certain impairment of the evacuation environment in the activation zone close to the fire. These assumptions seem to lead to the operational difference between Europe and Japan. Although mode of operations of safety facilities is different, both ventilation control and water spray activation play an important role from tunnel safety point of view.

We have evaluated quantitatively different emergency operation strategies of ventilation control and water spray device under the multiple fire scales and different traffic patterns at road tunnel fires using Fire Dynamics Simulator ("FDS") [3] developed in the US and the Austrian Tunnel Risk Analysis Model ("TuRisMo") [4] widely used in Europe. Tunnel fire followed by ventilation control and water spray activation is simulated by FDS and fire risk value will be evaluated by TuRisMo in the project.

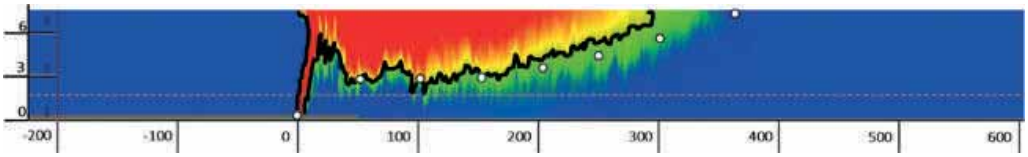
2. BRIEF OUTLINE OF FDS MODEL AND RISK ANALYSIS MODEL

2-1. FDS model and its validation

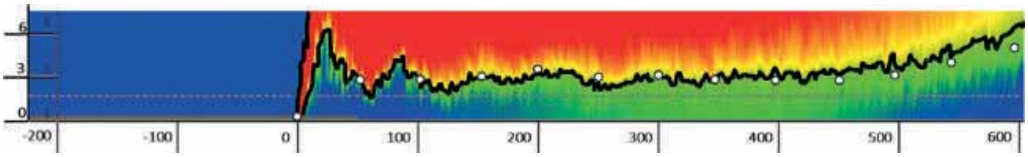
FDS is a CFD software with an emphasis on smoke and heat transport from fires released in 2000 by the National Institute of Standards and Technology ("NIST") of the US Department of Commerce. The software is available on MS Windows, Mac OS X and Linux. FDS assuming a low Mach number approximation solves Navier-Stokes equations, mass conservation equations, energy conservation equations, and chemical species conservation equations. Large Eddy Simulation ("LES") is used as a mathematical model for turbulence caused by fire.

FDS simulates the aerodynamics and heat behavior caused by an operation of ventilation and water spray in a tunnel. The applied FDS was validated by comparing the environmental variables critical in evacuation such as smoke propagation measured at an actual tunnel fire test conducted in the past with those obtained in the FDS simulation [5].

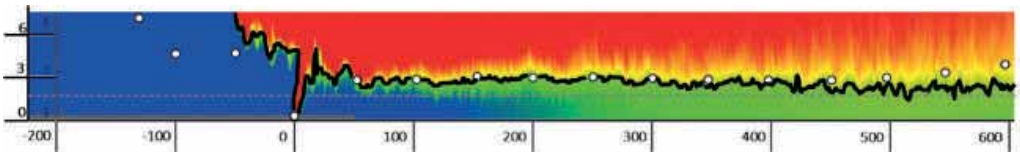
Figure 1 shows the simulated smoke density propagation compared with the measured smoke density of the extinction coefficient ("EC") at 0.4/m represented with the dots. The simulated smoke density of EC=0.4 illustrated as a black isoline is very close to the measured value at 2, 4, 6, and 12minutes after a fire breakout. In Japan, EC value of 0.4/m has a special meaning in the safety design and operation since people are assumed to stop moving and thus to become difficult to evacuate when they encounter the smoke density of EC=0.4/m.



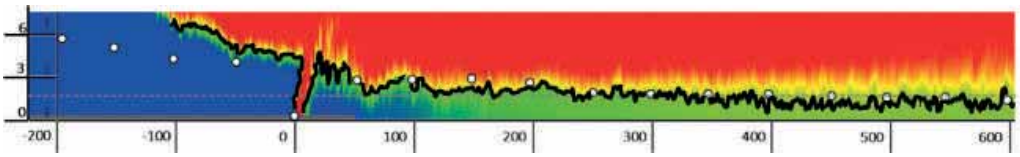
(a) 2 minutes after fire occurred



(b) 4 minutes after fire occurred



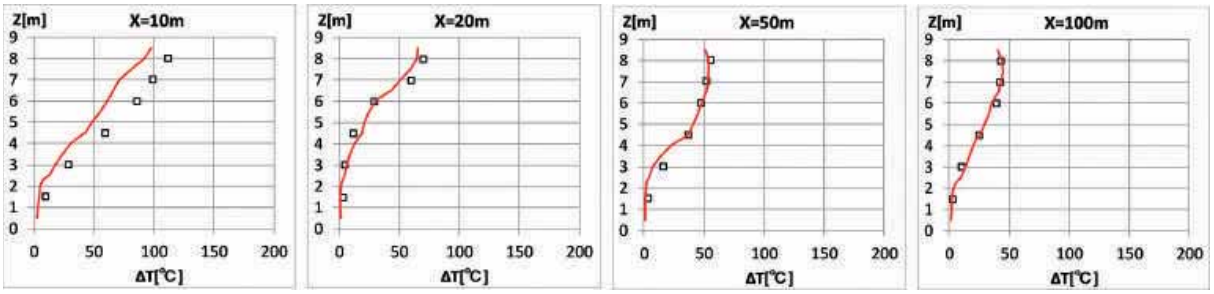
(c) 6 minutes after fire occurred



(d) 12 minutes after fire occurred

Figure 1. Example of FDS smoke density propagation simulation and dots for actual test

The temperature rises and propagation due to tunnel fire play an important role with respect to the dynamic behavior of gases. Simulated temperature rises at five (5) minutes after fire breakout on the center of the tunnel cross section at the location 10m, 20m, 50m and 100m from the fire location were compared with the measured temperature rise data. Figure 2 illustrates both simulated temperature rise and measured data, where the curve indicates simulation results and dots measured data. The x-dimension is the temperature rise and the y-dimension the height from the ground. The FDS simulation results indicate a good fit to the temperature rise measurement, reproducing the temperature dynamics due to tunnel fire.



(a) 10m (b) 20m (c) 50 m (d) 100 m

Figure 2. Temperature rise at 10m, 20m, 50m and 100m: curves for simulation result and dots for actual test

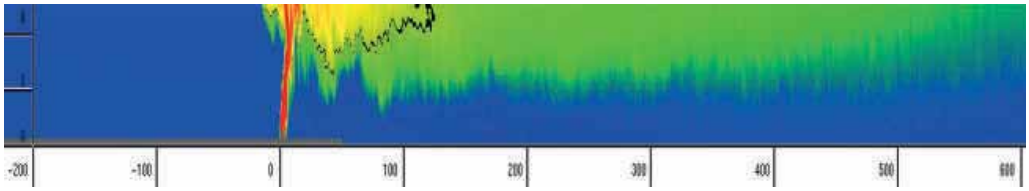
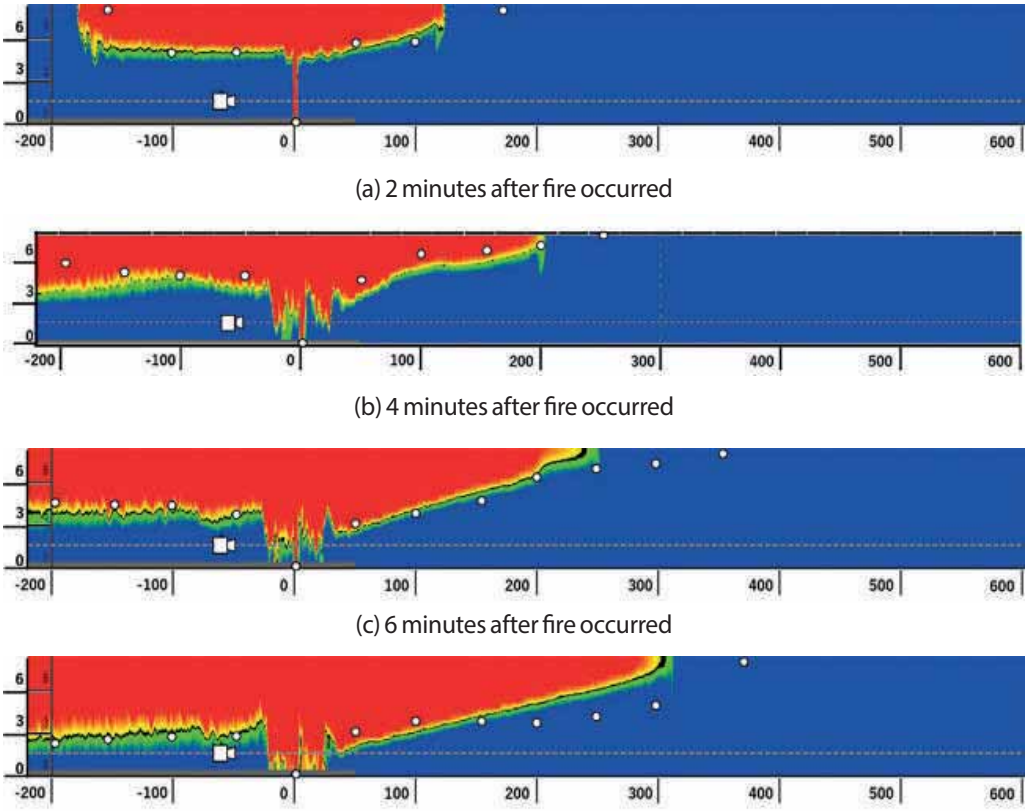


Figure 3. Simulated temperature rise at five (5) minutes after fire breakout

Finally, the smoke propagation and falling near fire location with the zero-flow ventilation and water spray activation are compared in measurement and simulation. Figure 4 is four (4) frames of the video record taken at 60 m away from the fire location. Figure 5 shows measured smoke density profile of EC=0.4 with the dots at two (2) minutes, four (4) minutes, six (6) minutes and ten (10) minutes, where water spray was activated three (3) minutes after fire breakout, comparing with the FDS simulation results. Measured slow falling down of the smoke within 50 m zone and smoke density propagation throughout the tunnel were reproduced closely by the FDS simulation.

(a) 2 min (b) 4 min (c) 6 min (d) 10 min

Figure 4. Video image of smoke falling down near fire location at 2, 4, 6, and 10 min taken at 60 m away from the fire



(a) 2 minutes after fire occurred

(b) 4 minutes after fire occurred

(c) 6 minutes after fire occurred

(d) 10 minutes after fire occurred

Figure 5. FDS simulation results compared with measured data (dots)

2-2. Tunnel risk analysis model

TuRisMo 2.0 is a tunnel-risk analysis methodology widely used in Europe as defined in the Austrian national guideline RVS 09.03.11 [1]. TuRisMo 2.0 uses a fully integrated approach which combines a quantitative frequency analysis based on statistical evaluations (event-tree approach) and a quantitative consequence analysis that includes a collision-only (mechanical) part and a distinct fire consequence model (Figure 6).

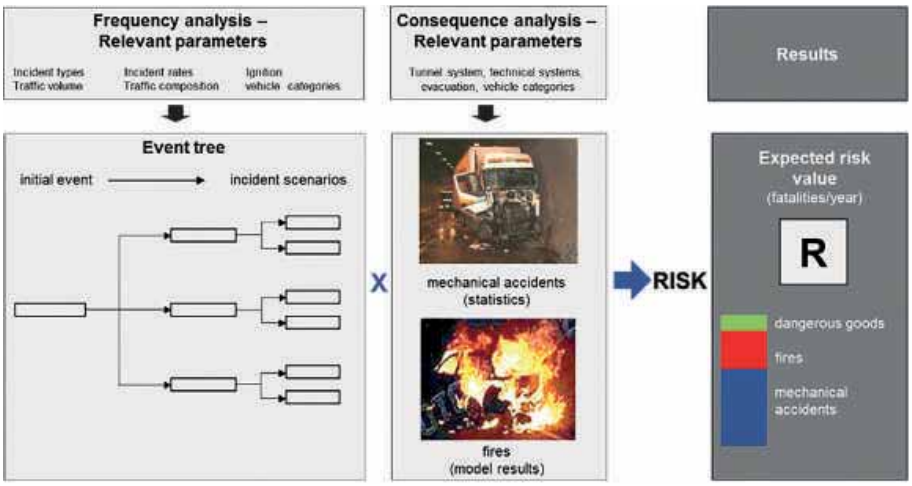


Figure 6. Outline of the tunnel-risk analysis methodology TuRisMo

The fire consequence model is based on a combination of 1D flow simulation, 3D-CFD simulation (FDS) and 1D evacuation simulation.

The detailed approach for fire consequence modelling is based on the following principle:

1. A transient one-dimensional airflow simulation is performed, taking into account all important influencing factors such as traffic volume, fire location, ventilation design and meteorological boundary conditions;
2. The predicted development of the longitudinal airflow velocities is then used as boundary condition in a three-dimensional CFD simulation utilizing the Fire Dynamics Simulator software (FDS) in which local effects such as back-layering and smoke stratification are examined;
3. Visibility, heat and toxic-gas concentrations generated in the three-dimensional CFD simulation are then combined with person-exposure distributions, which depend on the traffic configuration after the incident in evacuation simulation. Based on this superposition of hazards (smoke, temperature, etc.) and people, smoke density profile determining the walking ability of people in Japan and accumulation model describing the effects of toxic gasses on evacuation speed and survivability of people in Europe count the expected total number of disabilities and fatalities respectively.

In this paper, the fire consequence models varying fire scale, airflow velocity control and water spray are investigated.

3. EVALUATION OF VARIOUS OPERATION STRATEGIES OF VENTILATION CONTROL AND WATER SPRAY ACTIVATION

This chapter describes conditions for risk analysis, evaluation models of evacuation for Japan and Europe, and their safety policies. After that, the results of risk analysis in various strategies of ventilation control and water spray activation are shown, compared and considered.

3-1. Conditions for risk analysis

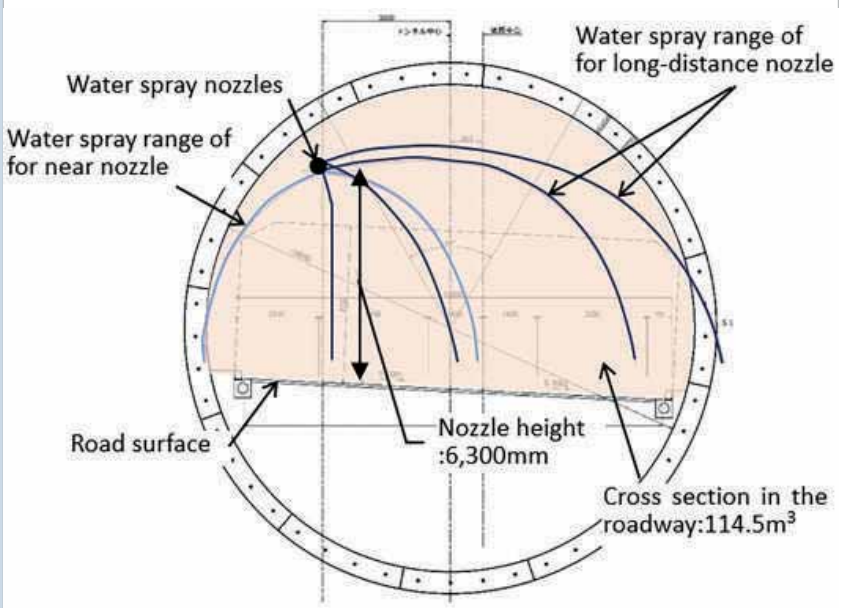
(a) Specifications of tunnel and water spray equipment

The specifications of the tunnel and water spray equipment used in this study are shown in Tables 1 and 2. As for the tunnel specifications, a three-lane tunnel is assumed as an urban tunnel in NEXCO EAST. The water spray equipment is the standard adopted by NEXCO EAST.

Table 1 Specifications of tunnel

Length	1,113m
Cross section in the roadway	114.5m^2
Roadway representative dimensions	11.1m
Gradient in the longitudinal direction	0%
Thermal conductivity	0.217W/(m/K) Assuming installation of fireproof board

Table 2 Specifications of water spray equipment

Types of water spray nozzles		For long-distance (2 nozzles)	For near (1 nozzle)
Water spray amount[liter/minute]		270	110
Water spray particle size		1mm (as a representative)	
Installation conditions	Nozzle height	6,300mm from the road surface	
	Nozzle interval	5m	
Cross-section diagram			

b) Traffic conditions and fire breakout model

Table 3 shows the traffic conditions and fire breakout models to be compared in this study. When a fire broke out, the vehicles downstream from the fire point would run at the preset speed, and the vehicles upstream from the fire point would queue up with the fire point as the head.

In addition, since the piston force of traffic is generated in the case of free flow (80 km/h), it is calculated separately by one-dimensional simulation, and in the case of traffic congestion (5, 0 km/h), mechanical ventilation is used to improve the environment inside the tunnel. It was assumed that 2 m/s was generated, and it was given as the initial wind speed in the tunnel.

Table 3 Traffic conditions and fire breakout models

Traffic conditions	Vehicle speed	Vehicle layout image after a fire	Initial wind speed in the tunnel
Free flow	80 km/h		6.1 m/s
Stop-and-go congestion	5 km/h		2 m/s
Complete congestion	0 km/h		2 m/s

(c) Fire scale

The fire scales simulated in this study were 5 MW (passenger car fire scale), 30 MW (large vehicle fire scale in Japan), and 50 MW (large vehicle fire scale in Europe). The Heat Release Rate ("HRR") model of fire was based on the model of "EUREKA Bus Fire Experiment".

In this study, it is necessary to anticipate the cooling effect and fire spread prevention effect of water spraying. Since the time from fire detection to the start of water spray is compared in three cases (0 minutes, 3 minutes, 10 minutes), different HRR curves were set for each. Table 4 shows the effects of water spray effect for each fire scale. These values are based on the results of the study by German Federal Highway Research Institute [6]. Figure 7 shows the transition of HRR in a fire scale of 30 MW as an example.

Table 4 Effect of water spray on HRRs

Time from fire to water spray	5MW Fire	30MW Fire	50MW Fire
After reaching the maximum HRR	Reduces to 50 % of the maximum HRR in 2 minutes	Reduces to 75 % of the maximum HRR in 2 minutes	
Less than maximum HRR and 50 % or more of the maximum HRR)	Reduces to 50 % of the maximum HRR in 2 minutes		
Less than 50 % of the maximum HRR	Maintains HRR when spraying water		

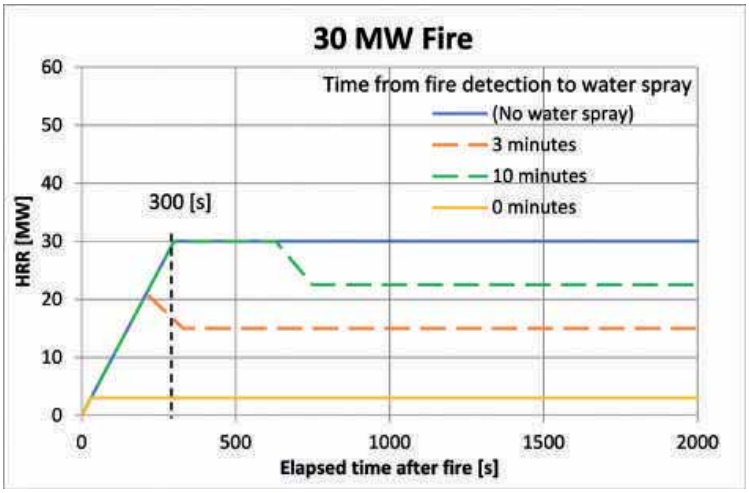


Figure 7. HRR curves modified by water spray in 30 MW fire

3-2. Evaluation models of evacuation and safety policies

The risk analysis was performed using two evaluation models of evacuation, Japanese and European, as shown in Table 5.

The major difference between the two models is the threshold for the degree of damage. According to the Japanese evaluation model of evacuation, people are judged to stop moving when they meet the smoke densi-

ty of EC=0.4/m at the height of 1.5 m from the road surface. This is the definition of the degree of damage where Japan's policy prioritizes ensuring a safe evacuation space in tunnel fires.

On the other hand, in the European evaluation model of evacuation, people die when toxic gas (CO2, HCN) and temperature accumulation reach the preset threshold. This is the definition of the degree of damage in Europe where the European policy prioritizes reducing the death poll due to the accumulation of toxic gas and high temperature in tunnel fires.

Table 5 Comparison of evaluation models of evacuation

	Japan	Europe
Vehicles downstream of the fire point	• Continue to the tunnel exit without getting off	
Evacuees' walking speed	• 1 m/s	• 18 types by gender, age, and personality • 0.36 m/s (when meeting smoke density of EC=0.5/m)
Evacuation starting conditions	• Evacuees at the fire point are immediate • Evacuees near the fire point start to see other evacuees • Evacuees other than near the fire point 90 seconds after the fire broke out • For large buses, the last passenger starts evacuating 2 minutes after the first passenger starts evacuating	• 3% of people do not evacuate and stay there • When meeting smoke density of EC=0.1/m • For large buses, the last passenger starts evacuating 40 seconds after the first passenger starts evacuating
Degree of damage threshold	• Meeting smoke density of EC=0.4/m	• Suction and accumulation of toxic gas (There is no accumulation of toxic gas when the vehicle is running, and the accumulation starts from the time when people start evacuation on foot)
Emergency door interval and efficiency	• At 360m intervals, 113 people /min Emergency access passage	
Others	• Evacuees on foot evacuate to the nearest evacuation door, but if the emergency door is within 20 m from the fire point, they will not evacuate toward the fire point and evacuate to the next emergency door.	

3-3. Studied emergency operation strategies and their evaluation by risk analysis

(a) Emergency operation strategies

Table 6 and Figure 8 show the emergency operation strategies and their time charts to be compared in this study. Strategy 1 and 2 are equipment operations that are applied as standard in NEXCO EAST, and are applied to unidirectional tunnels and bi-directional tunnels, respectively. If traffic congestion occurs even in unidirectional tunnels, Strategy 2 could be applied because the arrangement of vehicles remaining in the tunnel after a fire is similar to that of bi-directional tunnels. Therefore, it is the subject of comparison in this study. Strategy 3 assumes equipment operation in Sweden, Europe.

Table 6 Equipment operation strategies

Strategy No.	Time from fire detection to water spray	Ventilation control	Applicable tunnels
Strategy 1 (3-2)	3 min	2 m/s	Unidirectional (NEXCO EAST)
Strategy 2 (10-0)	10 min	0 m/s	Bi-directional and suggested in unidirectional (NEXCO EAST)
Strategy 3 (0-3)	0 min	3 m/s	Unidirectional (Europe)

Figure 8. Time chart of emergency operation strategies

(b) Risk analysis cases and results

- Risk analysis was performed using the two evaluation models of evacuation, three traffic conditions, three emergency operations, and three fire scales shown in Table 7. The risk value is the degree of damage 30 minutes after the fire broke out. It should also be noted that the risk value in the Japanese evaluation model of evacuation indicates the number of people who stop evacuation, and the risk value in the European evaluation model of evacuation indicates the number of fatalities.

- As mentioned above, since the concept of evaluation models of evacuation is different, it is not possible to make a general comparison. The numerical results are shown in Table 7, where "o" in the emergency operations column indicates actually adopted strategy. Strategy 1 is Japanese equipment operation for free traffic flow and strategy 2 is for traffic congestion. Strategy 3 is employed in Europe for all kinds of traffic.

Table 7 Risk analysis results
(Japanese model: Number of people who are difficult to evacuate)
(European model: Number of fatalities)

Evaluation model of evacuation	Traffic conditions	Emergency operations	Fire scales			Case No
			5MW	30MW	50MW	
Japanese model	Free flow 80 km/h	o Strategy 1 (3-2)	0.000	0.000	0.000	JP-80-1
		Strategy 2 (10-0)	0.000	0.000	0.872	JP-80-2
		Strategy 3 (0-3)	0.000	0.884	0.884	JP-80-3
	Traffic congestion (5 km/h)	Strategy 1 (3-2)	0.000	1.580	4.777	JP-5-1
		o Strategy 2 (10-0)	0.000	0.000	0.000	JP-5-2
		Strategy 3 (0-3)	0.000	0.928	12.684	JP-5-3
	Traffic congestion (0 km/h)	Strategy 1 (3-2)	12.14	46.347	66.514	JP-0-1
		o Strategy 2 (10-0)	0.000	0.000	0.000	JP-0-2
		Strategy 3 (0-3)	3.493	49.661	83.639	JP-0-3
European model	Free flow 80 km/h	Strategy 1 (3-2)	0.000	0.083	0.083	EU-80-1
		Strategy 2 (10-0)	1.047	3.345	4.401	EU-80-2
		o Strategy 3 (0-3)	0.000	0.000	0.000	EU-80-3
	Traffic congestion (5 km/h)	Strategy 1 (3-2)	0.000	0.083	0.083	EU-5-1
		Strategy 2 (10-0)	0.166	2.034	1.634	EU-5-2
		o Strategy 3 (0-3)	0.000	0.000	0.042	EU-5-3
	Traffic congestion (0 km/h)	Strategy 1 (3-2)	0.000	0.316	0.316	EU-0-1
		Strategy 2 (10-0)	2.043	3.434	3.358	EU-0-2
		o Strategy 3 (0-3)	0.000	0.119	0.277	EU-0-3

3-4. Japanese evaluation model of evacuation vs. European evaluation model of evacuation

3-4-1. Evaluation of the operation strategies employed in Japan and Europe

Japan employs Strategy 1 under free flow traffic and suggests to employ Strategy 2 under congested traffic in unidirectional tunnels. Table 7 indicates the risk values in case JP-80-1, JP-5-2 and JP-0-2 are zero, and the strategies which are currently employed or suggested to employ are confirmed the best under all traffics and fire scales.

Europe employs Strategy 3 under all traffics in unidirectional tunnels. Table 7 indicates the risk values in case EU-80-3, EU-5-3 and EU-0-3 are either zero or close to zero. The strategy which is currently employed is confirmed the best under all traffics and fire scales.

Therefore, it is confirmed that each operation strategy adopted in either Japan or Europe is appropriate when it is assessed in its own evaluation model of evacuation.

3-4-2. Evaluation of the strategies unemployed in Japan and Europe

-This section compares and considers Japanese and European equipment operations based on the risk analysis results for each traffic condition.

(a) Free flow traffic: 80 km/h

In free flow, there was no significant difference in risk value of operation strategy in the evaluation model of evacuation between Japan and Europe. In Case : JP-80-1, vehicles on the downstream side of the fire point run through to the tunnel exit at the same speed. Therefore, it can be seen that evacuation can be done without exposure to smoke density of EC=0.4 or higher (Figure 9).

On the other hand, in Case : EU-80-1, there are no fatalities on the downstream side of the fire point as in Case : JP-80-1, but the remaining people seem to die near the fire point. This is because the European evaluation model of evacuation assumes that 3% of people will definitely stay in place as a rule (Figure 10).

In any case, there was no big difference between Japan and Europe during free flow, and it was found that the optimum strategy was selected according to each evaluation model of evacuation.

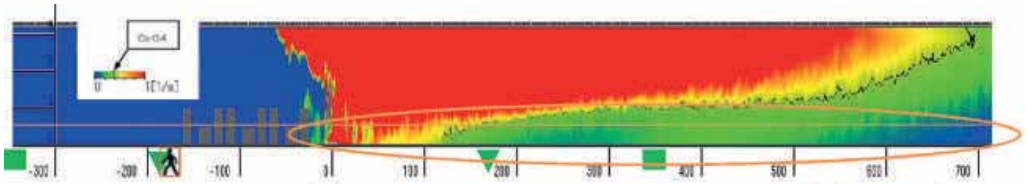


Figure 9. Smoke density of EC of 5 minutes after fire (Case : JP-80-1 (30MW))

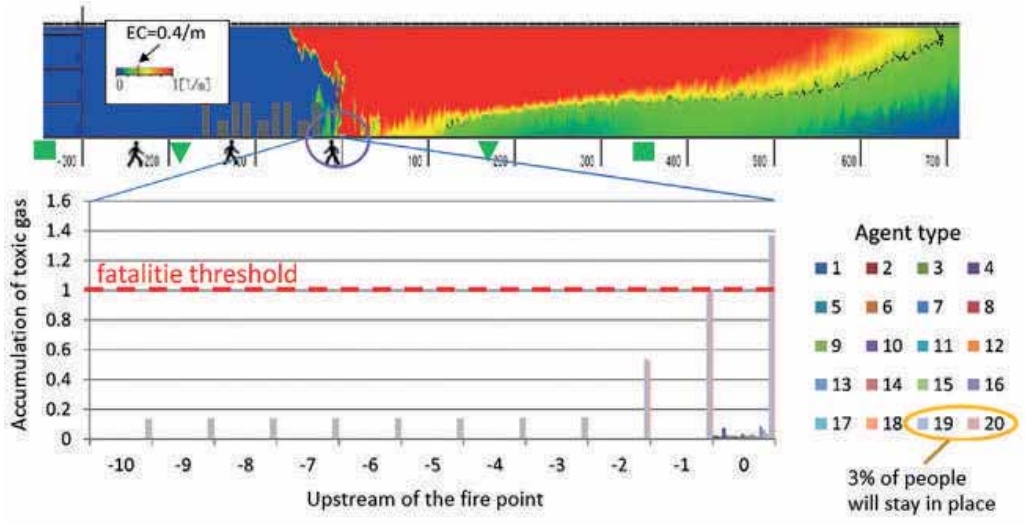


Figure 10. Smoke density of EC of 5 minutes after fire (Case : EU-80-1 (30MW))

(b) Congested traffic: 0 km/h

In the case of complete congestion (0 km/h), the applied same strategy caused differences in risk values in the evaluation model of evacuation between Japan and Europe.

In Case : JP-0-2, the diffusion of smoke is prevented by "zero flow ventilation ", and the smoke is kept in the upper part of the tunnel cross section to secure the evacuation environment. The water spray was 10 minutes

after the fire was detected, and the evacuation could be completed before the smoke fell due to the water spray, no evacuation difficulty occurred, and the risk value was zero (Figure 11). In Case : JP-0-3, smoke density of EC=0.4 is diffused at a location about 50 m downstream of the fire point by spraying water immediately after the fire breaks out. Therefore, the risk value is increasing due to the occurrence of people who have difficulty evacuating in the section 50 m downstream from the fire point (Figure 12).

- On the other hand, in Case : EU-0-2, it is assumed that 3% of the evacuees will stay in place, the accumulation of toxic gas progresses due to the smoke whose concentration has increased due to the zero wind speed, resulting in fatalities. Figure 13 shows the simulation results 10 minutes after the fire broke out. It can be seen that about 0.12 fatalities occur near the fire point. In the case of the European evaluation model of evacuation, the risk value of Strategy 3 was the lowest. Fatalities have occurred due to the suction and accumulation of toxic gas on the downstream side of the fire point. As shown in Figure 14, the amount of smoke generated is reduced by discharging the water spray at an early stage, and fresh air is sent by blowing the wind to the downstream side. However, as mentioned earlier, the European evaluation model of evacuation assumes 3% residuals, resulting in 0.03 fatalities 15 minutes after the fire broke out on the downstream side of the fire point.

- It was also found that the optimal strategy differs in the Japanese and European evaluation model of evacuation during the congested traffic. This is due to the difference in the safety policy in tunnel fires, which prioritizes securing an evacuation environment in Japan, and prioritizes controlling fires and minimizing the accumulation of toxic gas in Europe. We don't think that either is technically superior or inferior. It was found that the optimal strategy was selected according to each evaluation model of evacuation based on its tunnel safety policy.

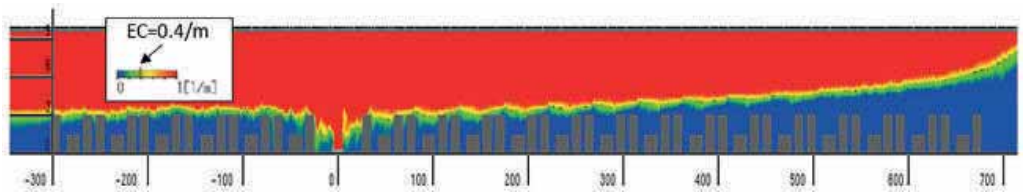


Figure 11. Smoke density of EC of 10 minutes after fire (Case : JP-0-2 (30MW))

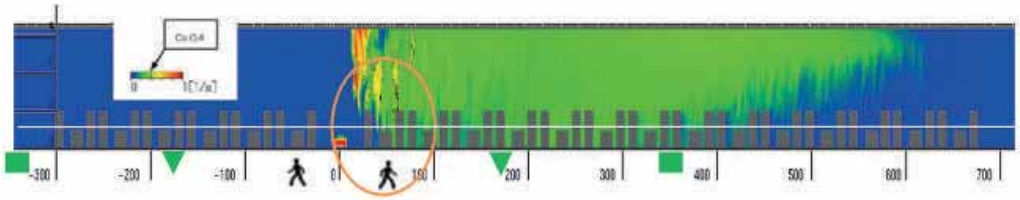


Figure 12. Smoke density of EC of 10 minutes after fire (Case : JP-0-3 (30MW))

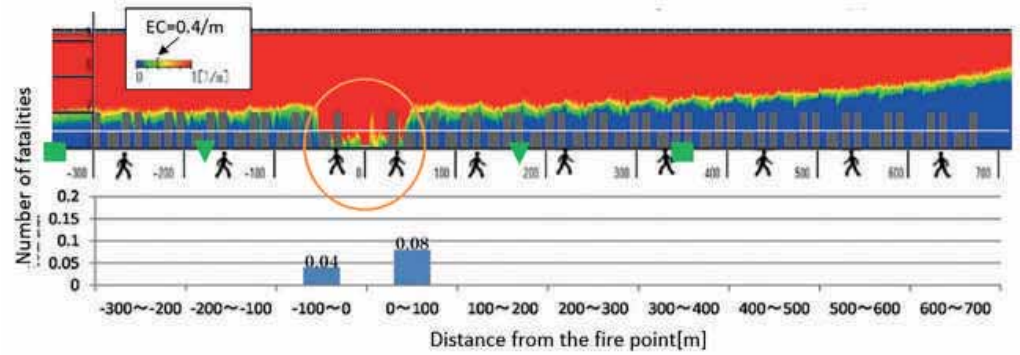


Figure 13. Smoke density of EC of 10 minutes after fire (Case : EU-0-2 (30MW))

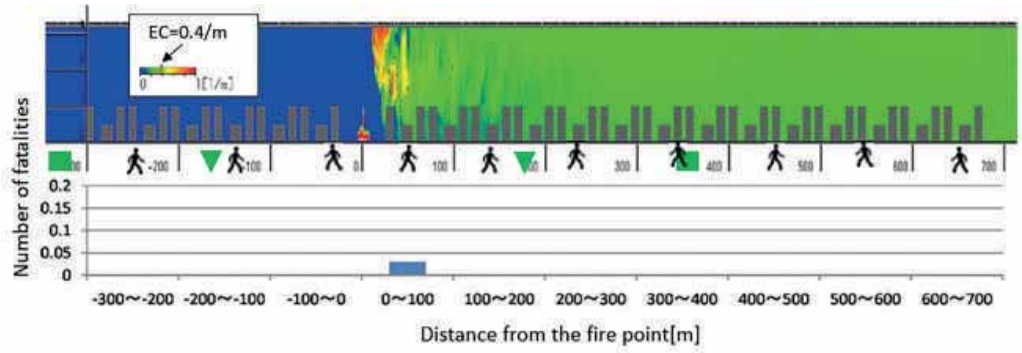


Figure 14. Smoke density of EC of 15 minutes after fire (Case : EU-0-3 (30MW))

(c) Congested traffic: 5 km/h

In the case of traffic congestion (5 km/h), the tendency was the same as the result of traffic congestion (0 km/h), and it was found that the optimal strategy was adopted for each evaluation model of evacuation in Japan and Europe.

4. CONCLUSIONS

As a result of risk analysis, there has been no significant difference in the risk value between the equipment operations strategies in Japan and Europe in the case of a fire in a unidirectional tunnel during free flow traffic condition. However, in the case of fires in unidirectional tunnels during traffic congestion, Japan has proposed equipment operations strategy that correspond to evaluation model of evacuation that emphasize the evacuation environment. On the other hand, Europe seems to have adopted equipment operations strategy that targets to minimize the spread of fires especially for minimizing the number of fatalities.

This difference in equipment operation strategy comes from the difference in the assumed evaluation model of evacuation and safety policies, however, it does not mean that one is technically right and the other is wrong. In other words, the present equipment operation is the best one in each evaluation method.

It depends on what is given top priority to as a road administrator. Namely it is whether the highest priority is given to securing an evacuation environment or preventing the spread of fire.

Japan considers it is necessary at tunnel fires to operate equipment to maintain the evacuation environment as much as possible, prioritizing evacuation. The present emergency operation strategy has been successfully used for a long time in many tunnel fire cases. The safety policy including equipment emergency operation has not been paid attention or discussed so much compared with the safety equipment itself. More attentions to the safety policy in international communities like PIARC are anticipated.

5. REFERENCES

[1] "Guideline for Equipment and Conduction of Road Tunnels", RABT: German Road and Transportation Research Association, Cologne, 2006.

[2] "Study Report on Maintenance Technology Trend in Overseas Countries (in Japanese)", Nexco-East Engineering Company Ltd., and Express Highway Research Foundation, 2017.

[3] "FDS Dynamics Simulator User's Guide", NIST Special Publication 1019, Sixth Edition, National Institute of Standard and Technology, November 4, 2013.

[4] "TuRisMo User Manual: Upgrading of the Austrian tunnel risk model TuRisMo 2.0 -Tunnel Risk Working Group Report", Austrian Ministry of Transport, Innovation and Technology, Vienna, 2015.

[5] A. Ichikawa, K. Takahata, K. Toeda, N. Kawabata, T. Sakaguchi, T. Matsumoto, B. Kohl and O. Senekowitch, "Validation of 3D Fire Simulator FDS for evaluation of ventilation control and water spray activation road tunnel fires with risk analysis model", 18th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation & Fire in Tunnels, Athens, Greece, September 25-27, pp645-657, 2019.

[6] H. Kammerer, B. Kohl, A. Muhlberger, P. Gast and C. Sistenich, "The Implementation of FFFS in the Existing Road Tunnel Safety Environment", Seventh International Symposium on Tunnel Safety and Security", Montreal, Canada, March 16-18, pp293-304, 2016.

USING EXISTING RADAR INFRASTRUCTURE FOR TUNNEL SAFETY MANAGEMENT AND EMERGENCY RESPONSE

Sebastian Baucutt
Product Manager, Navtech Radar

Road tunnel fire safety usually involves high uncertainty and high-stakes decisions. Using familiar systems in the event of an emergency is a key part of minimising risk and increasing confidence in decision making. This speed of response is increased further by ensuring that systems are accessible remotely before arriving at an incident. By improving early awareness within in an incident it is possible to reduce the impact and save lives.

Using existing ITS radar technology for stopped vehicle detection in the event of an incident can maximise the information available to emergency services, improving emergency preparedness. This consists of two key benefits, the first being the ability of radar to 'see' through fog, smoke, fire and still accurately detect vehicle and pedestrian positions. When compared to traditional CCTV and thermal cameras, six minutes into a controlled fire exercise in a tunnel, the control centre has no visibility of the situation.

The second benefit is to provide operators and emergency services with a remotely accessible visual map of an incident. Each vehicle and pedestrian is detected, tracked, and identified. When an incident occurs, this situational awareness solution transmits the tracked information in real time, directly to the tunnel operators. By reducing the reliance on in-tunnel operatives and emergency telephone users this enable a smoother, faster, and safer response – minimising casualties, risk to emergency services, and response time.

UTILIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DE RADAR EXISTENTE PARA LA GESTIÓN DE LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES Y LA RESPUESTA A LAS EMERGENCIAS

La seguridad contra incendios en túneles de carretera suele implicar una gran incertidumbre y decisiones de alto riesgo. El uso de sistemas familiares en caso de una emergencia es una parte clave para minimizar el riesgo y aumentar la confianza en la toma de decisiones. Esta velocidad de respuesta aumenta aún más al garantizar que los sistemas sean accesibles de forma remota antes de llegar a un incidente. Al mejorar la conciencia temprana dentro de un incidente, es posible reducir el impacto y salvar vidas.

El uso de la tecnología de radar ITS existente para la detección de vehículos detenidos en caso de incidente puede maximizar la información disponible para los servicios de emergencia, mejorando la preparación para emergencias. Esto consta de dos beneficios clave, el primero es la capacidad del radar para "ver" a través de la niebla, el humo, el fuego y aún así detectar con precisión las posiciones de vehículos y peatones. En comparación con las cámaras térmicas y de circuito cerrado de televisión tradicionales, seis minutos después de un ejercicio de fuego controlado en un túnel, el centro de control no tiene visibilidad de la situación.

El segundo beneficio es proporcionar a los operadores y servicios de emergencia un mapa visual accesible de forma remota de un incidente. Cada vehículo y peatón es detectado, rastreado e identificado. Cuando ocurre un incidente, esta solución de conciencia situacional transmite la información rastreada en tiempo real, directamente a los operadores del túnel. Al reducir la dependencia de los operarios en el túnel y los usuarios de teléfonos de emergencia, esto permite una respuesta más fluida, rápida y segura, lo que minimiza las víctimas, el riesgo para los servicios de emergencia y el tiempo de respuesta.

UTILISATION DE L'INFRASTRUCTURE RADAR EXISTANTE POUR LA GESTION DE LA SÉCURITÉ DES TUNNELS ET LES INTERVENTIONS D'URGENCE

La sécurité incendie des tunnels routiers implique généralement une grande incertitude et des décisions à enjeux élevés. L'utilisation de systèmes familiers en cas d'urgence est un élément clé pour minimiser les risques et accroître la confiance dans la prise de décision. Cette rapidité de réponse est encore augmentée en s'assurant que les systèmes sont accessibles à distance avant d'arriver sur un incident. En améliorant la prise de conscience précoce d'un incident, il est possible de réduire l'impact et de sauver des vies.

L'utilisation de la technologie radar STI existante pour la détection des véhicules arrêtés en cas d'incident peut maximiser les informations disponibles pour les services d'urgence, améliorant ainsi la préparation aux situations d'urgence. Cela se compose de deux avantages clés, le premier étant la capacité du radar à "voir" à travers le brouillard, la fumée, le feu et à détecter avec précision les positions des véhicules et des piétons. Comparé à la vidéosurveillance traditionnelle et aux caméras thermiques, six minutes après le début d'un exercice de tir contrôlé dans un tunnel, le centre de contrôle n'a aucune visibilité sur la situation.

Le deuxième avantage est de fournir aux opérateurs et aux services d'urgence une carte visuelle accessible à distance d'un incident. Chaque véhicule et chaque piéton est détecté, suivi et identifié. Lorsqu'un incident survient, cette solution de connaissance de la situation transmet les informations de suivi en temps réel, directement aux opérateurs du tunnel. En réduisant la dépendance vis-à-vis des opérateurs du tunnel et des utilisateurs de téléphones d'urgence, cela permet une réponse plus fluide, plus rapide et plus sûre - minimisant les pertes, les risques pour les services d'urgence et le temps de réponse.

1. BACKGROUND – STOPPED VEHICLE DETECTION

Stopped vehicles in live lanes are a recognised problem on road networks worldwide. Anywhere that a vehicle stops amongst moving traffic there is a high risk of a secondary incident. This problem is increased in areas where there is nowhere for a driver with a known problem to move to safety before the vehicle stops. Examples of this can include in roads with no hard shoulder, including tunnels, and in roadworks. In these situations, response time to the initial stop is critical, to either stop traffic approaching the stopped vehicle or to remove the vehicle.

For these reasons, stopped vehicle detection is becoming increasingly commonplace on roads that face this restriction. Examples include on the All Lane Running sections of the UK Strategic Road network[1], in extreme weather in Sweden[2] and in road tunnels worldwide, including Switzerland and Norway[3].

The most common types of stopped vehicle detection are either radar or video based. These solutions provide alarms into the relevant road control centre (RCC), to allow road operators to make the type of rapid response detailed above.

2. BACKGROUND – TUNNEL FIRE RESPONSE

Tunnel fires in road tunnels are a well-publicized problem, with notable examples being the 1999 Mont Blanc tunnel fire[4], the 2001 St Gotthard fire[5]. In Norway there are over 20 fires each year in the 1150 tunnels across the country[6]. In the event of a vehicle fire, smoke is contained within the tunnel, creating both an extended unsafe environment and hindering any emergency response.

If a tunnel fire can be extinguished quickly this problem can be overcome, as there isn't time for significant smoke build up. Furthermore, the tunnel ventilation systems should be able to deal with the smoke. However, this is increasingly complicated by electric vehicle fires only being able to be cooled, not extinguished[7]. Furthermore, it can be seen in multiple scenarios that the best use of tunnel ventilation may be complicated by the position of people remaining in the tunnel, or even lack of knowledge of how many people remain in a tunnel at all[8]. This is exacerbated within tunnels with automatically activated fire ventilation systems, which in some cases pushes the smoke further into the tunnel, thus endangering more people. In the 2015 Gudvanga tunnel fire smoke was redirected from heading towards a portal 360m to the other portal 11.4km away, trapping 5 people.[9]

---

1 Parkyns, Thompson, and File, 'Highways England Stationary Vehicle Detection System (SVD) Monitoring Stationary Vehicle Detection System (SVD) Monitoring Final Report'.

2 'E4 Motorway', 4.

3 Jensen, 'WHY RADAR IS THE PREFFERED TUNNEL INCIDENT DETECTION SYSTEM IN THE RENNFAST TUNNELS'.

4 35 Die, 1 Briton Missing in Mont Blanc Tunnel Fire'.

5 Switzerland's Gotthard Road Tunnel Closed by Deadly Crash'.

6 Nævestad and Meyer, 'A Survey of Vehicle Fires in Norwegian Road Tunnels 2008–2011'.

7 'Eidgenössisches Departement für'.

8 'Damning Report on Norway Tunnel Fire – Wrong Way Warning'.

9 Bjelland, 'Emergency Preparedness for Tunnel Fires – A Systems-Oriented Approach'.

In these scenarios either the response to extinguish a fire or the response to evacuate people may have to operate through smoke. Even experienced smoke divers may encounter problems finding their way in a fire situation.[10] As such, they look for additional situational awareness by using technology to know both where they are in a tunnel, and in relation to team members, vehicles and pedestrians. Without this situational awareness, the on scene Fire Commander is reliant on information being given originally from trapped persons using their mobile phones. This has found to have a substantial effect on response times, and in some cases means people aren't rescued until 1.5 hours later.[11]

3. EXISTING RADAR TECHNOLOGY

The radar stopped vehicle detection that is already in place in many tunnels has been proven in both variable weather conditions roadside and as an autonomous vehicle sensor in smoke filled, dusty environments. In order to detect stopped vehicles, every part of the roadway must be within sensor coverage at all times, allowing tracking of both moving and stopped objects.

For further benefits, the resolution of the sensor must be good enough that objects can be easily differentiated for further analysis. As an example, the resolution of the Navtech Radar CTS350-X sensor allows detection and differentiation of cars, LGVs, HGVs, pedestrians, cyclists and debris. Within 150m of the sensor these can also be placed in not just the correct carriageway but also the correct lane.

This full picture, detailed view allows not just stopped vehicle detection, but also many other types of Automatic Incident Detection (AID), including wrong-way detection and hard shoulder monitoring. Any of these incidents can be raised as individual alarms, that not only show that an incident has occurred, but also gives the incident type and location.

Existing tunnel based installations include the Ryfast, Ellingsøy and Tromsø tunnels in Norway, and the Ismalia tunnel in Egypt.

4. USING EXISTING RADAR TECHNOLOGY FOR TUNNEL FIRE RESPONSE

By comparison to stopped vehicle detection, where the output to road operators is an alarm, the key requirement to be a technical aid for situational awareness in smoke filled tunnels is to give an ongoing, clear picture in harsh conditions. This requires being able to work and give a full scene where the sensor signal is unaffected by smoke or fire , over the full distance between sensors.

If this technology is in place, then a further consideration is self-reporting of system health. This way it's clear when and where the system can be relied on, ensuring there is no risk of use when the system is not fully functional.

As in section 3, radar detection at 76GHz fulfils the first requirement of giving a full scene unaffected by conditions within the tunnel. To date the requirement for the situational awareness to be ongoing has not been fulfilled, limiting the use of radar in post event incident management. By creating a remotely accessible graphical user interface that provides live time radar data, Navtech Radar have met this requirement.

---

10 Norwegianscitechnews.com, 'Basic Safety Measures Will Save Lives in Tunnels'.

11 Bjelland, 'Emergency Preparedness for Tunnel Fires – A Systems-Oriented Approach'.

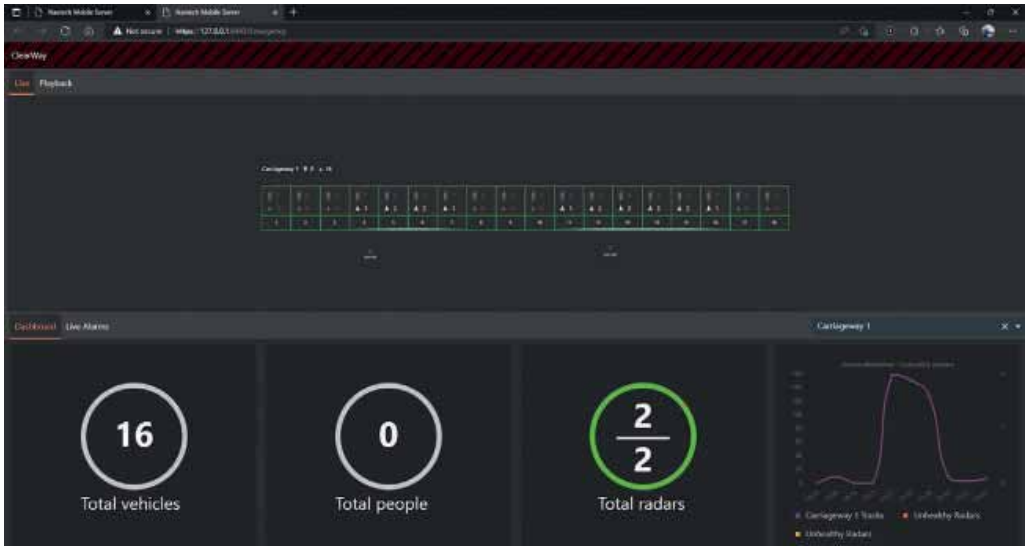


Figure 1: Emergency Services Situational Awareness Interface (full tunnel view)

This gives the ability to maximise existing sensors and provide significant benefits to the speed of response in tunnel fires. Providing both wide-field data as in Figure 1 gives an overall picture of where to expect both vehicles and people, allowing an informed response on speed and direction of approach.

When this schematic is used on a larger scale the position of individual vehicles and pedestrians can be seen, with key points of information such as cross tunnel passages also shown. This allows detailed incident management with clear communication to first responders, regardless of visibility by eye.

Figure 2: Situational Awareness Interface (zoomed view)

A key challenge for successful application of this technology in the event of an incident is to ensure that all stakeholders relying on the interface are well-versed in its use. One solution to this is to build the system into wider workflows, so that under stress there is no learning required. This is addressed in the Road Operator User Interface section.

5. ROAD OPERATOR USER INTERFACE

Whilst the system described in section 4 provides significant benefits as a standalone interface at tunnel incidents, it's important that the overall workflow for use is considered. For successful use, this interface must be easily used and understood. Every effort has been made to consider usability, with more to be done by ensuring the system is continually visible in normal use as well as under emergency situations. This means considering the integration in workflow between the RCC/ROC/VTS (road control centre) and the emergency services.

In Norway there is already duplication of incident control between RCC and the emergency services. This ensures that the road operators who have the most experience of the road layout direct footage of an incident, reducing the learning time on the scene of any incident. By replicating this approach used with cameras by creating a useful traffic display of the radar data the learning time at the scene of an incident can be similarly reduced.

This system is in place to give a live view of the type, position and number of vehicles in the tunnel, and allow continuous informed decision making for traffic management.

Figure 3: A live operator view of vehicle types and presence in a 2 bore tunnel

This consideration for the road operators in turn maintains the speed of response of the emergency services in the event of an incident, maximising the benefits of the system.

6. EMERGENCY SERVICE BENEFITS

It is considered that the presence of this system in major tunnels will address many of the issues highlighted in Section 2. Continuous understanding of an incident regardless of conditions gives both emergency services and road operators situational awareness of any incident.

This live time information allows smoke divers to rapidly move forward in tunnels safely, maximising the ability to get people out of harm's way. In complex situations where there is no clear ventilation strategy that will be key to ensuring the best outcome for people within the tunnel.

Furthermore, by replaying the track information leading up to an incident, the likely cause can be established, ensuring that it is known (for example) how many vehicles are involved in a crash. Again, the benefits for the emergency response teams is to remove uncertainty or ambiguity over who and what were present in the tunnel at the time of an incident.

Whilst this system cannot prevent incidents occurring, it is expected that there will be significant time savings for response seen, and in turn the outcomes for people involved in major tunnel incidents will dramatically increase. The emergency responders are no longer reliant on information being given from the tunnel, through an emergency contact phone to the VTS and then to the respondents – instead there is a direct picture given to the people who are taking action.

7. NEXT STEPS

To see the benefits outlined in section 6 at scale, and maximise the safety benefits of radar Emergency Situational Awareness the system is now undergoing in-situ tests, including in locations where the radars are already present for stopped vehicle detection. This allows the integration of the live image output with emergency service process and training. This testing includes the process for ensuring that the system is integrated with existing SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) systems and video management software, building the ease of installation for road operators and integrators.

Scenario testing in smoke test tunnels is also ensuring that the proven resilience of the radar data builds confidence in the operators and responders relying on the data provided. This ensures that the proven system can maximise the benefits to emergency services in tunnel incidents, in turn maximising the safety of road users in some of the harshest conditions.

REFERENCES

The Guardian. '35 Die, 1 Briton Missing in Mont Blanc Tunnel Fire', 27 March 1999, sec. World news. https://www.theguardian.com/world/1999/mar/27/6.

Bjelland, Henrik. 'Emergency Preparedness for Tunnel Fires – A Systems-Oriented Approach'. Safety Science, 2021, 11.

DriveEuropeNews. 'Damning Report on Norway Tunnel Fire – Wrong Way Warning', 12 March 2015. https://driveeurope.co.uk/2015/03/12/porsche-siberia/.

Navtech Radar. 'E4 Motorway'. Accessed 17 May 2022. https://navtechradar.com/case-study/e4-motorway/.

'Eidgenössisches Departement für', 2020, 102.

Jensen, Kristian. 'WHY RADAR IS THE PREFFERED TUNNEL INCIDENT DETECTION SYSTEM IN THE RENNFAST TUNNELS', n.d., 19.

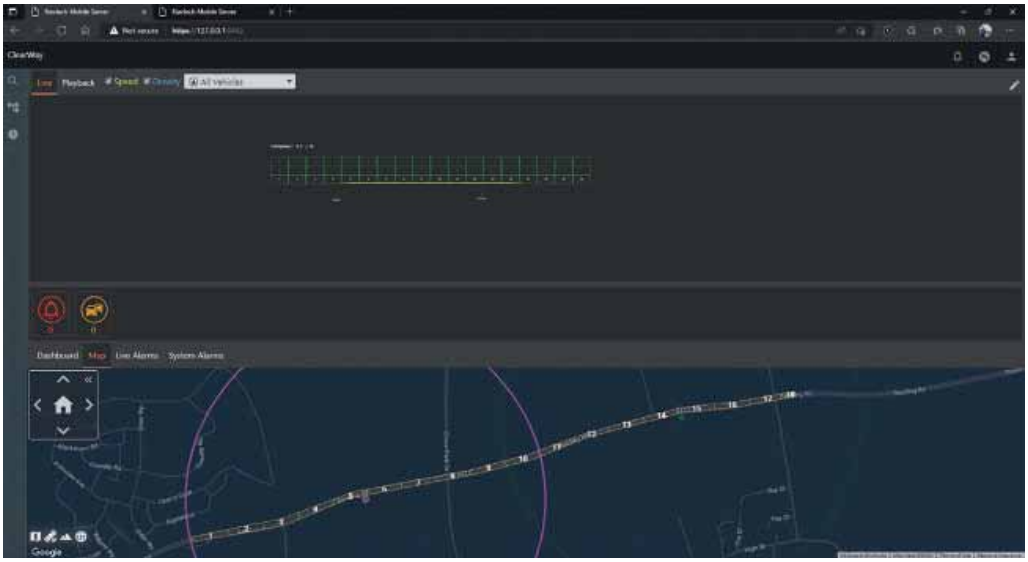
Nævestad, Tor-Olav, and Sunniva Meyer. 'A Survey of Vehicle Fires in Norwegian Road Tunnels 2008–2011'. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 41, 2014.

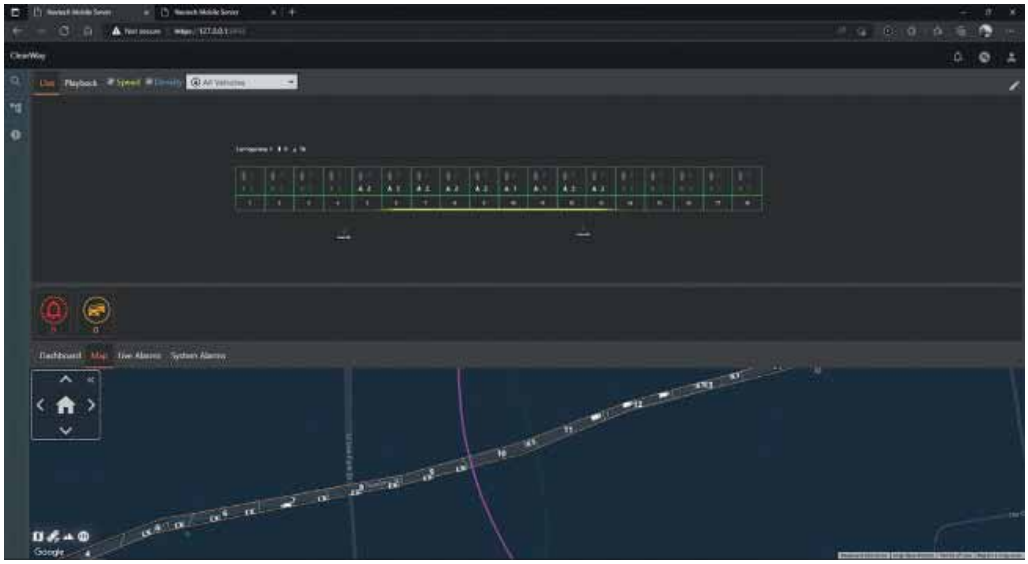
Norwegianscitechnews.com, Christina Benjaminsen. 'Basic Safety Measures Will Save Lives in Tunnels'. SINTEF. Accessed 18 May 2022. https://www.sintef.no/en/latest-news/2019/basic-safety-measures-will-save-lives-in-tunnels/.

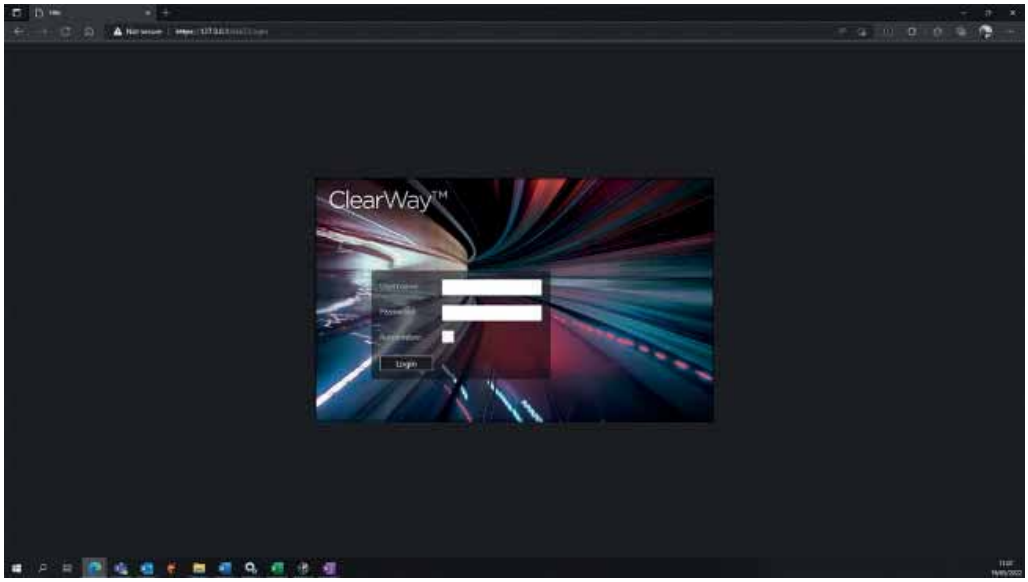
Parkyns, Helen, Ian Thompson, and IBI File. 'Highways England Stationary Vehicle Detection System (SVD) Monitoring Stationary Vehicle Detection System (SVD) Monitoring Final Report'. FINAL REPORT, 2016, 94.

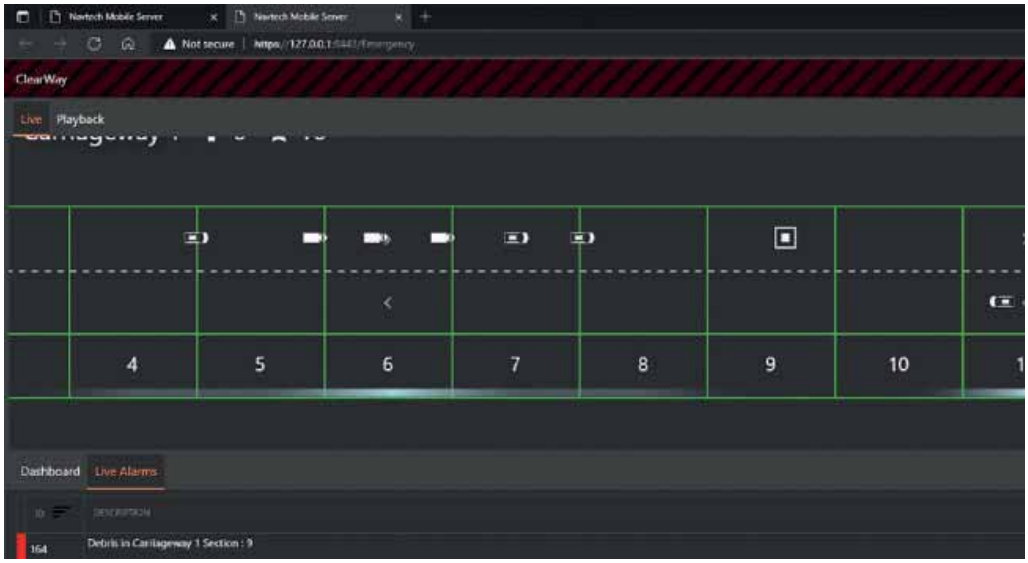
BBC News. 'Switzerland's Gotthard Road Tunnel Closed by Deadly Crash', 13 December 2017, sec. Europe. https://www.bbc.com/news/world-europe-42338945.

APPENDIX A
ROAD OPERATOR USER INTERFACE SCREENSHOTS AND DESCRIPTIONS






ClearWay™


Not secure
ClearWay
Live
Playback
4
5
6
7
8
9
10
Dashboard
Live Alarms
Debris in Carriageway 1 Section : 9

GESTIÓN DE EMERGENCIAS MEDIANTE PLANES DINÁMICOS

Miguel Angel Meléndez Fernandez
Oscar Morillas Pérez.
Kapsch TrafficCom Transportation S.A.U.

Las crecientes necesidades de eliminar barreras arquitectónicas dentro de las ciudades y de aumentar las áreas peatonales, junto con desarrollos de nuevas técnicas constructivas y de control, han dado un gran impulso a la construcción de redes de túneles de gran longitud bajo nuestras ciudades. La criticidad de estas instalaciones implica la necesidad de dotarlas de un sistema de control que facilite la implementación de complejos planes de actuación para garantizar la seguridad de usuarios e instalaciones.

Tradicionalmente se definían un número limitado de planes estáticos puesto que la longitud y el nivel de señalización de los túneles no eran demasiado elevados. Sin embargo, ejemplos actuales como los túneles de Madrid Calle 30 en España, Stockholm Bypass en Suecia o Américo Vespucio Oriente en Santiago de Chile, dotados con múltiples rampas de entrada y salida y de gran cantidad de equipos de señalización y control, hacen que sea necesario desarrollar un nuevo enfoque en la gestión de incidentes.

Estos túneles tan complejos necesitarían un número tan elevado de planes estáticos que harían excesivamente compleja su selección, validación e implementación por parte de los operadores. Esta complejidad implicaría retrasos en su implementación y, consecuentemente, agravaría las consecuencias del incidente y extendería su influencia por el resto de la red de túneles.

Para minimizar el impacto de incidentes en unas redes viarias tan complejas se requieren sistemas de control que sean capaces de generar dinámicamente el plan idóneo en base a parámetros tales como puntos de comienzo y de fin del incidente, tipo del incidente y carriles afectados.

El sistema deberá diseñar y proponer este plan al operador en tiempo real para que lo valide, cancele o modifique, como paso previo a su implementación inmediata en la señalización, barreras de acceso, zonas de megafonía, y demás elementos integrados en el sistema.

EMERGENCY MANAGEMENT THROUGH DYNAMIC PLANS

The growing needs to eliminate architectural barriers within cities and to increase pedestrian areas, together with developments in new construction and control techniques, have given a great boost to the construction of long tunnel networks under our cities. The criticality of these facilities implies the need to provide them with a control system that facilitates the implementation of complex action plans to guarantee the safety of users and facilities.

Traditionally, a limited number of static plans were defined, since the length and signaling level of the tunnels were not too high. However, current examples such as Madrid Calle 30 tunnels in Spain, Stockholm Bypass in Sweden or Américo Vespucio Oriente in Santiago de Chile, equipped with multiple entry and exit ramps, and a large amount of signaling and control equipment, make need to develop a new approach to incident management.

These very complex tunnels would require such a large number of static plans that they would make their selection, validation and implementation excessively complex by the operators. This complexity would imply delays in its implementation and, consequently, would aggravate the consequences of the incident and would extend its influence throughout the rest of the tunnel network.

To minimize the impact of incidents on such complex road networks, control systems have to be capable of dynamically generating the ideal plan based on parameters such as starting and ending points of the incident, type of incident and affected lanes.

The system must design and propose this plan to the operator in real time to validate, cancel or modify it, as a prior step to its immediate implementation in the signaling, access barriers, public address areas, and other elements integrated in the system.

GESTION DES URGENCES AVEC DES PLANS DYNAMIQUES

Le besoin croissant de supprimer les barrières architecturales au sein des villes et d'augmenter les zones piétonnes, ainsi que les développements de nouvelles techniques de construction et de contrôle, ont donné une grande impulsion à la construction de longs réseaux de tunnels sous nos villes. La criticité de ces installations implique la nécessité de les doter d'un système de contrôle qui facilite la mise en œuvre de plans d'actions complexes pour garantir la sécurité des utilisateurs et des installations.

Traditionnellement, un nombre limité de plans statiques était défini, car la longueur et le niveau de signalisation des tunnels n'étaient pas trop élevés. Cependant, les exemples actuels tels que les tunnels de Madrid Calle-30 (Espagne), Stockholm Bypass (Suède) ou l'Américo Vespucio Oriente (Santiago du Chili), équipés de multiples rampes d'entrée et de sortie, et de nombreux équipements de signalisation et de contrôle, nécessitent le développement d'un nouvelle approche. à la gestion des incidents.

Ces tunnels très complexes nécessiteraient un si grand nombre de plans statiques qu'ils rendraient leur sélection, leur validation et leur mise en œuvre excessivement complexes par les opérateurs. Cette complexité entraînerait des retards dans sa mise en œuvre et, par conséquent, aggraverait les conséquences de l'incident et étendrait son influence au reste du réseau de tunnels.

Pour minimiser l'impact des incidents dans des réseaux de tunnels aussi complexes, les systèmes de contrôle doivent être capables de générer dynamiquement le plan idéal en fonction de paramètres tels que les points de départ et d'arrivée de l'incident, le type d'incident et les itinéraires concernés. .

Le système doit concevoir et proposer ce plan à l'opérateur en temps réel pour le valider, l'annuler ou le modifier, préalablement à sa mise en œuvre immédiate dans la signalisation, les barrières d'accès, les zones de sonorisation et autres éléments intégrés au système.

PLANTEAMIENTO

Se puede definir "incidente" como cualquier evento que implique alguno de los siguientes aspectos:

- Reducir la capacidad (flujo de tráfico máximo posible) del túnel;
- Poner en riesgo la seguridad de los usuarios que transitan por el túnel;
- Poner en riesgo la seguridad de las instalaciones del túnel;
- Reducir la funcionalidad del sistema de control, y;
- Requerir la implementación de acciones para minimizar sus consecuencias.

La rápida detección de incidentes y la implementación de planes de actuación asociados es necesaria en cualquier tramo de la red viaria. Pero este aspecto se convierte en crítico cuando el incidente se localiza en el interior de redes de túneles. Esto es debido a las características especiales de estos tramos de la red viaria, tanto por el daño que puede provocar en la salud de los usuarios como en la propia infraestructura.

Por lo tanto, cuantas más y mejores herramientas sean puestas a disposición de los operadores por parte del sistema de control, mayor será la eficacia en la implementación de acciones que disminuyan el impacto negativo de los incidentes.

GESTIÓN DE INCIDENTES

El objetivo último de la gestión de incidentes es restaurar en el menor tiempo posible la situación normal en el túnel, minimizando el impacto causado por el incidente. Además, el sistema tiene que ser capaz de adaptarse a las situaciones cambiantes que puedan aparecer en la infraestructura a lo largo del tiempo, como por ejemplo nuevas normativas, nuevos sistemas y equipos a instalarse, variación del perfil del tráfico que usa la infraestructura o extensiones de la red de túneles, manteniendo e incluso mejorando el funcionamiento de la misma.

La nueva generación de los sistemas de gestión de incidentes a ser instalado en los túneles tiene por lo tanto que facilitar esta adaptación, aumentando la fiabilidad y rapidez de la detección y proporcionando las herramientas necesarias para una correcta gestión de los incidentes.

Las características principales que esta nueva generación debe contemplar son:

- Capacidad de detección de incidentes a través de información recogida desde múltiples fuentes y capacidad de análisis de la información recogida para ser capaz de asociar la información de varias fuentes a un único incidente.
- Capacidad de generar planes dinámicos en función de las características del incidente tales como puntos de comienzo y final, tipo de incidente y carriles afectados.
- Permitir al operador previsualizar el plan de actuación generado y poder editarlo para cambiar sus acciones en caso de ser necesaria su adaptación antes de su implementación.
- Registrar todos las acciones asociadas al incidente para facilitar su posterior análisis.

Un plan de actuación ante incidentes es, en líneas generales, una secuencia de acciones que se ejecutará cuando el operador se enfrenta a una situación específica. Estas acciones se pueden ejecutar de forma automática por el sistema, de forma semiautomática (después de la confirmación del operador), manualmente por el operador, o como una combinación de ellas donde se establece un tiempo de espera para

la respuesta del operador, a partir del cual el plan se pone en marcha automáticamente (dead-man´s hand).

En la mayoría de los sistemas de gestión de incidentes usados actualmente estos planes de actuación son un número limitado de conjuntos de secuencias de acciones definidas durante la fase de ejecución del proyecto, siendo muy complejo y costoso generar una biblioteca de planes que dé respuesta a todas las posibles combinaciones de situaciones que se puedan producir (distintas longitudes de tramos afectados, los carriles implicados y los distintos tipos de incidentes).

Por todo esto es necesario implementar sistemas de gestión de incidencias que generen dinámicamente un número ilimitado de planes mediante las características del evento, las reglas de actuación y la ubicación física de los equipos cercanos, permitiendo al operador la modificación, inclusión o eliminación de acciones concretas del plan generado.

En los siguientes puntos se exponen ejemplos de los pasos a seguir para que el sistema, ante la aparición de incidentes, genere y sugiera planes de actuación y como el operador puede seleccionarlo, validarlo, implementarlo, modificarlo y finalizarlo mediante las herramientas del sistema de gestión de incidentes.

CONCEPTOS DE LA GENERACIÓN DINÁMICA DE PLANES DE RESPUESTA

Como requisito general, un algoritmo de generación de planes dinámicos ha de tener implementadas unas reglas básicas de actuación basadas en la normativa vigente en el país en el que se aplique y en los procedimientos definidos en el plan de explotación de la instalación. El algoritmo, basándose en los parámetros introducidos durante la catalogación del incidente y aplicando dichas reglas básicas, ha de poder generar un plan de respuesta y presentárselo al operador como propuesta de actuación.

Durante la generación de este plan dinámico se han de implementar los siguientes procesos:

1. El sistema ha de analizar la configuración del área de influencia del incidente consistente tanto en la sección de la vía ubicada antes y después del incidente, como en las vías de entrada y salida existentes en dicho tramo.
2. Los equipos que se encuentren en este área de influencia se han de almacenar temporalmente en un conjunto de dispositivos.
3. El algoritmo de generación de planes ha de emplear los siguientes datos para definir la secuencia de comandos del plan dinámico:
    - La identificación de la carretera y los accesos afectados.
    - Los puntos de inicio y final del incidente.
    - La longitud de la congestión generada antes del incidente.
    - La clasificación del incidente.
    - Las distancias de cada equipo del conjunto de dispositivos al incidente.
4. El algoritmo ha de realizar el diseño del plan dinámico mediante un conjunto de pasos secuenciados. Estos pasos incluyen:
    - Órdenes a dispositivos, como por ejemplo información a ser mostrada en paneles de mensaje variable, acciones sobre barreras de cierre, mensajes a ser difundidos por el sistema de megafonía, activaciones de niveles de iluminación o ventilación, etc.

- Mensajes al operador para informar de sucesos o para requerir su verificación de un evento como paso necesario para proseguir con la ejecución del plan.
- Envío automático de alertas vía email, sms, etc a otros organismos o servicios de emergencia.

5. Cuando las órdenes se superponen debido a que un dispositivo pueda recibir distintos comandos, se han de poner en cola ejecutándose según su prioridad. Este es el caso de los mensajes a ser mostrados en los Paneles de Mensaje Variable, que se ejecutan o se ponen en cola según su nivel de prioridad.
6. El operador debe poder realizar una comprobación del plan generado mediante la vista previa del plan y el análisis de la secuencia de pasos propuesta antes de su implementación.
7. El operador además debe poder modificar el plan en caso de ser necesario para dar una respuesta más adecuada al incidente.
8. Por último el sistema debe poder registrar todas las acciones realizadas por el sistema y por los operadores asociadas al incidente, para poder hacer un seguimiento en tiempo real y un análisis a posteriori de cómo se dio respuesta al incidente.

PUNTOS DE PARTIDA EN LA GENERACIÓN DINÁMICA DE PLANES DE RESPUESTA

El sistema debe de tener en consideración al menos los siguientes aspectos en su algoritmo de generación de planes dinámicos:

(Tabla 1)

REGLAS ADICIONALES PARA DE GENERACIÓN DINÁMICA DE PLANES

El sistema de gestión de incidentes deberá realizar además la prevención y detección de conflictos, verificando que no se definan acciones ilegales o peligrosas durante la generación de los planes dinámicos. A continuación se muestran algunos ejemplos de conflictos en la señalización en las señales ubicadas en la misma sección o en secciones consecutivas.

Tabla 1. Ejemplos de reglas para la generación automática de planes dinámicos

Aspecto	Valor	Descripción
Ubicación	Generado dinámicamente por el sistema en función de la selección del operador sobre el mapa GIS o por la alarma recibida desde equipos de campo.	Carretera y sentido donde se ha está localizado el incidente.
Punto de comienzo		Define el punto de la vía donde da comienzo el incidente (congestión, firme deslizante, etc)
Punto de finalización	(puede estar prefijado según las reglas en una distancia mínima de x km desde el punto de comienzo)	Define el punto de la vía donde finaliza el incidente
Tipo de localización	• En los carriles de la vía. • En el arcén. • En rampas de entrada o de salida.	Su valor define las acciones a implementar como, por ejemplo, la señalización a mostrar en paneles de mensaje variable.
Carriles afectados	Introducido por el operador durante la categorización del incidente	Indica al algoritmo los carriles que han sido afectados para generar la señalización a ser propuesta. En caso de que se seleccionen todos los carriles como afectados, esto implicaría que el algoritmo lo interprete como el cierre de la vía.
Tipo de incidente	Ejemplos de tipo de incidente: • Vehículo parado. • Objeto en la vía. • Vehículo en sentido contrario. • Congestión. • Peatón o Animal en la Vía. • Vehículo lento. • Accidente. • Contaminación alta. • Derrame de materiales peligrosos. • Desastre Natural o humano. • Fuego. • Fallo o degradación del sistema. • Obras o trabajos de mantenimiento en la vía.	El operador ha de seleccionar o confirmar el tipo de incidente para que el sistema genere el plan dinámico más adecuado al su categoría.
Longitud de la cola antes del incidente (km)		Usado para adecuar las accio-nes y la señalización de los paneles de mensaje variable a la longitud de la misma.

Figura 1. Ejemplos de mensajes conflictivos entre señales aspa-flecha ubicadas en una misma sección

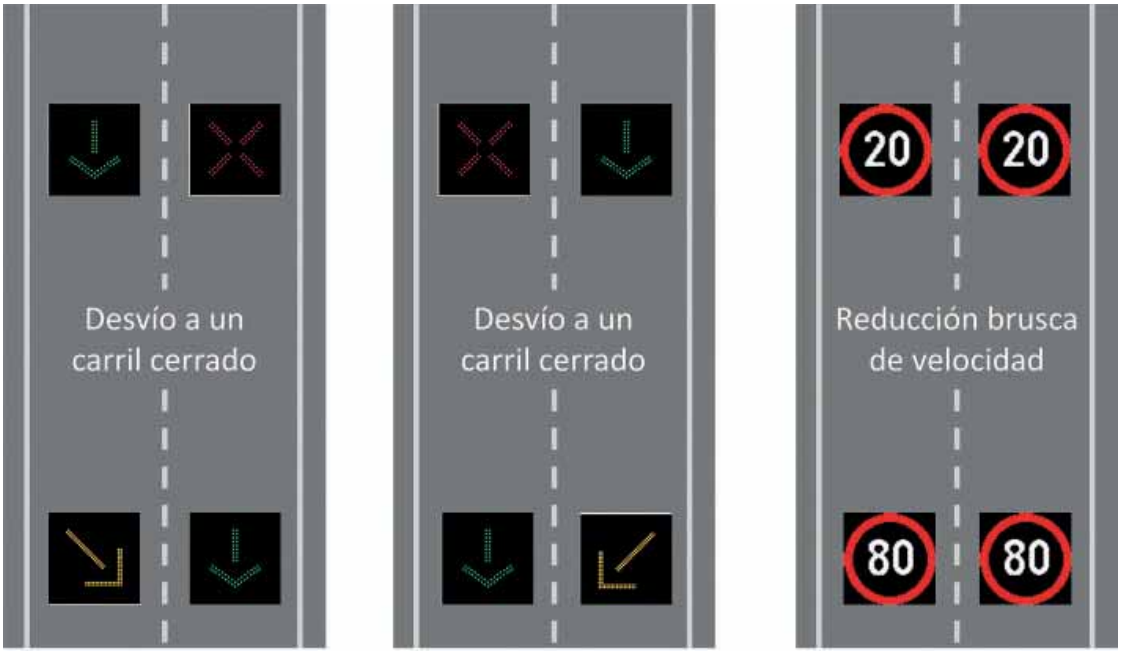
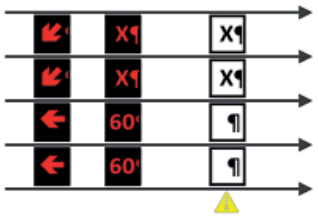
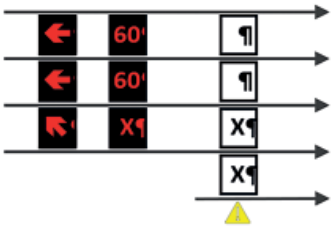
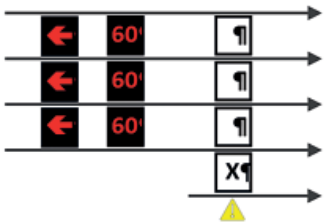
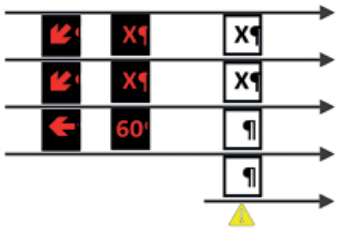
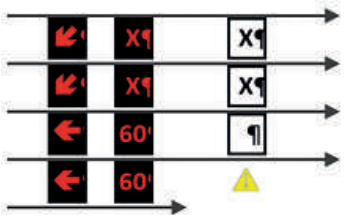
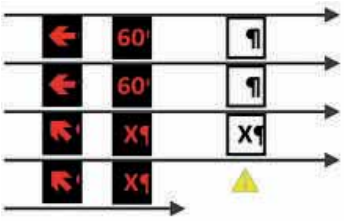


Figura 2. Ejemplos de mensajes conflictivos entre señales ubicadas en secciones consecutivas

Del mismo modo el sistema de generación dinámica de planes ha de tener en cuenta, basándose en los carriles afectados en la zona del incidente, cómo señalizar en secciones ubicadas antes del incidente, principalmente cuando se producen aumentos o disminuciones del número de carriles. A continuación se muestran algunos ejemplos de los casos que se pueden producir y cómo el sistema ha de proceder.

(Tabla 2)

Tabla 2. Ejemplos de reglas para la generación automática de planes dinámicos

Configuración de la vía	Descripción del incidente	Regla de generación del plan
Igual número de carriles.	Ubicación del incidente: 4 carriles. Carriles afectados: 2 de la izda. Pórtico anterior: 4 carriles, con señalización de carriles igual que en el incidente. Dos pórticos antes: señalización de cambio carril.	
Aumento de 1 carril a la derecha.	Ubicación del incidente: 4 carri-les. Carriles afectados: 2 de la dcha. Pórtico anterior: 3 carriles, con señalización de carriles distinta que en el incidente. Dos pórticos antes: señalización de cambio carril.	
Aumento de 1 carril a la derecha.	Ubicación del incidente: 4 carriles Carriles afectados: El derecho. Pórtico anterior: 3 carriles, con señalización de carriles dis-tinta que en el incidente.	
Aumento de 1 carril a la derecha.	Ubicación del incidente: 4 carriles Carriles afectados: 2 de la izda. Pórtico anterior: 3 carriles, con señalización de carriles distinta que en el incidente. Dos pórticos antes: señalización de cambio carril.	
Disminución de 1 carril a la derecha	Ubicación del incidente: 3 carriles Carriles afectados: 2 de la izda. Pórtico anterior: 4 carriles, con señalización de carriles distinta que en el incidente. Dos pórticos antes: señalización de cambio carril.	
Disminución de 1 carril a la derecha	Ubicación del incidente: 3 carriles. Carriles afectados: El derecho. Pórtico anterior: 4 carriles, con señalización de carriles distinta que en el incidente. Dos pórticos antes: señalización de cambio carril.	

GESTIÓN DE INCIDENTES. PASO 1: CREACIÓN DEL INCIDENTE

El sistema de gestión de incidentes debe de facilitar la respuesta del sistema a eventos de distintas formas:

- Permitiendo al operador crear manualmente un incidente desde el mapa GIS.
- Creando automáticamente eventos a partir de condiciones o alarmas tales como que el tiempo de viaje calculado exceda de un umbral o que el sistema de detección automática de incidentes informe de un evento en una ubicación específica.
- Programando en el tiempo eventos para la aplicación de una futura respuesta, tales como operaciones viales programadas para realizarse en un momento específico o de acuerdo con un cronograma de recurrencia continuo.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de inicio manual de la aparición de un evento en la carretera desde un mapa GIS. Seleccionando con el ratón un punto de una carretera aparecerá un menú de actuación desde donde se puede dar inicio al incidente en la ubicación seleccionada.

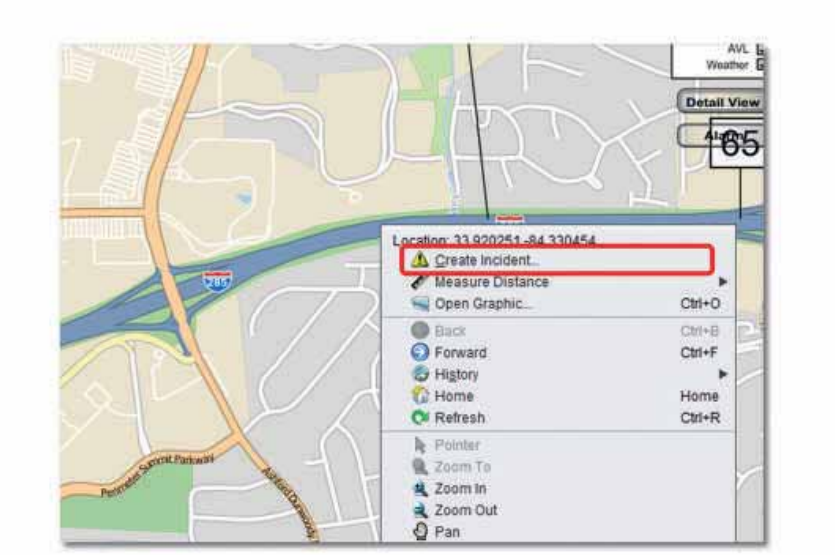


Figura 3. Creación manual de un incidente por parte del operador desde el mapa GIS

Durante el proceso de clasificación del incidente, el operador ha de seleccionar y definir la ubicación del tramo afectado, introduciendo además datos como número de carriles cortados, tipo de incidente y otras clasificaciones asociadas. El tipo de incidente determinará además qué conjunto de datos de clasificación se han de solicitar al operador. Si el operador especificara que el evento pertenece a otro tipo, por ejemplo una alta concentración de gases, los campos para definir el evento deberán estar adaptados a ese tipo de evento.

Los parámetros introducidos para catalogar el evento determinarán cómo responderá el sistema. De acuerdo con los datos del incidente, el sistema deberá generar dinámicamente un plan de respuesta, e identificar los planes estáticos más adecuados. Estos datos se utilizan además para registrar los atributos del evento en la base de datos del sistema para la futura creación de reportes y estadísticas.

A través de los siguientes capítulos y sus figuras se van a mostrar los pasos ante un incidente de tráfico que afecte a tres carriles de la derecha a ser gestionado mediante un plan generado dinámicamente por el sistema.

La siguiente figura muestra una ventana con campos para que el operador pueda redefinir la carretera, el tramo afectado y los carriles cerrados.

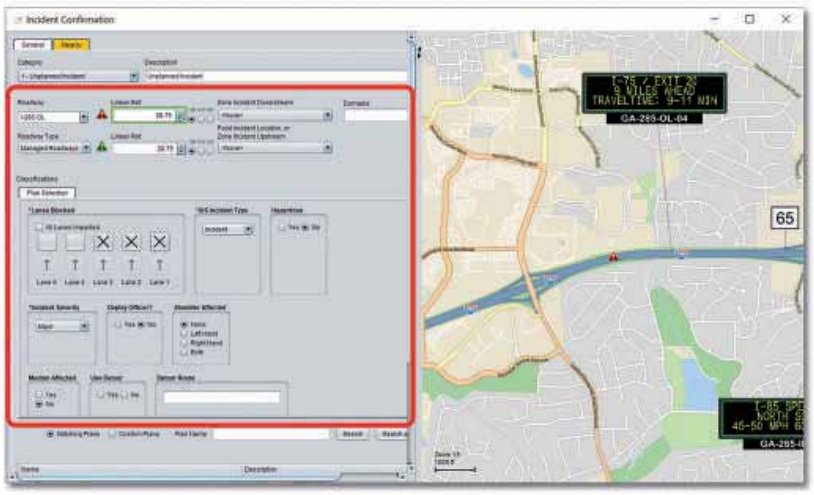


Figura 4. Definición de los parámetros del incidente

El sistema deberá poner a disposición del operador todos los medios posibles para ayudarle en la confirmación del incidente, por ejemplo mediante la identificación y selección automática de cámaras dentro de un radio de la ubicación del incidente e informándole de la existencia de otros incidentes próximos. Estas cámaras se seleccionarán automáticamente y se mostrarán en los monitores configurados, activándose las preposiciones preestablecidas para obtener la mejor vista de la ubicación del incidente. En el ejemplo mostrado en la figura siguiente, la pestaña "Nearby / Cercano" indica que se encontraron dos cámaras y ningún incidente dentro de un radio configurable alrededor de la ubicación del incidente.

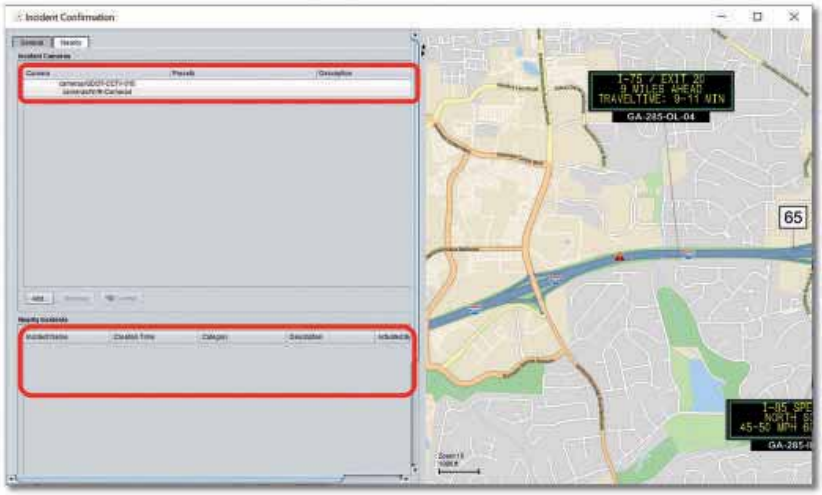


Figura 5. Cámaras e incidentes ubicados en la zona del incidente

GESTIÓN DE INCIDENTES. PASO 2: SELECCIÓN DEL PLAN DE RESPUESTA

Una vez que se hayan introducido los datos que definen el incidente, el operador deberá solicitar al sistema que le indique los planes de actuación más apropiados para dar una respuesta adecuada al mismo. El sistema se basará en la clasificación del incidente y la identificación de los equipos ubicados en su proximidad para:

- Seleccionar planes predefinidos estáticos;
- Generar el plan dinámico, y;
- Mostrárselos al operador.

En la siguiente figura se muestra que en nuestro ejemplo de incidente, una vez que el operador activó el botón "Search / Buscar", el sistema de gestión de incidentes le propone dos planes estáticos y un plan dinámicamente generado.

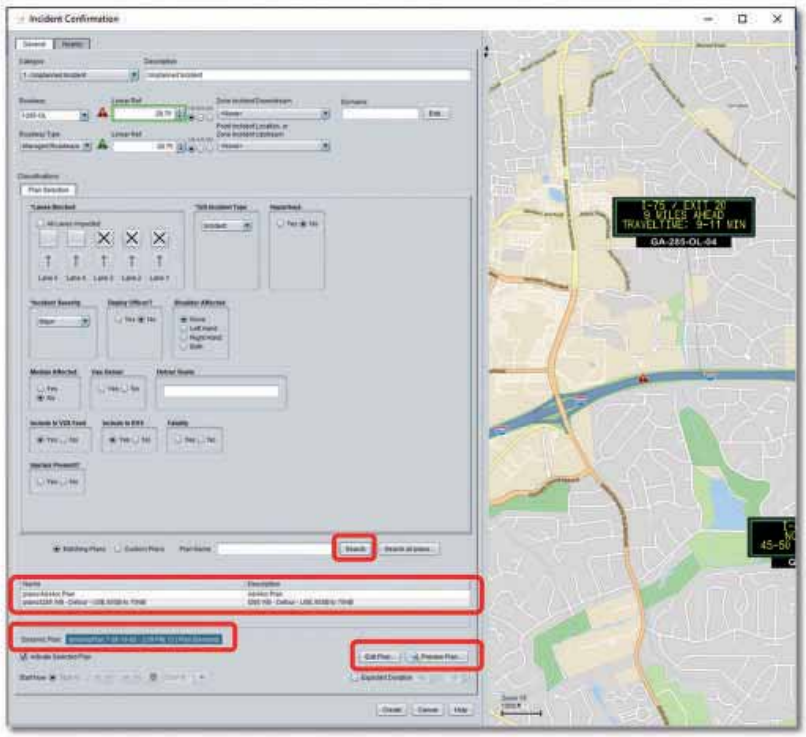


Figura 6. Planes estáticos y dinámico propuestos por el sistema para dar respuesta al incidente

Al presentar las propuestas de planes al operador, el sistema debe de incluir dos opciones:

- Implementar de forma inmediata el plan que el operador seleccione entre los propuestos para dar respuesta al incidente.
- Seleccionar uno de los planes y verificar o modificar los pasos propuestos. En la figura anterior, estas acciones se realizan mediante los botones "Edit Plan / Editar Plan" y "Preview Plan / Vista Previa del Plan", según se describe en el siguiente capítulo.

GESTIÓN DE INCIDENTES. PASO 3: VALIDACIÓN DEL PLAN DE RESPUESTA

El sistema de gestión de incidentes debe de permitir la previsualizar de los pasos de acción que compongan tanto los planes estáticos predefinidos como los planes dinámicos generados. Como se indicó en el capítulo anterior Paso 2: Selección de la respuesta, el operador debe de disponer de la posibilidad (botón "Preview Plan / Vista Previa del Plan") de solicitar que se le muestren las acciones que el plan va a implementar sobre los equipos seleccionados por el plan antes de su implementación.

En nuestra pantalla (Figura 7), el borde rojo sirve para indicar al operador que este gráfico no representa la condición actual en la carretera, sino que es una vista previa del estado futuro después de implementar el plan. Dado que habitualmente hay una gran cantidad de equipos ubicados en la proximidad del incidente y que no todos se ven implicados en el plan es conveniente, para facilitar al operador la comprobación del plan, que el sistema incluya filtros (botor tipo "Show All / Mostrar Todo" - "Show Plan Only / Mostrar solo el Plan") que alternen entre una vista donde se muestren todos los dispositivos en la zona con otra donde solo se muestran los dispositivos que se ven afectados por el plan de respuesta.

En nuestro ejemplo y según se muestra en la figura siguiente, el operador al seleccionar "Show Plan Only / Mostrar solo el Plan", puede ver las acciones del plan dinámico generado por el sistema. El operador comprobaría que el Panel de Mensaje Variable GA-285-OL-03 mostraría el mensaje, "SAVE LIVES - DON´T - TEXT & DRIVE" de forma incorrecta. Debería mostrar un mensaje similar al del PMV GA-285-OL-04 "INCIDENT AHEAD - MULTIPLE LANES BLOCKED" informando que los carriles están bloqueados más adelante. Al analizar esta deficiencia el operador comprobaría que esto es debido a que el mensaje genérico "SAVE LIVES - DON´T - TEXT & DRIVE" se aplicó en el panel GA-285-OL-03 con una prioridad tan alta que impide mostrar el mensaje de incidente. De esta forma modificando la prioridad del mensaje genérico mostrado en este panel permitiría una correcta aplicación del plan.

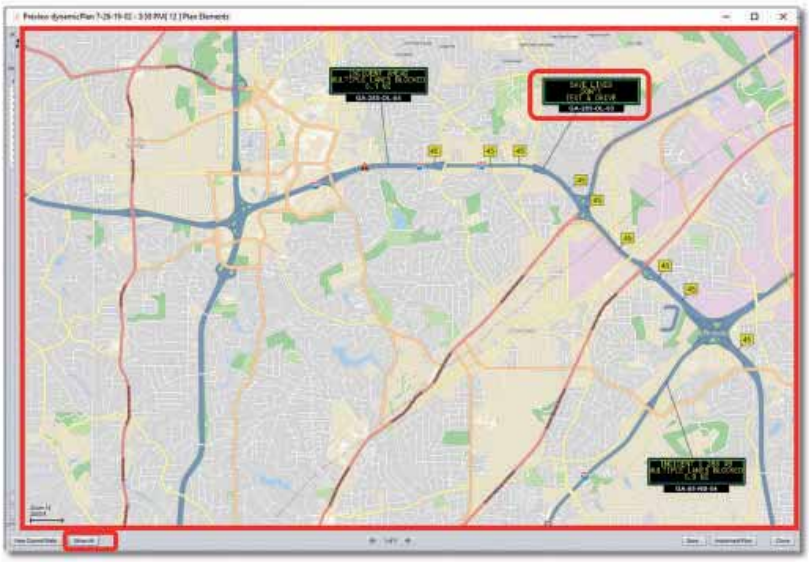


Figura 7. Previsualización de planes propuestos por el sistema para dar respuesta al incidente

La generación de planes dinámicos debe de calcular la distancia al incidente (0,1 millas en el la ubicación del PMV GA-285-OL-04), evitando que el operador tenga que realizar estos cálculos para mostrar una información precisa de la ubicación del incidente a los conductores.

El sistema ha de permitir al operador ver todos los pasos definidos en el plan de respuesta. La siguiente figura incluye los pasos incluidos en el plan dinámico del ejemplo anterior, que se mostrarían cuando el operador seleccione el botón "Edit Plan / Editar Plan". El sistema deberá permitir al operador modificar el plan incluyendo por ejemplo demoras configurables (delay) entre cada paso, alterando el orden de los pasos, eliminado pasos o incluyendo pasos nuevos.

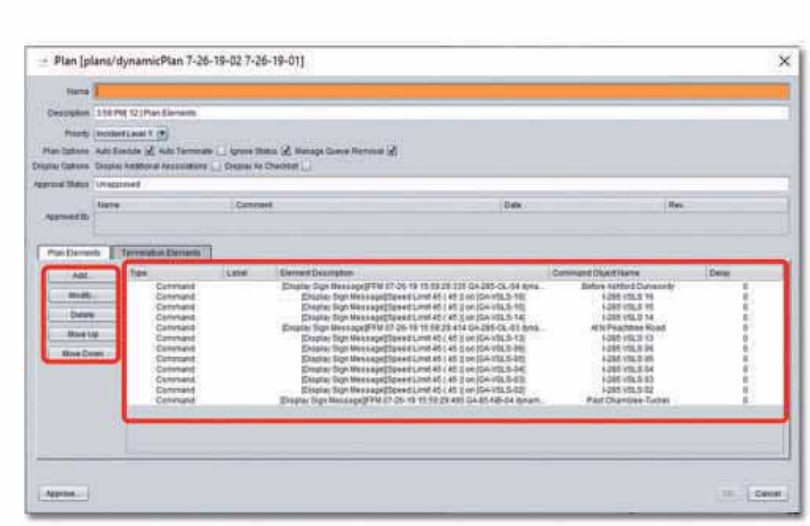


Figura 8. Edición y modificación de planes propuestos por el sistema para dar respuesta al incidente

El operador debe de poder obtener una vista más detallada de cada comando de forma sencilla e intuitiva. En nuestro ejemplo, el primer paso del plan (ver figura 8) hace referencia a mostrar un mensaje en el Panel de Mensaje Variable GA-285-OL-04. Al seleccionar el paso y pulsar en "Modify / Modificar" se abre la ventana de activación del mensaje en este equipo, mostrando el mensaje propuesto por el plan dinámico tal y como se muestra en la siguiente figura:

Figura 9. Edición y modificación de planes propuestos por el sistema para dar respuesta al incidente

El operador debe de poder comprobar el mensaje definido en el plan dinámico y, en caso de ser necesario, modificarlo o sustituirlo por un mensaje diferente incluido en la biblioteca de mensajes del dispositivo.

Para poder realizar una correcta trazabilidad de la implementación de la respuesta el sistema, además de registrar los pasos de ejecutados, ha de registrar también la identificación del operador que editó el plan y los cambios que realizó en el plan implementado.

GESTIÓN DE INCIDENTES. PASO 4: IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE RESPUESTA

Una vez que el operador ha validado o modificado el plan propuesto, puede proceder a su implementación seleccionando el botón definido para dicha acción. El sistema ha de ejecutar el plan mediante la implementación secuencial de sus pasos hasta su finalización, o hasta algún paso donde se requiera alguna acción por parte del operador para proseguir con su ejecución. Un ejemplo de acción intermedia por parte del operador en un plan de cierre de túnel podría ser su confirmación, mediante una comprobación visual por la cámara ubicada en el acceso al túnel, de que los vehículos se han detenido en el semáforo de acceso, para que el plan ejecute el paso de bajar las barreras de forma segura.

El sistema ha de actualizar la ventana de ejecución del plan, mostrando en cada momento su estado de avance. En la figura siguiente se muestra el estado de ejecución de cada paso del plan dinámico de nuestro ejemplo.

Si el operador no hubiera corregido la deficiencia del panel GA-258-OL-03, que mostraba un mensaje genérico con una prioridad tan alta que impedía la correcta ejecución del plan, en esta ventana podría comprobar que el comando enviado a dicho equipo para mostrar el mensaje de carriles cortados más adelante no se ha ejecutado sino que se ha puesto en cola "queued". Por tanto no está siendo mostrado a los conductores. De esta forma podría realizar las acciones necesarias para una correcta ejecución del plan.

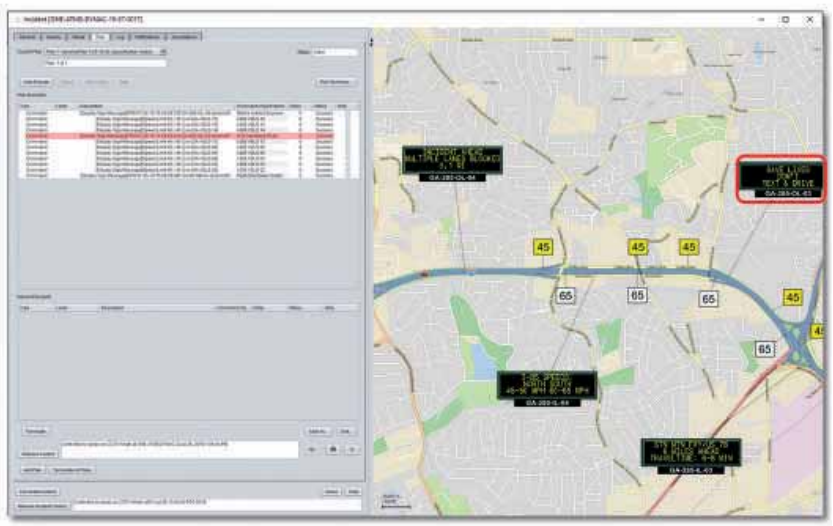


Figura 10. Seguimiento de la implementación del plan de respuesta

GESTIÓN DE INCIDENTES. PASO 5: FINALIZACIÓN DEL PLAN DE RESPUESTA

Cuando el operador seleccione que el incidente ha finalizado, el sistema ha de eliminar todos los comandos asociados con el incidente y retornar al estado existente antes del incidente. De igual forma se deben eliminar las acciones que el sistema haya colocado en cola.

GESTIÓN DE INCIDENTES. REGISTRO DE ACCIONES ASOCIADAS AL INCIDENTE

Es primordial para poder realizar un correcto seguimiento durante las acciones encaminadas a resolver el incidente y para poder realizar una análisis de la idoneidad de la respuesta implementada una vez finalizado el incidente, que se registren todas las acciones asociadas con el incidente.

- Mediante la consulta en tiempo real de las acciones asociadas al incidente, operadores y supervisores estarán informados de la acciones que se están ejecutando para dar una correcta respuesta al incidente que minimice sus consecuencias.
- El análisis post - mortem de los registros asociados al incidente es igualmente una valiosa herramienta destinada a verificar la idoneidad de las acciones implementadas e introducir mejoras en el modo de afrontar el incidente si se repite en el futuro.

En la siguiente figura se muestra el registro asociado con el incidente que nos está sirviendo como de ejemplo una vez finalizado el evento. La siguiente información debe de estar registrada:

- Las acciones implementadas con fecha y hora.
- Los cambios realizados en el plan.
- La identificación del operador que realizo las acciones de implementación, los cambios y las acciones intermedias requeridas por el plan, así como de la estación de trabajo desde donde se realizaron dichas acciones.

Figura 11. Registro de acciones asociadas al incidente

CONCLUSIONES

En esta ponencia hemos querido poner de manifiesto las ventajas de disponer de un sistema de control que facilite una adecuada respuesta ante incidentes y sea capaz de implementar los paso en el proceso iterativo destinado a su resolución.

Figura 12. Proceso iterativo de resolución de incidentes mediante planeas de actuación

Los sistemas de gestión de incidentes tradicionales se están quedando obsoletos cuando se trata de gestionar redes complejas de túneles o regiones con una alta concentración de incidentes y dispositivos. Será por tanto recomendable su sustitución por sistemas más avanzados que permitan:

- Alta flexibilidad en la definición de los planes de actuación y en las acciones encaminadas a su implementación.
- Registro de acciones implementadas para un estudio posterior de todos los pasos dados por el operador y por el sistema desde que se detecta el incidente hasta su completa resolución.

INCIDENTS/ACCIDENTS IN MOTORWAY TUNNELS IN SLOVENIA

Drago Dolenc

B.Sc. civil engineering, Tunnel safety officer, DARS d.d.

Ulrich Zorin

B.Sc. traffic engineering, Director of Management, DARS d.d.

Road transport on the territory of Slovenia has a long tradition and is of great importance for society and its development. Today, there are approximately 38.8 thousand kilometres of roads of various categories in Slovenia, of which 6.5 thousand kilometres are state-owned. Recent extension of the motorway system with numerous tunnels has been a significant improvement to the quality of the road transport and has made transport around the country faster and safer. The number of vehicles is increasing year after year, with passenger cars representing the largest share of traffic by far. Diesel is the most used fuel. Traffic volume is increasing, and is mostly done by vehicles with less than 3.5 tonnes. Despite the constant increase in traffic, the relative number of unforeseen events with severe consequences on the national road network is decreasing, which undoubtedly shows the positive impact of the newly built motorways.

Motorway tunnels are relatively new and meet the requirements of the regulations. There are far fewer serious accidents in them than on an open road. Accidents and incidents are relatively rare and result in no or only minor damage to vehicles, and without serious consequences for participants and facilities. In recent years the number of road accidents of all categories has been slightly falling, and the number of incidents has been slightly rising. Despite that, there is a significant downward trend in the average time when an individual event requires the temporary closure of a tunnel or a part of a tunnel. An effective emergency response system has been established.

INCIDENTES/ACCIDENTES EN TÚNELES DE AUTOPISTAS EN ESLOVENIA

El transporte por carretera en el territorio de Eslovenia tiene una larga tradición y es de gran importancia para la sociedad y su desarrollo. En la actualidad, hay aproximadamente 38,8 mil kilómetros de carreteras de diversas categorías en Eslovenia, de los cuales 6,5 mil kilómetros son de propiedad estatal. La reciente ampliación del sistema de autopistas con numerosos túneles ha supuesto una importante mejora de la calidad del transporte por carretera y ha hecho que el transporte por el país sea más rápido y seguro. El número de vehículos aumenta año tras año, y los turismos representan la mayor parte del tráfico con diferencia. El gasóleo es el combustible más utilizado. El volumen de tráfico está aumentando, y lo hacen sobre todo los vehículos de menos de 3,5 toneladas. A pesar del aumento constante del tráfico, el número relativo de imprevistos con consecuencias graves en la red nacional de carreteras está disminuyendo, lo que sin duda demuestra el impacto positivo de las autopistas recién construidas.

Los túneles de las autopistas son relativamente nuevos y cumplen los requisitos de la normativa. En ellos se producen muchos menos accidentes graves que en una carretera abierta. Los accidentes e incidentes son relativamente raros y no provocan daños en los vehículos, o son de poca importancia, y no tienen consecuencias graves para los participantes y las instalaciones. En los últimos años, el número de accidentes de carretera de todas las categorías ha descendido ligeramente y el número de incidentes ha aumentado ligeramente. A pesar de ello, hay una tendencia significativa a la baja en el tiempo medio en que un suceso individual requiere el cierre temporal de un túnel o de una parte del mismo. Se ha establecido un sistema eficaz de respuesta a las emergencias.

INCIDENTS/ACCIDENTS DANS LES TUNNELS AUTOROUTIERS EN SLOVÉNIE

Le transport routier sur le territoire de la Slovénie a une longue tradition et revêt une grande importance pour la société et son développement. Aujourd'hui, la Slovénie compte environ 38,8 mille kilomètres de routes de différentes catégories, dont 6,5 mille kilomètres appartiennent à l'État. L'extension récente du réseau autoroutier avec de nombreux tunnels a constitué une amélioration significative de la qualité du transport routier et a rendu le transport dans le pays plus rapide et plus sûr. Le nombre de véhicules augmente d'année en année, les voitures particulières représentant de loin la plus grande part du trafic. Le diesel est le carburant le plus utilisé. Le volume du trafic est en augmentation, et il est principalement assuré par des véhicules de moins de 3,5 tonnes. Malgré l'augmentation constante du trafic, le nombre relatif d'événements imprévus ayant des conséquences graves sur le réseau routier national est en baisse, ce qui montre sans aucun doute l'impact positif des autoroutes nouvellement construites.

Les tunnels autoroutiers sont relativement récents et répondent aux exigences de la réglementation. Les accidents graves y sont beaucoup moins nombreux que sur une route ouverte. Les accidents et les incidents sont relativement rares et n'entraînent aucun dommage ou seulement des dommages mineurs aux véhicules, et sans conséquences graves pour les participants et les installations. Ces dernières années, le nombre d'accidents de la route, toutes catégories confondues, a légèrement diminué, et le nombre d'incidents a légèrement augmenté. Malgré cela, on observe une tendance significative à la baisse de la durée moyenne pendant laquelle un événement individuel nécessite la fermeture temporaire d'un tunnel ou d'une partie d'un tunnel. Un système efficace d'intervention d'urgence a été mis en place.

1. ROAD TRANSPORT IN SLOVENIA

1.1. Slovenia [1]

The Republic of Slovenia is a country in central Europe situated at the intersection of the Alpine, Mediterranean, Panonic and Dinaric worlds (Figure 1). Diversity in such a small space is complemented by preserved nature; more than half of Slovenia is covered by forests and more than a third of the territory belongs to the Natura 2000 zones. Slovenia is a green, creative, smart country and a full member of the European Union that can maintain its identity. The free market-based economy is dynamic, digitised, innovative, and focused towards sustainable development. We are proud of our achievements in sports, advanced technologies and science, as well as vibrant artistic creation, and heritage preserved with love. Some facts about the country:

- capital city: Ljubljana,
- population: 2 076 595 (October 2018),
- land area: 20 271 km2,
- land border length: 1,322 km: 318 km with Austria, 232 km with Italy, 100 km with Hungary and 672 km with Croatia,
- coast length: 47 km,
- highest peak: Triglav (2,864 m),
- largest lake: Lake Cerknica (26 km2),
- longest river: Sava (221 km), and
- average age of population: 43.3 years (October 2018).

Figure 1 Location of Slovenia [2]

1.2. History of road transport [3][4]

The beginnings of traffic on the territory of Slovenia go far into history. A wooden wheel from the Copper Age, estimated to be 5200 years old, was found in the Ljubljana Marsh (Figure 2). From the late Copper Age until the 5th century CE, routes that were part of the Amber Road between the Baltic areas and the Mediterranean world led through Slovenia.

During the Roman Empire, the road network in Slovenia developed strongly. Quality built and maintained roads provided good and fast connections between Roman provinces. The routes of Roman roads guided road connections in the Middle Ages. The roads that led through Slovenian soil in the Middle Ages show a noticeable transit character from the point of view of international traffic, and to a good extent this finding also holds today. The development of the road network has also been affected by the question of who is obligated to build new and maintain old roads. Paying for the use of roads for the purpose of maintaining them by the owners did not deliver desired results: roads were either poorly maintained or not maintained at all, and the funds collected were misused. In the 18th century the Austro-Hungarian authorities recognized the role of good roads for promoting trade, comfort of subjects, and benefits for cities and markets. Legislation has been laid down with designated authorities responsible for construction and maintenance of roads, which is a good foundation for understanding the importance that roads have for Slovenia even almost 300 years later, when horses and wooden wheels were completely replaced by motor vehicles. The first car was brought to Ljubljana way back in 1898 by an inventor baron Anton Codelli.

Figure 2 Oldest wheel found in Slovenia,
Author: Petar Milošević – Lastno delo; licenca: CC BY-SA 4.0;
URL: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=88421247

1.3. Road infrastructure [5][7]

At present Slovenia has around 38.8 thousand kilometres of public road network, which is divided into national, and municipal roads (Figure 3). Around 6.5 thousand kilometres of national roads (17 %) are owned by the State, while around 32.5 thousand kilometres (84 %) are owned by individual municipalities. Construction, maintenance, and management of public roads is financed from public funds.

National roads are further divided into motorways and expressways (9.5 %), and main roads (90.5 %). Motorways and expressways are the backbone of the Slovenian road network. In 1995, an intensive expansion under the National Program for the Construction of Motorways began in North-South and East-West directions, which are consistent with the course of the Trans European Road Network. The main part of the construction has recently been completed and is being followed by complementary projects that will extend the

Figure 3 The road network of Slovenia

motorway system further. The current length of motorways and expressways in Slovenia is 616 km. The main problem of the motorway system is that there are mostly no suitable motorway alternatives within the country in the event of the temporary exclusion of a particular section from traffic due to an unplanned event. In such a case, traffic from motorways and express roads must be diverted to main roads with much lower flow capacity, which makes traffic congestions inevitable.

Most motorway tunnels were built during the intensive construction of the motorway network. Their current length is 27 km (Figure 4), which represents 4.4 % of the total motorway network. There are currently 14 tunnels in operation that are longer than 500 m, and 10 of these lie on the current route of European road corridors (Figure 5). In the supplementary motorway construction program, several more tunnels are planned for the construction, some of them longer than 500 m.

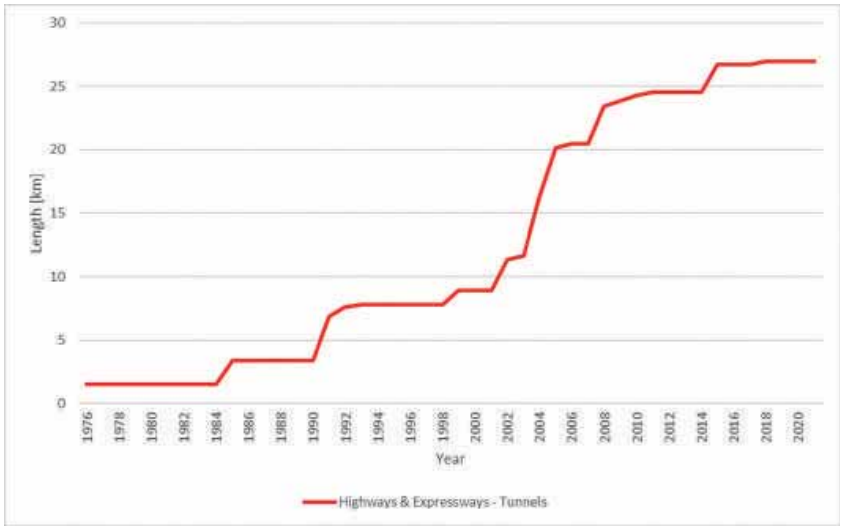


Figure 4 Dynamics of construction of tunnels on the Slovenian motorway system

Apart from the single-tube Karavanke Interstate Tunnel, where the construction of a second tunnel tube is currently underway, all other motorway tunnels are two-tube tunnels built and equipped according to regulations. Except for Karavanke Tunnel, trafficking of dangerous goods through tunnels is not restricted. Several control centres ensure undisturbed operation of tunnels and are responsible for initiating planned emergen-

cy procedures. Tunnels are maintained regularly and, over longer periods of time, comprehensive refurbishment works are carried out mainly on the electro-mechanical equipment. Risk analyses have established that traffic through tunnels is carried out with lower than permissible safety risks. Wherever it was established that risks have been exceeded, appropriate additional safety measures have been implemented (i.e. additional speed limitation, speed control, safety distance warning, thermal scanning of heavy goods vehicles). In the coming years, tunnels between 500 m and 1000 m will be upgraded with mechanical ventilation systems, which will significantly reduce existing risks.

Figure 5 Tunnels on the Slovenian motorway system and TERN corridors

When Directive 2004/54/EC came into effect in 2006, many tunnels were relatively new and with the necessary safety systems according to the best technical practice at the time already installed. Their compliance with the requirements of the Directive was therefore feasible within the prescribed period and at reasonable costs. The last regular inspection of tunnels by the responsible national inspection body in 2021 found that all tunnels comply with the requirements of the regulations (Figure 6).

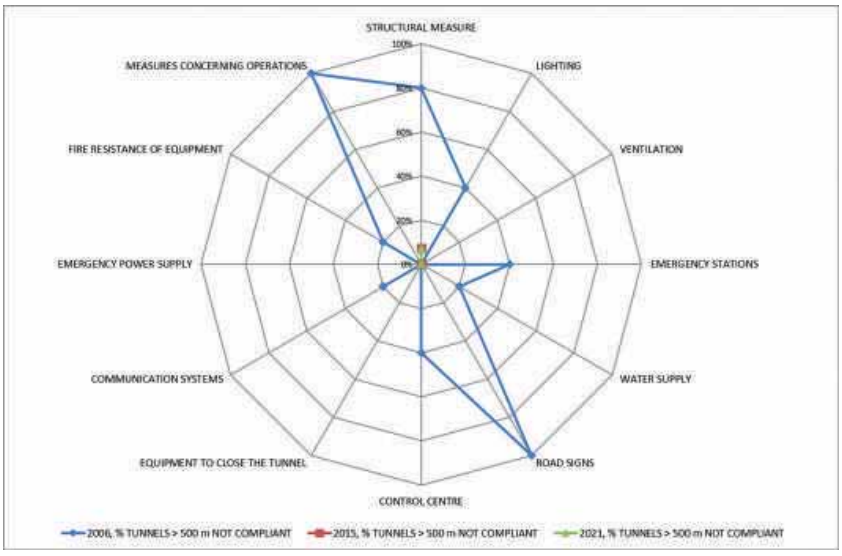


Figure 6 Share of safety systems of tunnels > 500 m which do not meet the requirements of the regulations

1.4. Vehicles [6]

Number of vehicles registered in Slovenia increases from year to year. More than 90 % are passenger cars, about 8 % are trucks, and other vehicles make up about 2 % (Figure 7).

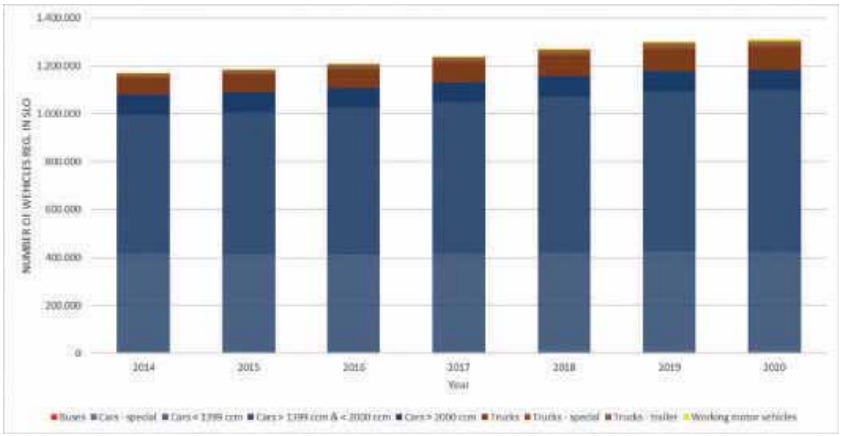


Figure 7 Vehicles registered in Slovenia

Vehicles are powered by either petrol or diesel, with only about 1 % of vehicles using other energy sources (Figure 8). Number of diesel vehicles registered in Slovenia is increasing. In 2014, their share was 47 %, and in 2019 it was 54 %.

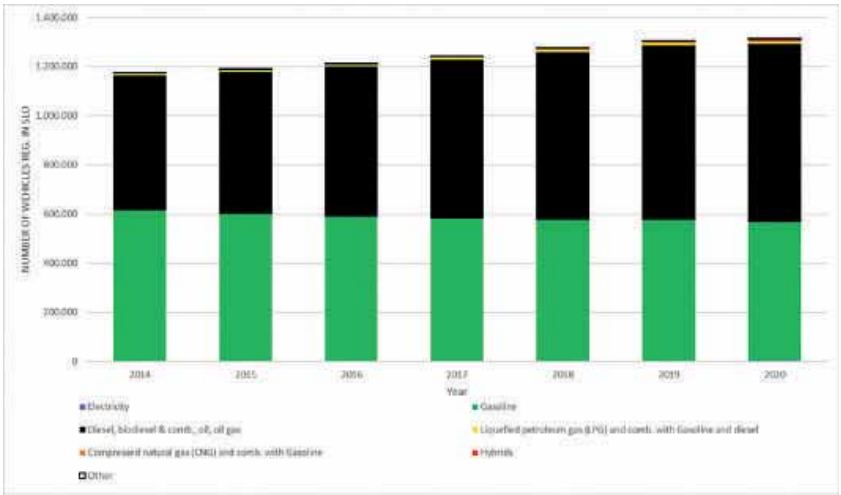


Figure 8 Vehicles registered in Slovenia by fuel type

1.5. Motor fuels [6]

In Slovenia, diesel is the most used fuel in absolute terms. The increase in the use of diesel has coincided with the construction of the motorway network. Use of gasoline follows, while the use of other means (excluding liquefied petroleum gas) is negligible (Figure 9).

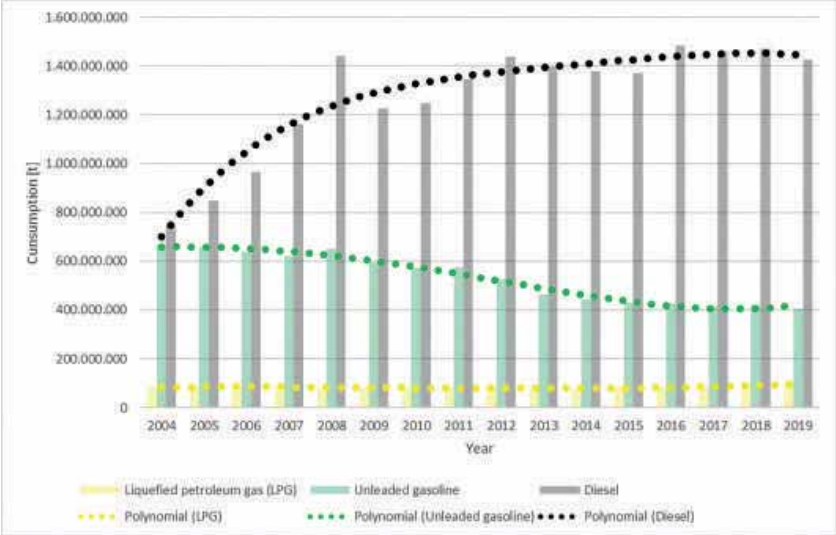


Figure 9 Consumption of motor fuels in Slovenia

1.6. Traffic volume [7]

The volume of traffic on national roads increased each year between 1999 and 2019. In total the volume increased by 64 %, with the volume on motorways alone increasing by as much as 190 %. Motorways and expressways have increasingly become the backbone of the road network. In 2016 the combined traffic volume on motorways and expressways reached the traffic volume on the main roads. In 2019 total traffic volume on motorways and expressways exceeded traffic volume on main roads by 8 %, despite the total length of motorways and highways being only 10.5 % of the total length of the main roads (Figure 10).

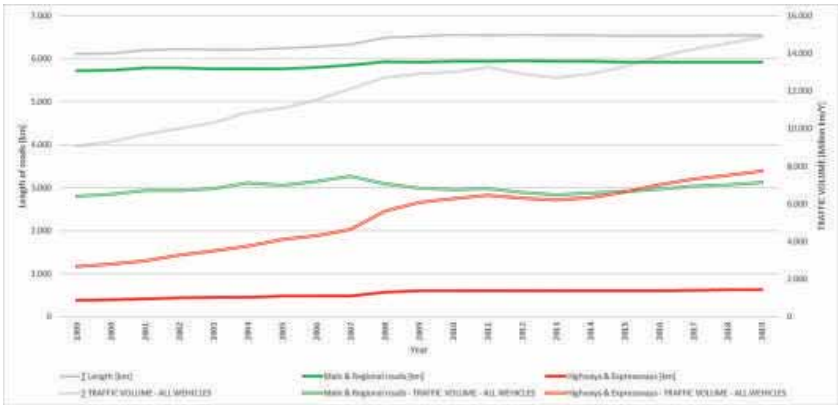


Figure 10 Traffic volume on national roads

Most of the traffic volume on national roads is carried out by vehicles under 3.5 tonnes. In 2000 their share was 92 % and the share of traffic volume of buses and heavy goods vehicles was 8 %. In the following years, the share of lighter vehicles slightly decreased, and the share of heavy vehicles increased. During the period from 2000 to 2019, the volume of light vehicles grew by 57 %, and the share of buses and heavy vehicles by 96 %, or, on average by 2 % per year for light vehicles, and 4 % per year for heavy vehicles. The traffic volume of both categories of vehicles is likely to increase in the coming years, thus increasing the likelihood of unforeseen events, including in tunnels. More vehicles will be indirectly involved in these future events and it is very likely that the congestions will become even longer than they are at the present.

1.7. Share of heavy goods vehicles > 3.5 t [10]

Due to their high fire potential, heavy goods vehicles heavier than 3.5 tonnes pose a particular risk to tunnels, especially those longer than 500 m. According to the tunnels control centres data, their share of the total number of vehicles decreased by about a tenth between 2013 and 2019, but was always higher than the 15 % when risks have to be checked (Figure 11).

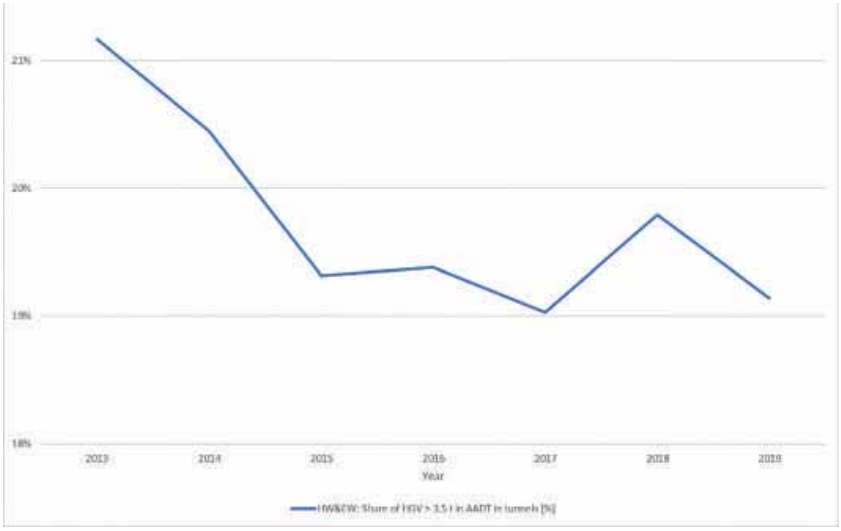


Figure 11 Share of heavy goods vehicles > 3,5 tonnes in AADT in tunnels

1.8. Road accidents with severe consequences [8]

According to official police data, there has been a significant drop in the number of road accidents with severe consequences for participants on Slovenian national roads in recent years, despite the annual increases in traffic volume. Since the year 2000, the total number of these events has decreased by 74 %, with a simultaneous increase in traffic volume of 60 % (Figure 12). The positive impact of the new motorway system is evident, with only 17 % of serious accidents occurring on motorways in 2019. In 2019, there was a serious accident about every 25 million kilometres of traffic volume on the main road system, and about every 136 million kilometres on the motorway system, i.e. a ratio of 1 to 5.44.

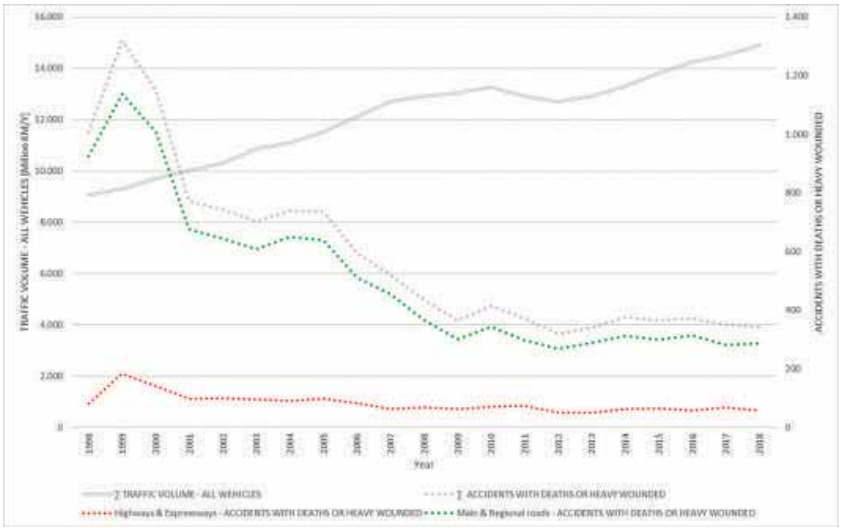


Figure 12 Accidents with severely injured or died on national roads

A total of 1,806 serious accidents occurred between 2015 and 2019, with 82 % of them resulting in serious physical injury, and 18 % in a participant's death. Most of these accidents have happened:

- in June, July and August (in total 36 %),
- on Saturdays and Sundays (in total 35 %),
- in the afternoon from 14:00 to 18:00 (in total 29 %),
- in clear weather (64 %),
- on dry surface (78 %),
- during normal traffic conditions (64 %),
- due to a head-on collision (24 %), vehicle overturning (18 %), or a side-collision (17 %),
- due to unadjusted speed (39 %),
- outside of a settlement (89 %), and
- with passenger cars (71 %), motorcycles (28 %), heavy goods vehicles (15 %), and buses (1.3 %).

During this period, only 2 such events occurred in the tunnels, representing a negligible share of 0.11 %. Considering the length of tunnels throughout the road system, it can be concluded that serious accidents occur in tunnels about 40 times less than accidents on the open road. One possible explanation for this could be the fact that the maximum permitted speed in all two-tube tunnels in Slovenia is 100 km/h, while the maximum permitted speed on the open motorway is 130 km/h, or 90 km/h on main roads outside settlements. Unadjusted speed is by far the biggest cause of serious accidents.

In 2017 and 2018, motorway tunnel manager DARS was experimenting with performing point to point speed measurements in tunnels. The results were above expectations as even minor road accidents were virtually gone. Due to this experience these systems will shortly become a part of the permanent safety equipment on the entire motorway and express road system.

1.9. Fires on means of transport [9]

The authority in charge of the protection and rescue system in the event of natural and other disasters also records fires on means of transport. Common statistics on fire events by type of traffic (road, agricultural and construction machinery, railway, air, water) are kept, but not the data about which rank of road the events occurred on, and which types of vehicles were involved. However, it is evident that there are many fire events on road vehicles, and that they are on the rise in absolute terms (Figure 13).

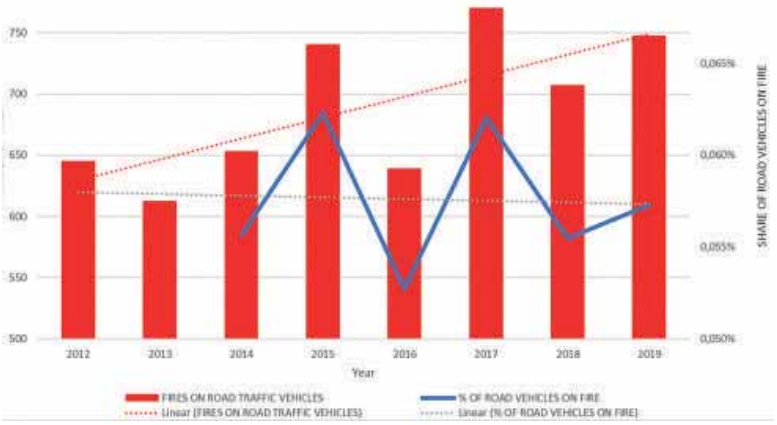


Figure 13 Fires on means of road vehicles

Tunnel fires are events that pose an exceptional danger to users, emergency services, and tunnel infrastructure. The information points to the fact that the fire of a vehicle in a tunnel is a realistic option. The consequences for users and the infrastructure itself should try to be minimised by a proper arrangement of tunnel construction, installed safety systems, and organised response by fire brigades and other competent services.

2. MOTORWAY TUNNELS [10]

2.1. Accidents/incidents

Since 2007, DARS, as the manager of the Slovenian motorway system and motorway tunnels, is running a detailed record for tunnels longer than 500 m for:

- accidents, and
- incidents which required the tunnel or a part of the tunnel to be temporarily excluded from traffic, or when the intervention of emergency services were required.

Each such event is reported by the tunnel control centre with information about the tunnel, ongoing traffic, status of the safety systems, response of the emergency services, aftermath, and proposals for improvement.

Between 2015 and 2019 there were 193 incidents in motorway tunnels, 66 of which were traffic accidents and 127 incidents. Temporary traffic closures were carried out for a total of 204 hours, for an average of 1 hour and 3 minutes (Figure 14). Two participants were fatally injured in the incidents - in one case due to a rapid deterioration of the medical condition, in another due to improper driving.

The annual number of incidents in this period minimally increased, and the number of traffic accidents slightly declined. However, there is a clear trend of reducing the duration of temporarily closing the tunnel or part of the tunnel from operation at the time of these events. Tunnel manager has no influence on the number of events caused by users, but the reduction of emergency closure times certainly demonstrates effectiveness of the emergency services.

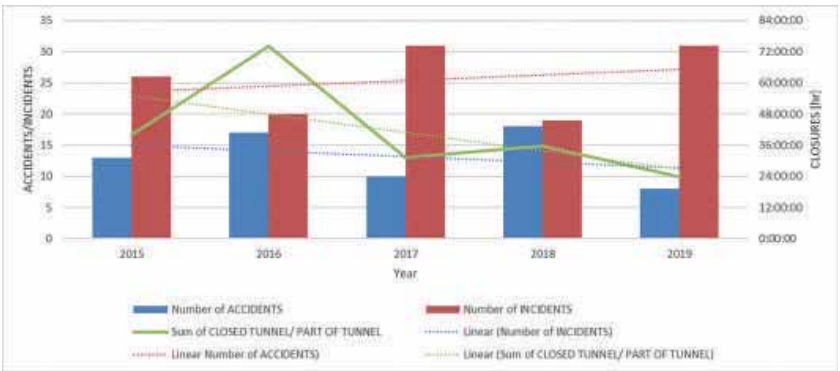


Figure 14 Accidents and incidents in tunnels longer than 500 m in 2015-2019

Between 2015 and 2019, most accidents and incidents occurred in motorway tunnels longer than 500 m:

- inside the tunnel or with events referring to the entire tunnel (79 %),
- as light accidents with only damage to property or minor injuries to participants and vehicle failures (in total 60 %) (Figure 15),
- in January, June and August (in total 36 %),

- during the working days, mostly on Fridays and Wednesdays (in total 36 %),
- in the afternoon (15:00-16:00) and morning (7:00-8:00) (in total 17%),
- on a normal, dry surface (92 %),
- mainly involving passenger cars (52 % of events) (Figure 16), and
- with damage to tunnels and tunnel equipment occurring only in a small number of events (8 %)

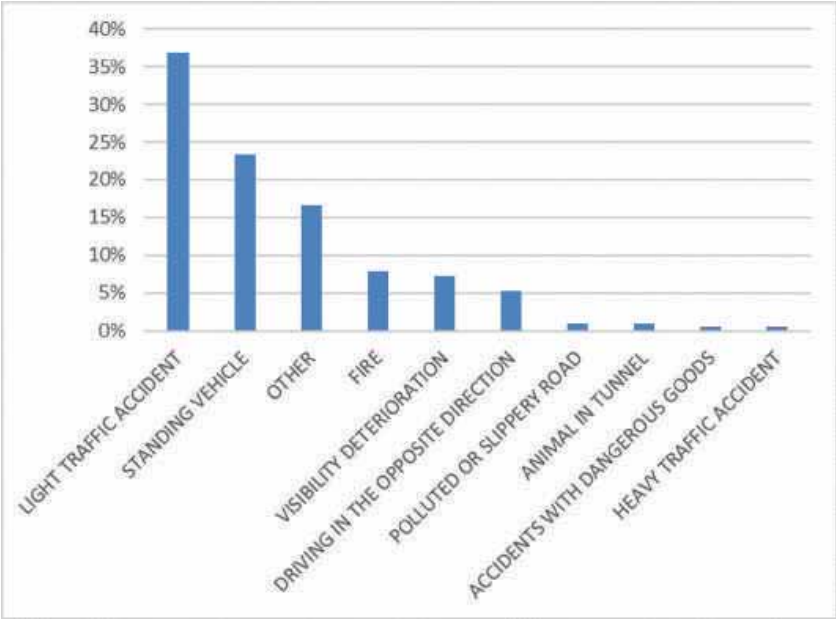


Figure 15 Accidents/incidents in tunnels longer than 500 m in 2015-2019

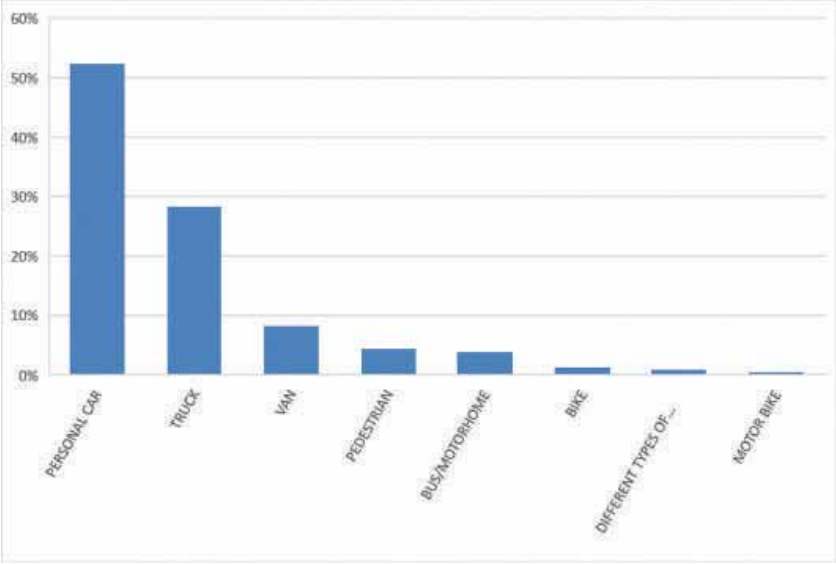


Figure 16 Participated road transport means in accidents/incidents in tunnels longer than 500 m in 2015-2019

2.2. Fire events

Between 2015 and 2019 the fire events occurred in motorway tunnels longer than 500 m:

- 14 (88 %) with vehicles involved and 2 (12 %) due to technical failures,
- on passenger cars (44 %), heavy goods vehicles (38 %), and vans (6 %),
- the average tunnel closure due to a fire lasted 4 hours, with the maximum closure for the tunnel being repaired after a lorry fire at just under 24 hours,
- users had an active impact on suppressing fire development (72 %) using fire extinguishers or a hydrant network,
- participants in the events did not suffer any consequences, and
- tunnel damage occurred only in a small number of events (9%).

2.3. Concept of emergency response

The concept of response by emergency services, police, and tunnel manager DARS is established. Units act in accordance with the joint and their specific operational plans. Units are distributed throughout the country, and are suitably equipped and trained to carry out the tasks under their respective responsibilities. In majority of cases only DARS tunnel manager's units are activated. In the case of minor road accidents, the police are activated. In the case of serious road accidents, fire accidents, or accidents with hazardous substances involved, fire and emergency medical units are also activated.

The role of firefighters and emergency medical units is particularly important in serious events. In Slovenia, the fire protection of longer road tunnels is carried out by professional or semi-professional firefighting units, which are in the possession of special firefighting vehicles, and must not be located further than 15 km (Figure 17) from the tunnels. A network of local emergency medical units is also effective. They usually come to the location of the event with minimal delay relative to firefighters. Police and tunnel manager's units' response time can vary according to their location at the time of the event.

Figure 17 Tunnel Fire Brigade Units

2.4. Rescue services' exercises

In addition to field actions, rescue units also participate in regular annual tunnel accident exercises, organised by either the tunnel manager DARS or the state protection and rescue system. Up to 7 exercises in various forms are organised annually for motorway tunnel systems, which can be either practical on the ground, table top exercises, or detailed analyses of emergency interventions (Figure 18). The exercises check the current preparedness of response to events, and determine measures to address any deficiencies.

Figure 18 Regular exercises and drills for tunnel rescue teams

2.5. Actions by the competent entities in the events of an emergency

The actions taken by the competent entities at the events from 2015 to 2019 were effective. The units carried out their tasks in a coordinated manner, emergency measures were carried out without delay, and tunnel closures only took the minimal required time to ensure that traffic could safely run through the tunnel or at least part of the tunnel again. Following the completion of emergency rescue procedures, in cases of serious accidents, a prescribed procedure for detecting potential offences has been executed by police and court investigating authorities. Following events with a severely damaged tunnel structure or tunnel equipment, the condition of the tunnel and tunnel equipment were inspected by the DARS tunnel manager's special commission composed of experts from different technical profiles, before reopening the tunnel.

During this period, emergency events in longer motorway tunnels required interventions of professional or partially professional firefighting units at a total of 65 events (34 % of all events). The interventions consisted of either a rescue operation, a technical rescue, or a preventive action (Figure 19). Activations in cases of minor traffic accidents were almost always taken advantage of to test the preparedness of one of the fire brigades. This caused no extra cost or traffic obstruction, and the unit was able to use this as an additional training exercise.

The average time from the start of the event to firefighters getting into the tunnel was 14 minutes and 34 seconds. Considering the time required to automatically or manually detect the event and to transfer the information to the fire brigade, on average, the intervention began approximately 10 minutes after the firefighters were activated, which was in line with the national regulation.

3. CONCLUSION

The paper described the issue of incidents/accidents in long motorway tunnels, which are part of a branched road infrastructure of Slovenia.

Road transport has always had great importance for this geographical area. Today, despite the steady increase in the number of vehicles and traffic volume, the number of road accidents with severe consequences is decreasing, also as a result of the recently built motorways. The safety situation in motorway tunnels, which account for about 4% of the motorway system, is significantly better than on the open road. An important fact is that traffic through tunnels is allowed to flow at lower speeds than on the predominant part of road infrastructure.

Tunnels are built according to regulations and operated at lower risks than permissible. In the event of an emergency, a response mechanism of trained and adequately equipped emergency services, police and the tunnel manager DARS is triggered. Response actions are effective. Emergency temporary traffic closures due to incidents/accidents are getting shorter, which has a beneficial effect on the fluidity of the motorway system, which cannot be replaced equally by diversions to other state roads.

In the future further increases in traffic congestions and more emergencies are expected. The current approach to managing tunnels and the concept of response from the emergency services do not require change, the only thing necessary is the quality maintenance of the achieved level of safety and service for users.

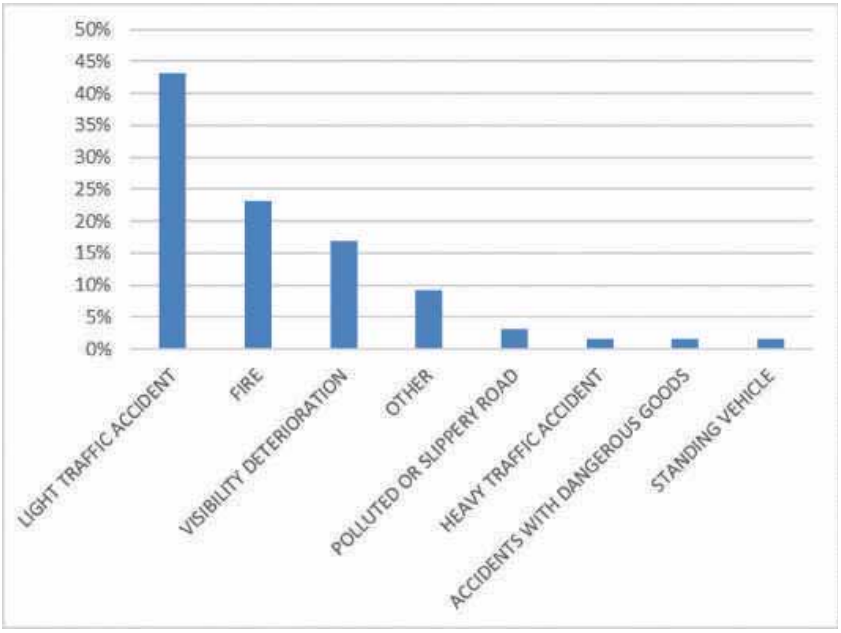


Figure 19 Activating firefighters due to tunnel incidents longer than 500 m in 2015-2019

4. SOURCES

Data from the following sources have been used:

[1] https://www.gov.si/podrocja/drzava-in-druzba/o-sloveniji/

[2] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Slovenia_in_Europe.svg

[3] https://sl.wikipedia.org/wiki/Cesta

[4] Vinko Rajšp, 1985, Dosedanje raziskave zgodovine prometa na slovenskem, Zgodovinski časopis, 41-47

[5] Družba za avtoceste Republike Slovenije d.d. - https://www.dars.si/

[6] Statistični urad Republike Slovenije - https://www.stat.si/statweb

[7] Direkcija za ceste Republike Slovenije - https://www.gov.si/drzavni-organi/organi-v-sestavi/direkcija-za-infrastrukturo/

[8] Agencija za varnost prometa Republike Slovenije - https://www.avp-rs.si/

[9] Uprava Republike Slovenije za zaščito in reševanje - https://www.gov.si/drzavni-organi/organi-v-sestavi/uprava-za-zascito-in-resevanje/

[10] Družba za avtoceste Republike Slovenije d.d. / Uradnik za varnost v predorih

INCENDIOS EN TÚNELES: FORMACIÓN DEL PERSONAL OPERATIVO

J. Andrés Viéitez Martín
Oficial del Cuerpo de Bomberos C.M e Instructor de Applus+ TST

Es objeto de esta ponencia realizar una valoración sobre los aspectos de seguridad en los incendios en túneles, centrándonos en aquellos relacionados directa o indirectamente, con la intervención de los cuerpos de bomberos cuando el evento se desencadena; y dentro de estos, la formación del personal de emergencia.

Para esta exposición, nos basamos en las experiencias recabadas en el ámbito operativo, así como en los numerosos cursos impartidos a muy diferentes servicios de bomberos y a lo largo de 15 años, en las instalaciones que actualmente gestiona Applus+ Laboratories en Asturias (España), así como en cursos, simulacros y pre-planes desarrollados en diferentes cuerpos de bomberos y túneles singulares en diferentes puntos de España.

De estas experiencias, concluimos que, en general, existe bastante desconocimiento acerca de cómo afrontar este tipo de intervenciones debido a su baja frecuencia de ocurrencia, lo que impide contar con experiencias operativas reales y relaja el interés por abordar el tema. podemos decir que la improvisación es la tónica general.

Unido a esto, la falta de escenarios adecuados donde poder realizar ensayos y maniobras a escala real hace que los Cuerpos de Bomberos no cuenten con procedimientos operativos específicos y mucho menos con pre-planes de intervención adecuados a túneles singulares.

Como forma de paliar esta carencia, consideramos necesario abordar procesos formativos específicos que incluyan, como mínimo, 20 horas de formación teórico-práctica con reciclajes anuales, así como la elaboración de procedimientos operativos consensuados con las empresas u organismos gestores de las infraestructuras. Al menos para determinados túneles, es también esencial la planificación previa de la intervención.

TUNNEL FIRES: FIREFIGHTERS FULL SCALE TRAINING

The purpose of this paper is to assess the safety aspects of fires in tunnels, focusing on those directly or indirectly related to the intervention of the fire brigade when the event is triggered, and within these, the training of emergency personnel.

For this presentation, we use the experiences gathered in the operational field, as well as on the numerous courses given to very different fire services and over 15 years, in the facilities currently managed by Applus+ Laboratories in Asturias (Spain), as well as in courses, simulations and pre-plans developed in different fire brigades and singular tunnels in different parts of Spain.

From these experiences, we conclude that, in general, there is a lack of knowledge about how to deal with this type of interventions due to their low frequency of occurrence, which prevents us from having real operational experiences and relaxes the interest in addressing the issue. We coud say that improvisation is the general trend.

In addition to this, the lack of suitable scenarios for carrying out full-scale tests and manoeuvres means that the fire brigades do not have specific operational procedures, let alone pre-plans for suitable interventions in singular tunnels.

As a way to alleviate this deficiency, we consider it necessary to address specific training processes, including at least 20 hours of theoretical and practical training, with annual refresher courses, as well as the development of operational procedures agreed with the companies or bodies managing the infrastructure. At least for certain tunnels, pre-planning of the intervention is also essential.

INCENDIES DANS LES TUNNELS : FORMATION DU PERSONNEL

L'objectif de cet article est d'évaluer les aspects de sécurité des incendies dans les tunnels, en se concentrant sur ceux qui sont directement ou indirectement liés à l'intervention des pompiers lorsque l'événement est déclenché, et au sein de ceux-ci, à la formation du personnel de secours.

Pour cette présentation, nous basons sur les expériences recueillies dans le domaine opérationnel, ainsi que sur les nombreux cours dispensés à des services d'incendie très différents et pendant plus de 15 ans, dans les installations actuellement gérées par Applus+ Laboratories dans Asturies (Espagne), ainsi que dans les cours, simulations et plans préalables développés dans différents corps de pompiers et tunnels singuliers dans différentes régions d'Espagne.

De ces expériences, nous concluons qu'en général, il y a un manque de connaissances sur la façon de traiter ce type d'intervention en raison de sa faible fréquence d'occurrence, ce qui empêche les expériences opérationnelles réelles et détend l'intérêt d'aborder la question. Nous pouvons dire que l'improvisation est la tendance générale.

En outre, l'absence de scénarios appropriés pour effectuer des essais et des manœuvres en grandeur réelle fait que les pompiers ne disposent pas de procédures opérationnelles spécifiques, et encore moins de plans préalables d'intervention adaptés aux tunnels singuliers.

Pour pallier cette carence, nous considérons qu'il est nécessaire d'aborder des processus de formation spécifiques, comprenant au moins 20 heures de formation théorique et pratique avec des cours de recyclage annuels, ainsi que le développement de procédures opérationnelles convenues avec les entreprises ou les organismes gérant l'infrastructure. Au moins pour certains tunnels, la planification préalable de l'intervention est aussi essentielle.

INTRODUCCIÓN

La seguridad en túneles se apoya en tres pilares fundamentales:

1. Todos los aspectos de ingeniería, desde el diseño, trazado, dimensiones… hasta la ventilación y otros equipamientos relacionados con la seguridad activa y pasiva.
2. La gestión de la infraestructura, el tráfico, el mantenimiento, los procedimientos, análisis de sucesos, etc.
3. Finalmente, cuando falla lo anterior, quedaría la correcta gestión de la emergencia, incluyendo la coordinación con servicios externos y comenzando por el Centro de Control como punto neurálgico de detección, primeros datos, activación de recursos, seguimiento, manejo de la evacuación inicial, del sistema de ventilación, equipos de primera intervención, incidencia en el entorno y muchos otros elementos que afectan directamente o indirectamente a la resolución satisfactoria.

Dentro de este último pilar, la gestión de la emergencia, quiero centrarme en la CAPACITACIÓN DE LOS INTERVINIENTES, en especial el personal de los Cuerpos de Bomberos afectados, pero también de los equipos de primera intervención de las explotadoras, así como personal de los Centros de Control y responsables a todos los niveles.

Durante mis 30 años de experiencia en el Cuerpo de Bomberos y los más de quince que colaboro en el diseño, organización e impartición de cursos de capacitación teórica y práctica en diferentes escenarios (en especial en las instalaciones que gestiona actualmente Applus+ Laboratories en el Principado de Asturias), hemos llegado a una serie de conclusiones que paso a describir, respecto a la capacitación y gestión de los Servicios de Bomberos en lo tocante a los incendios en túneles, entendiéndose que son conclusiones referidas a la situación en España.

ESTADO DE LA SITUACIÓN

En general, los cuerpos de bomberos parecen sensibles al problema que entrañan los incendios en estas instalaciones, pero no suelen considerarlo una prioridad a la hora de planificar la formación o procedimentar las actuaciones. Posiblemente por la baja frecuencia de incendios que ocurren en las mismas, no se percibe como una necesidad urgente.

Aunque existe cierta información y algunos conocimientos básicos del comportamiento del incendio en los túneles, no está tan claro como abordar una intervención mayor ni cómo aprovechar las características del túnel a favor de la intervención. Confían en que el personal de la instalación les diga "como" y "donde" actuar.

Igualmente, existe bastante desconocimiento acerca de la gestión de la ventilación por parte de los servicios de emergencia, que esperan del Operador que les resuelva la situación, y viceversa por parte del Operador, que no tiene claras las necesidades ni conoce las tácticas de los servicios de extinción. En la mayor parte de los casos, apenas se han hecho simulacros conjuntos, persistiendo errores ya identificados en el gran incendio del Mont Blanc.

No se ha generalizado la adquisición de equipos específicos como ventiladores móviles de gran caudal o equipos de protección respiratoria de larga duración, ni de otros que podría facilitar enormemente la actuación. Incluso servicios de bomberos importantes, con gran presupuesto y una problemática compleja en cuanto a túneles, descuidan este aspecto en sus nuevas adquisiciones.

Pocos servicios cuentan con procedimientos específicos o pre-planes de intervención adecuados a los túneles de su entorno. Suelen trabajar con procedimientos muy generales, aceptables para pequeños o medianos incendios, pero insuficientes para un siniestro mayor.

Si bien es verdad que no cuentan con estos procedimientos para túneles, tampoco cuentan, en muchos casos, con procedimientos para otro tipo de intervenciones más frecuentes, o los tienen obsoletos o incompletos y el desarrollo de pre-planes es muy escaso o nulo.

El bombero no ha realizado prácticas de buceo profundo en humos, o no tiene hábitos en este tipo de situaciones ni en la realización de largos tendidos en interiores, trabajo coordinado en equipos numerosos en visión cero, lectura de las condiciones del estrato de humos, etc… propios de los incendios en túneles.

Téngase en cuenta que las penetraciones más profundas a las que suele enfrentarse un bombero en su entorno diario rara vez alcanza los 100 metros que pueden darse en garajes, naves industriales, galerías de servicio y poco más.

La gestión específica del mando por sectores y la jefatura de la intervención, así como la coordinación entre diferentes servicios, presenta limitaciones severas en muchos casos. Si la actuación del bombero o el mando intermedio presenta las carencias ya mencionadas, en el caso de los oficiales que ejercen el mando de sectores de intervención y la jefatura de la misma, la situación se complica, en especial en el caso de un gran incendio, en el que además debe coordinarse la estrategia con los diferentes actores, como Operadora del Túnel, Fuerzas de Seguridad, Servicios Sanitarios y otros posibles servicios públicos o privados. Esto sucede en otros grandes incendios, pero aquí el entorno es menos conocido.

PROPUESTA DE MEJORA

Sin pretender que sea la solución definitiva para mejorar la situación, pensamos que el hecho de unificar unos programas formativos, a ser posible comunes en los diferentes Servicios de Bomberos del Estado, vendría a solventar en parte las carencias mencionadas.

La formación mínima en incendio en túneles que debería recibir un bombero profesional, que ya cuenta con su formación previa como bombero, debería ser al menos de 20 horas teórico-prácticas en las que se impartirían los siguientes contenidos:

Teóricos

Problemática General

Se trata de una clase introductoria que centra el problema de este tipo de siniestros, sus causas, su frecuencia, consecuencias, entornos, etc.

La Evolución del Fuego

Analizamos el comportamiento del incendio en un túnel, su desarrollo y progresión, potencia instantánea, fenómenos asociados, etc. En especial, se hace hincapié en el comportamiento del humo, su estratificación, retroceso, velocidad crítica y condicionantes.

Los Sistemas de Ventilación

Es una explicación general de los diferentes sistemas de ventilación que podemos encontrar en los túneles, con especial dedicación a la interacción que esa ventilación puede provocar en el incendio y cómo constituye una herramienta táctica (y en ocasiones estratégica) en la dirección y el control del incendio.

La Evacuación en Túneles

No solo desde el punto de vista de las infraestructuras y elementos de evacuación, sino atendiendo a la problemática que surge durante la misma en base al comportamiento de las masas, la necesidad de dirigirla adecuadamente y las implicaciones que tiene tanto iniciarla de inmediato como retrasarla.

Sistemas de Seguridad

Junto con la ventilación, es necesario que el interviniente conozca los diferentes elementos que pueden dotar un túnel y están enfocados en la seguridad, como sistemas de detección, señalización, iluminación, comunicaciones, resistencia al fuego, etc.

Estudio de casos históricos

Dadas las escasas intervenciones en este tipo de instalaciones, aprender de la experiencia de los demás es siempre una gran ayuda. Por ese motivo, es importante analizar los incendios de forma honesta y profesional, incluso de pequeños incendios pueden sacarse importantes lecciones. Existen numerosos incendios excelentemente analizados y a disposición de quien desee estudiarlos y extraer conclusiones operativas.

Orientación, Búsqueda y Rescate

Se trata de aplicar las técnicas de orientación en visión cero, búsqueda de víctimas y localización de focos de incendio y el rescate. Estas técnicas, que se realizan en fuegos estructurales, se estudiarían aquí adaptadas y aplicadas al escenario del túnel.

Equipamiento Especial

En esta materia, se aborda el uso de equipos específicos para incendios en túneles. Actualmente, algunos servicios de bomberos se han dotado (con mayor o menor éxito) de ventiladores móviles de gran caudal o de equipos de respiración de circuito cerrado. También existen en el mercado camillas con ruedas o camiones auto-bombas con diferentes modificaciones para intervenir en túneles.

Riesgos en la Intervención

Los riesgos a los que se expone el bombero en este tipo de intervenciones no son, en general, diferentes de cualquier otro tipo de intervención en incendios en interiores. No obstante, algunos de ellos se ven agravados por las características de la instalación, como la posibilidad de quedarse sin aire. Otros, sin embargo, desaparece o se ven muy reducidos, como la ocurrencia de un backdraught.

Metodología de Intervención

Los bomberos llamamos metodologías a las fases con que se aborda la intervención, desde que somos activados y nos dirigimos al siniestro hasta que finalizamos y regresamos al parque. En general, hablamos de cinco fases: activación (primeros datos); llegada (evaluación); planificación (plan de acción); ejecución (implementando la respuesta); seguimiento (evaluación continua) y finalización (retirada e informe).

Es necesario, en el caso de los mandos de mayor nivel o personal que pretenda especializarse, completar esta formación en un curso avanzado incrementando algunos de los contenidos más técnicos, como la evolución del fuego o los sistemas de ventilación y añadiendo los siguientes:

Dirección y Control de Siniestros

Se trata de adaptar los principios del mando en bomberos, a las características específicas de los incendios en túneles. Conceptos como el "puente de ataque" (muy útil en estas intervenciones); la gestión táctica de la ventilación; la sectorización por hastiales o accesos múltiples o la zonificación o sectorización "aguas arriba" y "aguas abajo" deben volcarse en la dirección y control del incendio.

Supuestos Prácticos

Dada la imposibilidad, en un marco formativo, de realizar simulacros que contemplen la realidad de un gran incendio en túnel y en el que además confluyan los diferentes actores, es necesario recurrir a la realización de supuestos prácticos en el aula. Con esto se puede conseguir, desde el punto de vista de la dirección y del control de siniestros, situaciones muy cercanas a la realidad en lo que respecta a la toma de decisiones y a la presión que se ejerce sobre el mando en la toma de decisiones.

Normativa relacionada

La mayoría de Servicios de Bomberos tienen entre sus competencias, en mayor o menor grado, la prevención de incendios, participando en el visado y en la inspección de las obras e instalaciones. Por ello,

es necesario incluir un desglose de la normativa existente al respecto de la prevención de incendios en túneles dirigida a la categoría de Oficiales.

Pre-Planes de intervención

Finalmente, y aunque como hemos mencionado en España no existe demasiada cultura en pre-planificación de siniestros, si se quiere abordar al completo la capacitación del cuadro superior de mando, en especial cuando se cuenta con túneles especialmente singulares desde el punto de vista del incendio, debería hacerse hincapié en este aspecto. Abordar la forma de confeccionar pre-planes de intervención no es otra cosa que adelantarlos a la ocurrencia del incendio en un túnel concreto, fijando de antemano el despacho de recurso, las pautas de actuación, la organización del escenario, las tácticas posibles y todo lo que conlleva la intervención.

Sobre el contenido práctico, la realización del mismo está muy condicionada por la disponibilidad de escenarios seguros donde realizarlo. En nuestro caso, nos centramos en las prácticas que hemos podido implementar en las instalaciones de Applus+ TST, siendo conscientes de que son únicas y es muy complicado poder desarrollar estas prácticas de forma segura en escenarios improvisados.

Prácticas

Evolución del fuego (demostración)

Demostración de evolución del fuego e influencia de la ventilación forzada, escenarios "aguas arriba" y escenarios "aguas abajo". Se inicia un fuego de 10Mw observando cómo se estratifican los humos; la velocidad de avance del estrato; la formación de backlayer; la caída de humos; las condiciones de temperatura y visibilidad; la interacción de la ventilación con la combustión; el comportamiento de la llama y, en general, todos los fenómenos que se explican en la clase teórica.

Largo recorrido de orientación y búsqueda (maniobra)

Se pueden diseñar diferentes circuitos, de hasta 700 metros de recorrido, con visibilidad reducida equivalente a la que podría encontrarse en un incendio en un túnel (puesto que se provoca un incendio en el túnel). Los participantes, organizados en equipos de búsqueda de 3 a 4 miembros y dotados con bi-botellas, penetran con el objetivo de rastrear un determinado sector para localizar víctimas, coordinarse entre ellos, comunicar con su mando, orientarse en todo momento, ejecutar las pautas de movimiento en humos y demás acciones explicadas en la clase de orientación, búsqueda y rescate.

Largos tendidos de ataque (maniobra)

Se trata de una manobra similar a la anterior, pero en este caso los equipos son de ataque, debiendo confeccionar en condiciones adversas (aguas abajo) largos tendidos de manguera para poder alcanzar el foco del incendio. El ejercicio contempla diseños con diferentes grados de dificultad, variando los recorridos, incorporando incidentes y otras situaciones que puede encontrarse el bombero durante una intervención de este tipo.

Simulacros de primera respuesta

Una vez realizadas la demostración y las maniobras, continuando con una dificultad creciente en las prácticas, planteamos los primeros simulacros simples como respuesta completa a una intervención. Lo hacemos simulando un escenario real. Es decir, a los alumnos se les plantea un escenario adaptado a las condiciones del túnel (Applus+ TST) y ellos se organizan como lo harían en un caso real. El grado de participación de los instructores dependerá de las capacidades de los alumnos, en especial de los alumnos

que ejercen el papel de mando. Estos primero simulacros, denominados de primera respuesta, se diseñan para un primer nivel de mando y en un único sector de intervención, pero siempre buscando el escenario de mayor dificultad ("aguas abajo") y gestionando la ventilación de forma que dificultamos el trabajo (en lugar de favorecerlo, que sería el objetivo en un caso real).

Simulacros complejos

Finalmente, damos un salto más en la complejidad, planteando escenarios de al menos dos accesos simultáneos con dos o tres niveles de mando y mayor complejidad de tareas, como puedan ser múltiples rescates, varios focos, largos tendidos y escenarios cambiantes. En estos simulacros se incrementa mucho el peso de la dirección y control. Dependiendo del tipo de alumnado (curso básico o curso avanzado) será el monitor el que asuma la jefatura de intervención; apoyará al alumno que ejerce la jefatura de la intervención o directamente cederá todo el peso de la intervención a un alumno.

No obstante, lo anterior, es posible y en algunos casos deseable adaptar esta formación a la problemática específica de cada receptor, ya que dependerá mucho de las posibilidades operativas del Servicio de Bomberos y de las características del riesgo en túneles que se pretendan abordar. Dicho esto, también es cierto que, en algunas ocasiones, la institución o empresa receptora de la formación no tiene claros los aspectos clave, precisamente porque desconoce en gran medida la temática. En muchas ocasiones se solicitan programas formativos con importantes carencias y muy frecuentemente focalizadas en la práctica. Este último punto es comprensible dado que es la práctica lo que no se puede desarrollar fuera de escenarios muy concretos, pero no es menos cierto que sin una base teórica clara vemos en las practicas fallos importantes por desconocimiento.

CONCLUSIONES

Para abordar una respuesta operativa eficiente a los incendios en túneles, el punto de partida es el conocimiento del problema y las posibles soluciones. Dada la escasez de siniestros de este tipo, desde nuestro punto de vista la única forma de adquirir esos conocimientos es a través de procesos formativos que unifiquen la forma de trabajar de los servicios de bomberos y sean el elemento que inicie la creación de procedimientos operativos estandarizados, metodologías de intervención y esquemas de pre-planificación propios de cada Servicio de Bomberos en función de sus riesgos y sus posibilidades de respuesta.

HERRAMIENTAS DE AYUDA AL EXPLOTADOR PARA LA TOMA DE DECISIONES EN CASO DE UN INCIDENTE MENOR EN EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS PELIGROSAS

Emilio Leo Ferrando[1]
Araceli Tena Mínguez[2]
Berta Seco Nievas[2]
María Calvo Aznar[2]
Nuria Romeo Girón[3]
Antoine Ruiz[4]
José Juan González Sánchez[5]
Óscar Aguarta Nasarre[6]

[1] *Protección Civil Subdelegación del Gobierno en Huesca*
[2] *Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos, Universidad de Zaragoza*
[3] *Túnel de Somport*
[4] *Servicio de Bomberos de Pirineos Atlánticos, Francia*
[5] *Protección Civil Gobierno de Aragón*
[6] *Servicio Provincial de Extinción de Incendios y Salvamento, Dip. Provincial de Huesca*

Uno de los accidentes más graves que se pueden producir en un túnel es aquel que involucre mercancías peligrosas. Por ello, en determinados túneles, es importante un control estricto, para evitar incidentes que puedan evolucionar y dar lugar a una catástrofe.

En el Túnel de Somport, de casi 9 km de longitud, todos los camiones son inspeccionados y, además, los vehículos que transportan mercancías peligrosas son identificados y clasificados en uno de los dos posibles grupos: grupo de tránsito "verde" y "rojo". Los de tránsito "verde" atraviesan el túnel libremente y los de tránsito "rojo" lo hacen escoltados y con el túnel cerrado a otros vehículos. Para ello, se dispone de un Reglamento especial de circulación.

Pero además de controlar este tipo de transportes, la detección precoz de incidentes menores en ellos, como pequeñas fugas, es fundamental para evitar posibles accidentes en el túnel, aunque puede originar cortes innecesarios de la circulación y la movilización, también innecesaria, de medios de emergencia.

A la vista de la experiencia acumulada durante más de quince años de tránsito de mercancías peligrosas por el Túnel de Somport, se ha elaborado una herramienta de ayuda al personal de explotación que trata de evitar estos cierres innecesarios, garantizando la seguridad de los trabajadores y de los usuarios del túnel.

DECISION SUPPORT TOOLS FOR THE OPERATOR IN THE EVENT OF A MINOR INCIDENT IN THE TRANSPORT OF DANGEROUS GOODS

One of the most serious accidents that can occur in a tunnel is one involving dangerous goods. For this reason, in certain tunnels, strict control is important to avoid incidents that could evolve and lead to a catastrophe.

In the Somport Tunnel, almost 9 km long, all trucks are inspected and, in addition, vehicles transporting dangerous goods are identified and classified into one of two possible groups: "green" and "red" transit group . The "green" transit vehicles cross the tunnel freely and the "red" transit vehicles do so under escort and with the tunnel closed to other vehicles. For this, there is a special circulation regulation.

But in addition to controlling this type of transport, the early detection of minor incidents in them, such as small leaks, is essential to avoid possible accidents in the tunnel, although it can cause unnecessary traffic cuts and the mobilization, also unnecessary, of means of transport. emergency.

In view of the experience accumulated during more than fifteen years of transiting dangerous goods through the Somport Tunnel, a tool has been developed to help operating personnel who try to avoid these unnecessary closures, guaranteeing the safety of workers and tunnel users.

OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION POUR L'OPÉRATEUR EN CAS D'INCIDENT MINEUR DANS LE TRANSPORT DE MARCHANDISES DANGEREUSES

L'un des accidents les plus graves pouvant survenir dans un tunnel est celui impliquant des marchandises dangereuses. Pour cette raison, dans certains tunnels, un contrôle strict est important pour éviter des incidents qui pourraient évoluer et conduire à une catastrophe.

Dans le tunnel du Somport, long de près de 9 km, tous les camions sont inspectés et, de plus, les véhicules transportant des marchandises dangereuses (TMD) sont identifiés et classés dans l'un des deux groupes possibles : groupe de transit « vert » et « rouge ». Les véhicules de transport « verts » traversent librement le tunnel et les véhicules de transport « rouges » le font sous escorte et avec le tunnel fermé aux autres véhicules. Pour cela, il existe un règlement de circulation spécial.

Mais en plus de contrôler ce type de transport, la détection précoce d'incidents mineurs, tels que de petites fuites, est essentielle pour éviter d'éventuels accidents dans le tunnel, même si cela peut entraîner des coupures de trafic inutiles et la mobilisation, également inutile, de moyens de secours.

Compte tenu de l'expérience accumulée pendant plus de quinze ans de transit de marchandises dangereuses par le Tunnel du Somport, un outil a été développé pour aider le personnel d'exploitation qui tente d'éviter ces fermetures inutiles, garantissant la sécurité des travailleurs et des usagers du tunnel.

ANTECEDENTES

Introducción a las mercancías peligrosas y reglamentación sobre su transporte por carreteras

El uso generalizado de sustancias o materias que se pueden denominar peligrosas se ha desarrollado de una manera espectacular en los últimos 50 años. *Por materia peligrosa se entiende toda sustancia o producto que durante su fabricación, manejo, transporte, almacenamiento o uso puede generar o desprender vapores, humos, polvos, gases o fibras capaces de producir efectos infecciosos, irritantes, inflamables, explosivos, corrosivos, asfixiantes, tóxicos o de cualquier otra naturaleza peligrosa, o que pueden generar radiaciones ionizantes, en cantidades o concentraciones que tengan alguna probabilidad de lesionar la salud de las personas que entren en contacto con ellas o que puedan causar daños materiales en instalaciones o al medio ambiente.*

De todas ellas, aquellas que en caso de accidente durante su transporte, pueden suponer riesgos para la población, los bienes y el medio ambiente, y que, por ello, sus condiciones de transporte se encuentran reguladas, se denominan mercancías peligrosas, según recoge el Real Decreto 387/1996 de 1 de marzo, por el que se aprueba la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de accidentes en los transportes de mercancías peligrosas por carretera y ferrocarril (BOE núm. 71 de 22 de marzo de 1996)[1].

El transporte de estas materias plantea ciertas exigencias tanto a las empresas especializadas, como a las autoridades que regulan y vigilan los aspectos que rodean a dicho transporte en lo que se refiere a la seguridad del mismo. El problema radica en el riesgo generado al tener que trasladar unos determinados productos peligrosos en sí mismos y en el hecho de tener que garantizar una óptima seguridad durante dicho traslado o transporte, tanto para la propia mercancía y las instalaciones de transporte, como, y principalmente, para las personas que entren en contacto con ellas, los bienes materiales que se encuentren en sus proximidades y el medio ambiente por el que circulen.

Los principales modos de transporte de las mercancías peligrosas que se utilizan son: carretera, ferrocarril, transporte marítimo, transporte fluvial y transporte aéreo. Cada uno de estos modos de transporte tiene un acuerdo internacional que regula los principales aspectos de su transporte.

En el caso del transporte por carretera, el acuerdo internacional que lo regula se denomina ADR: Acuerdo europeo sobre el transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera (Accord Européen relatif au Transpor International des Marchandises Dangereuses par Route)[2].

Entre otras muchas cosas, el ADR incluye una clasificación de las mercancías peligrosas de cara a la regulación de su transporte. El sistema de clasificación de mercancías peligrosas es el preparado por el Comité de Expertos de la ONU que ha servido de base para la elaboración de la mayoría de las regulaciones internacionales y nacionales y clasifica a las mercancías peligrosas en clases de materias. Éstas son:

Clase 1	Materias y objetos explosivos
Clase 2	Gases
Clase 3	Líquidos inflamables
Clase 4.1	Materias sólidas inflamables, materias autorreactivas, materias que polimerizan y materias explosivas desensibilizadas sólidas
Clase 4.2	Materias que pueden experimentar inflamación espontánea
Clase 4.3.	Materias que en contacto con el agua desprenden gases inflamables
Clase 5.1	Materias comburentes
Clase 5.2	Peróxidos orgánicos

Clase 6.1	Materias tóxicas
Clase 6.2	Materias infecciosas
Clase 7	Materias radiactivas
Clase 8	Materias corrosivas
Clase 9	Materias y objetos peligrosos diversos

Además, las materias de las clases 3, 4.1 (menos las autorreactivas), 4.2, 4.3, 5.1, 6.1, 8 y 9, en función del grado de peligro que presentan, se asignan a los denominados grupos de embalaje:

Grupo de embalaje I	Materias muy peligrosas
Grupo de embalaje II	Materias medianamente peligrosas
Grupo de embalaje III	Materias que presentan un grado menor de peligrosidad

Si bien la asignación de una mercancía peligrosa a una clase y a un grupo de embalaje se realiza de acuerdo a los criterios detallados en el ADR, es posible que las mercancías puedan presentar diferentes riesgos. En este caso, se engloban en la clase de su riesgo principal y, posteriormente, los riesgos subsidiarios vienen plasmados en los códigos de clasificación o divisiones o grupos en los que se subdividen cada clase.

Características especiales del paso de mercancía peligrosa por túneles de carreteras

Si ya de por sí los túneles se consideran sistemas complejos en los que la seguridad juega un papel muy importante, esta necesidad de control y supervisión se ve incrementada cuando a través del túnel pueden circular mercancías peligrosas.

De acuerdo con lo recogido en el ADR, se pueden plantear en los túneles restricciones al paso de vehículos que transporten mercancías peligrosas. Para establecer estas restricciones al tráfico se deben tener en cuenta las características del túnel, la gestión del tráfico y la evaluación de los riesgos teniendo en cuenta la disponibilidad y conveniencia de itinerarios y de modos de transporte alternativos.

Existen en la actualidad cinco categorías de túneles definidas en el ADR:

- Categoría de túnel A: Ninguna restricción al transporte de mercancías peligrosas;
- Categoría de túnel B: Restricciones al transporte de mercancías peligrosas susceptibles de provocar una explosión muy importante.
- Categoría de túnel C: Restricciones al transporte de mercancías peligrosas susceptibles de provocar una explosión muy importante, una explosión importante o una fuga importante de materias tóxicas.
- Categoría de túnel D: Restricciones al transporte de mercancías peligrosas susceptibles de provocar una explosión muy importante, una explosión importante o una fuga importante de materias tóxicas o un incendio importante.
- Categoría de túnel E: Restricciones al transporte de todas las mercancías peligrosas salvo para determinadas sustancias radiactivas, desechos clínicos y muestras.

Corresponde a la Autoridad Competente realizar esta clasificación de los túneles, que deberá estar señalizada. Por otro lado, hay que tener en cuenta que, en el caso de que se apliquen medidas de explotación específicas pensadas para reducir riesgos y relacionadas con algunos o todos los vehículos que utilizan los túneles, especialmente las declaraciones antes de entrar o de pasar en convoy escoltados por los vehículos de acompañamiento, estas medidas deben publicarse oficialmente y ser difundidas al público.

DESARROLLO

El túnel del Somport. Reglamento de circulación. Sistema de explotación. Gestión de emergencias. Problemática derivada de los incidentes menores.

El entramado jurídico-institucional del túnel de Somport es complejo. Básicamente está sujeto a un Convenio Internacional, inicialmente para su construcción[3] que se amplió posteriormente mediante un Acuerdo para la explotación[4].

El Acuerdo está controlado por una Comisión Intergubernamental, paritaria entre ambos países que es la encargada de aprobar el pliego de condiciones de la explotación, el Reglamento de Circulación y el Plan de Socorro Binacional. También el llamado plan de intervención y de socorro de la empresa adjudicataria (PIS), documento que podemos decir que está a caballo entre el Manual de Explotación y el Plan de Actuación ante Emergencias (PAE) que contienen los planes de autoprotección contemplados en la normativa española[5].

La circulación por el túnel de Somport está regulada por un Reglamento de Circulación específico[6] adaptado a la singularidad de la infraestructura con arreglo a su situación entre España y Francia, su longitud (8,8 km), el tipo de circulación bidireccional, y en definitiva, al conjunto de características que definen el túnel. En cuanto al paso de mercancías peligrosas, los estudios realizados antes de su apertura determinaron más seguro el paso por el túnel que por el itinerario del Puerto de Somport, salvo en el caso del transporte de amoniaco y gas licuado, considerando el trazado existente, el paso por la población de Canfranc y por las inmediaciones de las estaciones de esquí de Candanchú y Astún en España y por el Parque Nacional de los .Pirineos en Francia (LÓPEZ, 2003). Y así se realiza, clasificando las mercancías en dos grupos: verde y rojo en función de su peligrosidad, permitiendo el paso libre o en convoy.

El débil tráfico existente permite además realizar una revisión sistemática a todos los vehículos pesados que transitan por el túnel. A su llegada, todos los vehículos pesados (camiones, autobuses y vehículos especiales) deben detenerse en la boca de acceso en el lugar específicamente preparado para ello. Los agentes de explotación del túnel comprueban que las dimensiones son las reglamentarias y verifican el buen estado comprobando que no existen puntos calientes. El hecho de detener los vehículos antes de su paso al túnel es una medida de seguridad adicional importante de cara a evitar incendios por sobrecalentamiento del turbo y del conjunto de ruedas y frenos.

Los transportes de mercancías peligrosas se clasifican por grupos en función de su carga y se realiza una inspección visual del aspecto general del vehículo y de la valvulería, constatando que no hay goteos ni se aprecian olores sospechosos. Se escanea la carta de porte que se envía al operador del centro de control para disponer de inmediato en caso de emergencia de los datos de la mercancía y del transportista y de la ficha de seguridad.

La explotación del túnel de Somport es única y se realiza desde el un centro de control situado en la boca española. La realiza una empresa contratada conjuntamente por la administración de carreteras española y francesa. Por acuerdo entre los dos países la norma a cumplir es la Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras[7]. En aplicación de la Directiva la "Autoridad Administrativa" es la Comisión Intergubernamental contemplada en el Acuerdo Internacional y el "Gestor del túnel" es la Dirección General de Carreteras española[8]. Responde de su gestión a un Comité de Seguridad, también derivado del Acuerdo Internacional, que desempeña la función de "organismo de inspección"

La empresa que realiza la explotación del túnel de Somport dispone de medios y personal propio para hacer frente inicialmente a cualquier situación de emergencia que pueda producirse tanto en el interior como en el exterior del Túnel. El personal está perfectamente entrenado para gestionar una posible emergencia, por lo que hasta la llegada de los medios exteriores de España o Francia asumen la gestión íntegra de ella (ROMEO y otros, 2015).

La plantilla de explotación está formada por 60 personas entre Gestión, Ingeniería, Mantenimiento y Atención e intervención a incidentes. El perfil buscado para el grupo de intervención es el de un bombero voluntario en servicios españoles o franceses. La organización del día a día supone la presencia de seis agentes de conservación, para que haya presencia 24 horas los 365 días del año. Hay siempre tres agentes en cada boca (España y Francia), listos para intervenir en menos de dos minutos, que realizan labores de gestión de tráfico y chequeo de los vehículos pesados que pasan por el túnel (CAMPO, 2010)

Cuando la empresa que realiza la explotación del túnel detecta un incidente activa el plan de intervención y de socorro (PIS/PAE) y comienza su tratamiento con arreglo a los procedimientos establecidos. Según la naturaleza y la gravedad del incidente, cada procedimiento establece la necesidad de llamar o no a los servicios exteriores: siguiendo el procedimiento descrito en el Plan de Socorro Binacional (PSB).

El Plan de Socorro Binacional (LEO y LÓPEZ, 2010) es el dispositivo conjunto de intervención de España y Francia, que tiene en cuenta los medios propios del explotador y los medios exteriores de emergencia para dar respuesta a las emergencias que se producen en el túnel. Su objetivo es garantizar la preparación de todos los actores previstos para intervenir, sean públicos o privados. El Plan de Socorro Binacional está basado en tres principios: soberanía por el que cada país es competente sobre la parte del túnel que le pertenece, explotación única, y planificación, basado en la organización de la respuesta de protección civil. El Plan está concebido para movilizar y coordinar, bajo la autoridad única de un Director del Plan/DOS[9], a los componentes de protección civil más allá del sistema de respuesta habitual de los servicios de emergencia.

Cuando el explotador considera que es precisa la presencia de medios exteriores, procede a llamar a los centros de emergencias[10] de España (112 Aragón) y Francia (CODIS64) y desde ellos se movilizan los servicios necesarios. Inicialmente se activan bomberos, policía y sanitarios y en función del tipo y desarrollo de la emergencia se van incorporando medios adicionales.

Herramienta de ayuda al explotador para la toma de decisiones en caso de incidente menor en el transporte de mercancías peligrosas.

Entre 2006 y 2018, se detectaron por el personal de explotación del túnel 8 fugas en transportes de mercancías peligrosas, 2 en el lado español y 6 en la parte francesa. Todas ellas originaron la activación del PSB con la consiguiente alarma, el envío de numerosos medios de los servicios de emergencia y el cierre del túnel por periodos prolongados de tiempo con una considerable afección al tráfico.

Los incidentes eran pequeños goteos, fugas por válvulas,... y no suponían problemas técnicos importantes.

La comisión encargada del PSB, presidida por las autoridades de ambos países, tras reflexionar sobre esta cuestión, considerar la madurez adquirida por el equipo de explotación y gestión de emergencias del túnel de Somport desde la apertura al tráfico y analizar las lecciones aprendidas de los diversos incidentes con mercancías peligrosas, acordó estudiar una herramienta de ayuda al explotador para los casos de incidente menor en el transporte de mercancías peligrosas que facilitara la gestión de estos incidentes de una forma más sencilla.

En noviembre de 2018 se decidió crear un grupo de trabajo integrado por expertos españoles y franceses de protección civil, el grupo GUIAR de la Universidad de Zaragoza y de bomberos para:

- proporcionar herramientas de ayuda a la decisión al explotador en caso de un incidente menor respetando el principio de territorialidad,
- estudiar los criterios que se podían utilizar para mover el vehículo pesado aprovechando la experiencia de los bomberos franceses y españoles,
- elegir el lugar al que se podría llevar el transporte de mercancías peligrosas afectado para que quedara fuera de la tutela del personal de explotación, sin interferir su trabajo ni el tráfico, de forma que el túnel no quedara cerrado.

Se elaboró un documento de uso sencillo que contiene el marco jurídico, los accidentes de mercancías peligrosas registrados, la formación recibida por el personal del túnel y el material disponible, los utilizados criterios en caso de fuga y los procedimientos del túnel.

Tras el estudio realizado se comprobó que si se hubiera aplicado en los ocho incidentes de mercancías peligrosas registrados, únicamente habría sido necesario activar el PSB en una ocasión.

Esta herramienta es, en realidad, un procedimiento de actuación documentado y referenciado, consensuado por los servicios de emergencia, y aprobado por el Comité de Seguridad y la Comisión Intergubernamental, que pretende que mediante una serie de pasos sencillos se pueda actuar de manera lógica, decidiendo si es realmente necesario que se active el Plan de Socorro Binacional o no. Se comenzó a aplicar el 1 de diciembre de 2019.

Ya existen en el túnel del Somport varios documentos que incluyen procedimientos de actuación en caso de emergencias en el túnel. Así por ejemplo el PAE/PIS gestiona los incidentes y determina los casos en los que haya que activar el PSB. En concreto en el PAE/PIS se dispone de una ficha, ficha Nº361, la cual contempla el escenario de fugas de mercancías peligrosas en las plataformas. Se trata de una ficha bastante concisa, pero propone la activación sistemática del PSB.

Lo que se pretendió con el desarrollo de esta herramienta es introducir una modificación en la ficha Nº361 de manera que, mediante una serie de pasos sencillos, se pudiese discriminar si la fuga del camión requiere realmente la activación del PSB o si por el contrario se puede permitir al camión que circule.

Detección de fugas

Cuando un camión de transporte de mercancías peligrosas quiere atravesar el túnel de Somport, tanto desde la boca francesa como desde la boca española debe, en primer lugar, detenerse para que se pueda llevar a cabo un control administrativo.

Durante dicho control, el conductor del vehículo entrega la carta de porte o el documento de transporte análogo y la ficha de consignas de seguridad al agente encargado de la seguridad del túnel.

Este control administrativo supone tomar nota de la naturaleza y clase del producto transportado, su número ONU y el de su placa-etiqueta si existe, del acondicionamiento y cantidad del producto, así como de los datos del expedidor y destinatario.

Como parte de este control administrativo del vehículo de mercancías peligrosas el agente encargado de la seguridad del túnel procede a examinar detenidamente el vehículo, tanto visual como auditiva y olfativamente, al objeto de detectar cualquier posible anomalía (fuga, calentamiento, mala estiba de cargas, etc.).

En caso de no detectar ninguna anomalía, el agente de seguridad del túnel procede a clasificar al vehículo examinado en uno de los grupos de tránsito establecidos: grupo verde y grupo rojo.

Pertenecen al grupo de tránsito "verde" todos aquellos vehículos que transporten las mercancías peligrosas clasificadas exclusivamente en uno o varios de las clases siguientes: 1.4, 1.6, 2 sobre fondo verde, 5.1, 5.2, 8 o 9.

Pertenecen al grupo de tránsito "rojo" todos los vehículos que transportan mercancías peligrosas distintas de las definidas en el grupo "verde" anterior o que, de acuerdo con el ADR, presenten un símbolo de riesgo térmico o de fumigación.

En caso de detectar una anomalía durante la inspección, el agente encargado de la seguridad del túnel puede retrasar o impedir el paso del vehículo implicado.

En aquellos casos en los que la anomalía detectada es una fuga, del tipo que sea, el procedimiento seguido de acuerdo a lo recogido en el Plan de Intervención y Socorro (PIS/PAE) era la activación del Plan Binacional de Socorro (PBS) de manera sistemática.

Teniendo en cuenta las implicaciones que la activación de este PSB tiene, se decidió estudiar la posibilidad de desarrollar un procedimiento que permitiese resolver de forma más eficiente este tipo de intervención.

La propuesta a plantear debía cumplir una serie de requisitos:

1. Estar basada en parámetros simples y fáciles de utilizar
2. Acordes con la capacitación y los equipos disponibles en el túnel
3. Coherente con los procedimientos de actuación ya implantados en el túnel

Además, hay que tener en cuenta que las fugas se detectan sólo cuando se controlan camiones en la boca del túnel, por lo que los parámetros a determinar y que van a condicionar la toma de decisiones son:

- Modo de detección de la fuga
- Estado del producto
- Tipo de transporte
- Tipo de fuga

Modo de detección de la fuga

Tal y como recoge la Resolución de 17 de febrero de 2006, el vehículo se debe examinar detenidamente de forma visual, olfativa y auditiva, al objeto de detectar cualquier anomalía, que en el caso que nos ocupa sería una fuga.

Por esta razón son estos tres los modos de detección de la fuga que se plantean como posibles.

Estado del producto

Para poder determinar el procedimiento de actuación a desarrollar, el siguiente parámetro que se debe considerar es el estado del producto.

Este parámetro es también fácil de determinar porque, en el caso de que la detección de la fuga sea visual, se podrá determinar el estado del producto en el interior del transporte. También aporta información para la determinación de este parámetro la forma de la cisterna, el código de peligro de la materia o la información recogida en la carta de porte.

- Sólido
- Líquido
- Gas o vapor

Tipo de transporte

El tipo de transporte viene determinado por la forma del vehículo. Se distinguen tres tipos de transporte:

- A granel, donde se tiene un camión caja con una lona que protege la carga
- Cisterna presurizada
- Cisterna a presión o criogénica

Tipo de fuga

En la definición del tipo de fuga se decidió distinguir entre dos posibilidades, en función de la detección visual de la fuga:

- Goteo: hay una fuga en fase líquida que se muestra por un goteo más o menos rápido. Visualmente se distinguen las gotas.
- Chorreo: es una fuga en la fase líquida que muestra un goteo continuo, no se ven las gotas.

Tipos de respuesta

De la aplicación de la cadena de decisión se obtienen dos posibles respuestas:

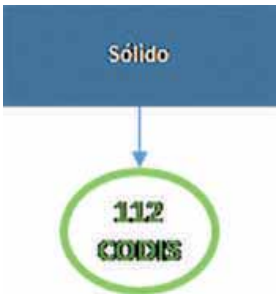
- 112/CODIS no se activará el PSB, sino que el vehículo se desplazará hasta un punto donde no interfiera con el tráfico ni con las actividades normales del explotador del túnel y se realizará la llamada a los servicios públicos para su gestión, informando a los servicios de protección Civil de los dos países.
- PSB: activación del Plan de Socorro Binacional.

Diagrama para los agentes operativos

Para la toma de decisiones se desarrollaron unos diagramas de decisión que tienen en cuenta los parámetros anteriores:

Fuga de sustancia sólida

En el caso de que se trate de la fuga de una sustancia sólida, no se activará el PSB sino que se desplazará el vehículo hasta un punto donde no interfiera con el tráfico ni con las actividades normales del explotador del túnel y se realizará la llamada a los servicios públicos para sugestión, informando a los servicios de protección Civil de los dos países.



Fuga de sustancia líquida no presurizada ni refrigerada

En el caso de que la fuga sea de una sustancia líquida a temperatura ambiente, el diagrama de toma de decisiones es un poco más complejo.

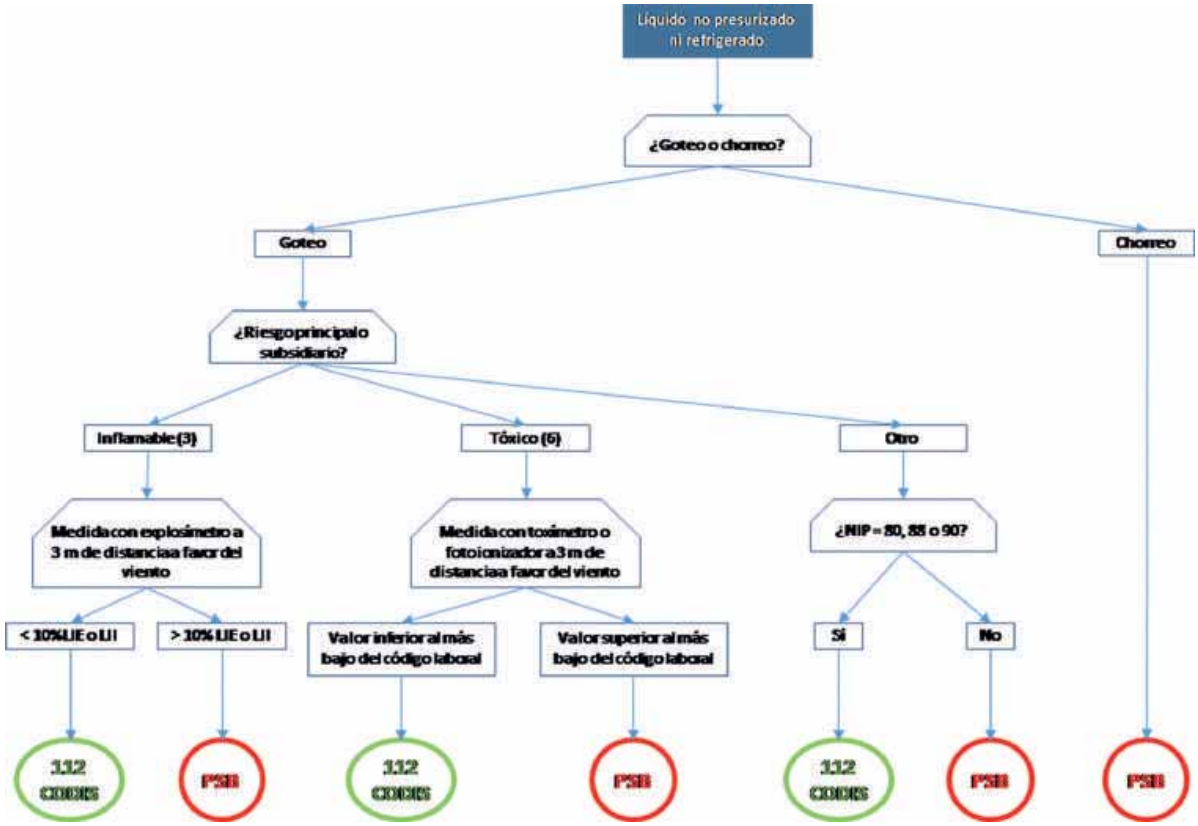
En primer lugar, indicar que si la fuga es un chorreo, es decir, que se tiene una fuga importante de líquido, se activa de manera inmediata el PSB.

Por el contrario, si la fuga es un goteo, antes de decidir la aplicación del PSB se valora el riesgo principal o subsidiario de la sustancia transportada, distinguiendo entre sustancias inflamables (clase de peligro 3), sustancias tóxicas (clase de peligro 6) y otras.

En el caso de que la sustancia sea inflamable, la decisión de activar o no el PSB se tomará en función de los valores del límite inferior de inflamabilidad (LII). Para ello se necesitará disponer de un explosímetro con el que se tomarán medidas a tres metros de distancia, que es el límite de impacto geográfico con la carretera del túnel desde la zona de control, y a favor del viento ya que se considera la zona más desfavorable. Si el resultado obtenido es inferior al 10% del LII, se avisará a los servicios de protección civil y se apartará al vehículo, mientras que si la medida obtenida es superior al 10% del LII se activará el PSB. Se considera un valor del 10% del LII al ser un límite habitual relacionado con la primera alarma en explosímetros.

En el caso de que la fuga sea de una sustancia tóxica, la decisión de activar o no el PSB se tomará en función de los límites de exposición laboral. Para ello, se tomarán medidas con un toxímetro o fotoionizador a 3 metros de distancia a favor del viento. Si la medida obtenida es inferior al valor más bajo del código laboral se avisará a los servicios de PC y se apartará el vehículo a una zona segura. Por el contrario, si las medidas obtenidas aportan valores superiores al valor más bajo del código laboral se activará el PSB.

Y, por último, en el caso de que la sustancia no sea ni inflamable ni tóxica, pero tiene un número de identificación de peligro que coincide con 80, 88 o 90 se avisará a los servicios de PC y se apartará el vehículo a una zona segura y en caso contrario se activará el PSB.



Fuga de un gas licuado presurizado, licuado o gas comprimido

Cuando se trate de una sustancia gaseosa que se transporta en forma de gas comprimido, gas licuado o gas licuado presurizado la primera decisión viene determinada en función de si la fuga es de líquido o es de gas. En el caso de que se esté produciendo una fuga de la sustancia almacenada en forma de líquido, independientemente de si es un goteo o un chorreo, la consigna de actuación es la de activación del PSB en cualquier caso.

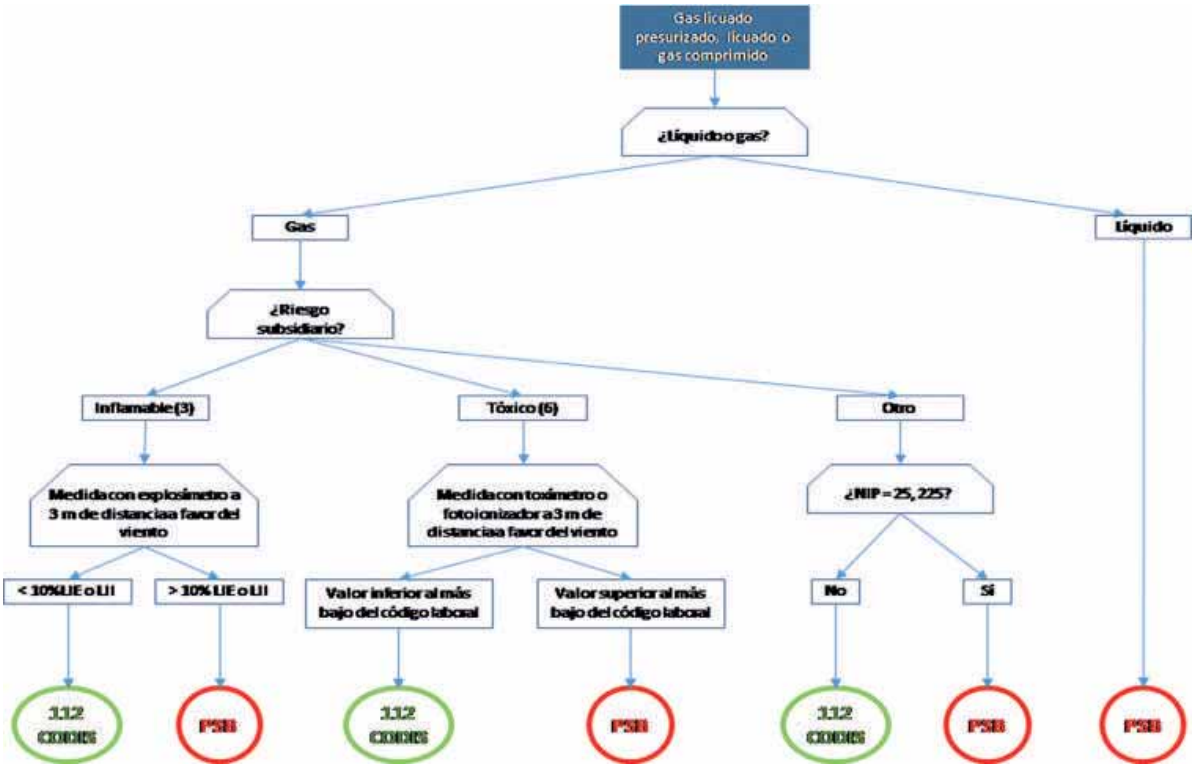
En caso de que la fuga sea de gas, para poder tomar una decisión es necesario analizar el riesgo subsidiario de la sustancia, es decir, si se trata de una sustancia inflamable (clase de peligro 3), una sustancia tóxica (clase de peligro 6) o una sustancia con otro tipo de riesgos.

Al igual que en el caso de fugas de sustancias líquidas, si el gas fugado es inflamable, la decisión de activar o no el PSB se tomará en función de los valores del límite inferior de inflamabilidad (LII). Para ello se tomarán medidas a tres metros de distancia, que es el límite de impacto geográfico con la carretera del túnel desde la zona de control, y a favor del viento ya que se considera la zona más desfavorable. Si el resultado obtenido es inferior al 10% del LII, se avisará a los servicios de protección civil y se apartará al vehículo, mientras que si la medida obtenida es superior al 10% del LII se activará el PSB. Se considera un valor del 10% del LII al ser un límite habitual relacionado con la primera alarma en explosímetros..

En el caso de que la fuga sea de una sustancia tóxica, la decisión de activar o no el PSB se tomará en función de los límites de exposición laboral. Para ello, se tomarán medidas con un toxímetro o fotoionizador a 3 metros de distancia a favor del viento. Si la medida obtenida es inferior al valor más bajo del código laboral se avisará a los servicios de PC y se apartará el vehículo a una zona segura. Por el contrario, si las medidas obtenidas aportan valores superiores al valor más bajo del código laboral se activará el PSB.

Y por último, si se trata de un gas que no es ni inflamable ni tóxico, en el caso de que sus número de identificación de peligro sean 25 o 225 se avisará a los servicios de PC y se apartará el vehículo a una zona segura y en cualquier otro caso se activará el PSB.

Diagrama de la posible herramienta de ayuda a la decisión para el explotador, en caso de un incidente menor con los criterios que se pueden utilizar para mover el vehículo y avisar a los servicios públicos:



LECCIONES APRENDIDAS

El Plan de Socorro Binacional recoge que tras cada siniestro, se realizará un estudio sobre el funcionamiento del Plan y las intervenciones de los servicios de emergencia, con la colaboración de la otra autoridad territorial y el apoyo del Responsable de Seguridad[11] del túnel en el que podrán participar miembros de los servicios de emergencia, del comité de seguridad y del explotador.

El 22 de septiembre de 2021, a las 17:54 horas un vehículo que transportaba mercancías peligrosas (80/2794, Baterías de electrolito) llegó a la boca francesa del túnel. En la inspección rutinaria realizada antes de entrar al túnel los agentes de explotación detectaron varias fugas menores que resultó ser líquido de las baterías. Tras dar la alerta al centro de control se aplicó el procedimiento previsto en caso de fuga de mercancías peligrosas en la plataforma del túnel y se apartó el vehículo.

Como el vehículo se encontraba en Francia, se avisó al CODIS y se solicitaron medios para una fuga menor de líquido de baterías.

El CODIS envió medios de bomberos especializados en riesgo químico que llegaron a los 57 minutos del inicio, al igual que la Gendarmería. Los bomberos gestionaron la resolución del incidente con la colaboración de los agentes de explotación instalando una piscina de contención y recogida de líquido bajo el camión para impedir el vertido al suelo.

El procedimiento se realizó sin cierre. del túnel y sin desplazamiento del camión El incidente finalizó 24h 33' después de su inicio cuando la empresa transportista retiró el camión y los residuos. El túnel permaneció cortado entre las 17:54 y las 18:21.

El análisis del incidente valoró positivamente el procedimiento y las ventajas que supone no desplazar el camión ya que en el lugar se dispone de red de hidrantes con agua, luz y personal de apoyo para supervisión. También el hecho de que en estos sucesos menores no es necesario aplicar los perímetros de seguridad. De esta forma no se cierra el túnel al tráfico. Finalmente se apreció que los equipos de protección individual con los que cuenta el personal del túnel son los correctos para el conjunto de productos que transitan por él.

Disposición de las baterías en la caja del camión y piscina de contención para evitar el vertido de líquido al suelo:

BIBLIOGRAFÍA

Campo, V. Funcionamiento del servicio de emergencias del túnel de Somport. V Simposio de túneles de carreteras (Bilbao), 1067-1071. Madrid, 2010.

Leo, E., López, J. El Plan conjunto hispanofrancés para emergencias en el túnel de Somport* como modelo de gestión de emergencias en túneles. V Simposio de túneles de carreteras (Bilbao), 413-431. Madrid, 2010. * La denominación actual es Plan de Socorro Binacional (PSB)

Martínez, CM., Campo, V. Nuevas disposiciones ADR para el paso de mercancías peligrosas por los túneles de carretera. V Simposio de túneles de carreteras (Bilbao), 803-815. Madrid, 2010.

Iribas, P. Nuevas normas sobre circulación de mercancías peligrosas a través de los túneles. IV Simposio de túneles (Principado de Andorra), 1015-1023. Madrid, 2005.

López, R. Mercancías peligrosas. III Simposio nacional de túneles (Pamplona), 543-587. Madrid, 2003.

Romeo, N., Ruiz, A. y Leo, E. Sistema de gestión operativa de emergencia en el túnel de Somport. VI Simposio de túneles de carretera (Zaragoza), 359-372. Madrid, 2015

---

1 En https://www.boe.es/boe/dias/1996/03/22/pdfs/A10998-11010.pdf

2 En https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/mitma/ADR_2021_20210413_BOE.pdf

3 Convenio entre el Reino de España y la República Francesa para la construcción de un túnel de carretera en el puerto de Somport, hecho en París el 25 de abril de 1991. En https://www.boe.es/boe/dias/1992/03/27/pdfs/A10367-10368.pdf

4 Acuerdo entre España y Francia relativo a la explotación, conservación, seguridad y, en su caso, puesta al día del túnel de carretera de Somport, hecho en Perpiñán el 11 de octubre de 2001 e intercambio de cartas constitutivo de una declaración interpretativa de los párrafos tercero y cuarto del artículo 9 del Acuerdo. En https://www.boe.es/boe/dias/2003/11/07/pdfs/A39554-39559.pdf

5 Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia. En https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-6237-consolidado.pdf

6 Resolución de 17 de febrero de 2006, de la Dirección General de Tráfico, por la que se establecen medidas especiales de regulación de tráfico en el túnel de Somport En https://www.boe.es/boe/dias/2006/03/01/pdfs/A08418-08421.pdf

7 En https://www.boe.es/doue/2004/167/L00039-00091.pdf

8 Se cumple de esta forma la exigencia de la Directiva 2004/54 de disponer de un sistema de explotación único que en el art- 5.2 dispone "Para cada túnel situado en el territorio de dos Estados miembros, las dos autoridades administrativas o la Autoridad administrativa común deberán reconocer a un único organismo encargado del funcionamiento del túnel."

9 DOS: Directeur des Opérations de Secours

10 También se llama a los organismos responsables de la dirección del Plan de Socrro Binacional del túnel de Somport, Subdelegación del Gobierno en Huesca, por parte española y Prefectura de los Pirineos Atlánticos, por parte francesa, que son las responsables de la coordinación y dirección de la emergencia.

11 Nombrado con arreglo la Directiva Europea 2004/54/CE, con las misiones contempladas en el artículo 6 de la misma.

PLATAFORMA SERIOUS GAMES PARA LA GESTIÓN DE EMERGENCIAS Y LA FORMACIÓN AVANZADA DE OPERADORES DE TÚNELES CARRETEROS

Fernando Morente
Ramón Ugartexte
David García-Sanchez

TECNALIA Basque Research and Technology. Alliance "BRTA"

El objetivo del proyecto ha sido el desarrollo de una plataforma basada en tecnologías Serious Games que permite interactuar en tiempo real sobre un gemelo digital de un túnel carretero, considerando las prestaciones de los sistemas instalados para el manejo de una emergencia y la formación avanzada de operadores y equipos de extinción y rescate.

Esto permie garantizar la correcta formación y entrenamiento del personal encargado de operar este tipo de infraestructuras aprovechando las bondades del Gamed Based Learning o gamificación de la formación. Pero también permite optimizar y validar los protocolos de actuación, así como poder conocer en tiempo real la repercusión de cada una de las decisiones que se van tomando para manejar una determinada emergencia.

Este planteamiento supone un cambio de paradigma en el enfoque actual de la seguridad en caso de incendio de túneles carreteros en particular y en el de la gestión de emergencias en túneles en general, pasando del actual posicionamiento pasivo-preventivo a un planteamiento proactivo de análisis holístico de la seguridad.

Los objetivos funcionales de la plataforma TWINTUN son:

- Formación y entrenamiento de operadores en situaciones reales de incendio en un gemelo digital del túnel real interactuable.
- Realización de simulaciones múltiples y análisis de acciones/consecuencias para la optimización de la toma de decisiones en situaciones de emergencia por parte de operadores y los servicios de emergencia.

SERIOUS GAMES PLATFORM FOR EMERGENCY MANAGEMENT AND ADVANCED ROAD TUNNEL OPERATOR TRAINING

The aim of the project was to develop a platform based on Serious Games technologies that allows real-time interaction on a digital twin of a road tunnel, taking into account the performance of the systems installed for emergency management and advanced training of operators and fire-fighting and rescue teams.

This makes it possible to guarantee the correct education and training of the personnel in charge of operating this type of infrastructure, taking advantage of the benefits of Gamed Based Learning or gamification of training. But it also makes it possible to optimise and validate the action protocols, as well as to know in real time the repercussions of each of the decisions that are taken to handle a specific emergency.

This approach represents a paradigm shift in the current approach to road tunnel fire safety in particular and to emergency management in tunnels in general, from the current passive-preventive approach to a proactive approach of holistic safety analysis.

The functional objectives of the TWINTUN platform are:

- Training and coaching of operators in real fire situations in a digital twin of the real interactive tunnel.
- Performing multiple simulations and action/consequence analysis for the optimisation of decision-making in emergency situations by operators and emergency services.

PLATE-FORME DE JEUX SÉRIEUX POUR LA GESTION DES SITUATIONS D'URGENCE ET LA FORMATION AVANCÉE DES OPÉRATEURS DE TUNNELS ROUTIERS

L'objectif du projet a été le développement d'une plateforme basée sur les technologies des Serious Games qui permet une interaction en temps réel sur un jumeau numérique d'un tunnel routier, en considérant la performance des systèmes installés pour la gestion des urgences et la formation avancée des opérateurs et des équipes d'incendie et de secours.

Cela permet de garantir l'éducation et la formation correctes du personnel chargé d'exploiter ce type d'infrastructure, en tirant parti des avantages de l'apprentissage par les jeux ou de la gamification de la formation. Mais elle permet également d'optimiser et de valider les protocoles d'action, ainsi que de connaître en temps réel les répercussions de chacune des décisions qui sont prises pour gérer une urgence spécifique.

Cette approche représente un changement de paradigme dans l'approche actuelle de la sécurité incendie des tunnels routiers en particulier et de la gestion des situations d'urgence dans les tunnels en général, passant de l'approche passive-préventive actuelle à une approche proactive d'analyse holistique de la sécurité.

Les objectifs fonctionnels de la plateforme TWINTUN sont :

- Formation et entraînement des opérateurs dans des situations d'incendie réelles dans un jumeau numérique du tunnel interactif réel.
- Réalisation de simulations multiples et d'analyses action/conséquence pour l'optimisation de la prise de décision en situation d'urgence par les opérateurs et les services d'urgence.

1. BREVE DESCRIPCIÓN Y CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROYECTO

1.1. Contexto general

Como toda obra pública, los túneles son infraestructuras esencialmente seguras en que los accidentes graves son sucesos raros que, al ser inesperados y afectar a un número alto de usuarios, despiertan alarma social. Asimismo, las graves consecuencias socioeconómicas provocadas por un accidente en un túnel hacen que este tipo de infraestructuras sean consideradas críticas en materia de seguridad.

Imagen digital de un túnel (fuente internet)

Los últimos años han sido pródigos en accidentes con fuego en túneles de tráfico, lo que ha motivado la preocupación de los organismos encargados de velar por la seguridad en el transporte, así como de los usuarios en general. Ello ha dado lugar a un renovado interés por todos los aspectos relacionados con la seguridad de lo que son buena prueba los numerosos grupos de trabajo y proyectos de investigación europeos destinados a su estudio.

En el ámbito normativo, las Recomendaciones del Grupo de Expertos de las Naciones Unidas sobre la seguridad en túneles carreteros, publicadas en diciembre de 2001, supusieron el inicio de un conjunto de medidas que culminaron, a nivel internacional, en la Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo de la U.E. de abril de 2004 sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea. Esta directiva, de obligado cumplimiento, fue tomada como la base mínima a partir de la cual todos los estados miembros desarrollaron sus respectivas normativas nacionales en materia de seguridad de túneles carreteros. A nivel del territorio de Bizkaia, la competencia en ese ámbito recae sobre la Diputación Foral y en agosto de 2006 se aprobó el Decreto Foral 635 sobre requisitos mínimos de seguridad en túneles de carreteras del Territorio de Bizkaia. En el resto del estado la normativa aplicable es similar y queda recogida en el Real Decreto 635 donde quedan recogidos los requisitos mínimos de seguridad en túneles carreteros.

Ese mismo año se constituyó el Organismo de Inspección de Túneles de Bizkaia (OITB) que vela por el cumplimiento de los requerimientos de seguridad y trabaja, de forma continua, en la revisión y actualización de la normativa de seguridad implementando en la misma los avances tecnológicos desarrollados en este campo, así como la experiencia obtenida a lo largo d ellos año en la explotación de este tipo de infraestructuras.

En todas estas referencias normativas, la gestión de los riesgos relacionados con la seguridad en los túneles se aborda desde una doble perspectiva basada, en primer lugar, en la prevención de los incidentes y, en segundo término, en la reducción de las consecuencias.

A su vez, estos dos criterios generales se enfocan desde cuatro vértices:

- La infraestructura.
- La explotación.
- Los usuarios.
- Los vehículos.

Siguiendo este esquema general, los túneles carreteros incorporan numerosas medidas de seguridad que abarcan tanto las relacionadas con la Infraestructura, como a la explotación. En primer lugar, se pretende prevenir los incidentes, con medidas como el mantenimiento de elevados niveles de iluminación, la reducción de la velocidad de circulación o la restricción (total o en determinadas horas) al paso de vehículos pesados de gran tonelaje y mercancías peligrosas.

Otros, sin embargo, están orientados a pallar, desde un enfoque múltiple, las consecuencias en caso de producirse el incidente:

- Minimizando los tiempos de respuesta: con la instalación de sistemas de alerta temprana por detección lineal de incendios, detección automática de incidentes, postes SOS, etc.
- Mejorando las condiciones de evacuación de los usuarios: mediante el uso de los equipos de ventilación, señalización de las salidas de emergencia, iluminación de refuerzo, megafonía, etc.
- Apoyando a los servicios de emergencia: con medidas como la construcción de la galería de acceso bajo calzada en los túneles del By Pass, la instalación de sistemas tradicionales de protección contra incendios (red de columna seca y húmeda) y otros, más novedosos, como el de extinción por agua nebulizada.
- Gestión de la infraestructura en Centros de Control construidos a tal efecto.
- Desarrollándose unos protocolos de actuación en base a una serie de escenarios concretos que permiten al personal de seguridad de los Centros de Control actuar de acuerdo a una serie de procedimientos específicamente diseñados para minimizar las consecuencias provocadas por un incidente.

En definitiva, es muy importante resaltar que la seguridad de los túneles carreteros se apoya en todo un conjunto de medidas y sistemas fundamentales que, en gran parte, son invisibles al usuario del túnel, pero que su presencia y correcta actuación son claves para garantizar la seguridad de los usuarios y de la infraestructura.

1.2. El incendio en el túnel

La sociedad se muestra especialmente sensible a los temas relacionados con la seguridad en infraestructuras públicas o semipúblicas, y éste es el caso de la seguridad de los túneles carreteros ante incendios. Esta situación se ve agravada por las recientes catástrofes que se han producido en túneles europeos, Mont Blanc, Tauren…

De entre todos los posibles accidentes que pueden suceder en un túnel, el de un incendio en su interior es el que mayor riesgo intrínseco tiene debido a que el carácter de espacio confinado del túnel hace que el humo generado dificulte el proceso de evacuación de las personas atrapadas en su interior. Esta característica hace que la propagación y crecimiento del incendio sea acusada y se alcancen temperaturas muy elevadas en el entorno del punto de incendio que afectarán gravemente a las instalaciones y provocarán graves daños estructurales. Por ejemplo, en el incendio que se produjo en el túnel de Mont Blanc murieron 39 personas y las operaciones de reparación mantuvieron el túnel cerrado durante 3 años.

Ante una situación de este tipo, incendio en el interior del túnel, el movimiento del humo y las altas temperaturas en el entorno hacen que cuando los Servicios de Emergencia accedan al túnel afectado (el tiempo estimado para la llegada al túnel por parte de los bomberos, policía y ambulancias es de 10-15 minutos) el humo y las

temperaturas en el interior impidan el acceso de los servicios de emergencia al interior del túnel por lo que el apoyo a las personas atrapadas no puede realizarse en condiciones de seguridad.

Por esta razón, deben ser los operadores de los respectivos Centros de Control de los túneles los que actúen de forma inmediata y adecuada sobre las instalaciones de seguridad implementadas en la infraestructura (detección, señalización, ventilación, …) para conseguir lograr el control de los efectos del incendio permitiendo de este modo la evacuación de las personas atrapadas en el interior en condiciones de seguridad y el mantenimiento de unas condiciones en el interior del túnel compatibles con la vida que permitan actuar a los Servicios de Emergencia en condiciones de seguridad cuando estos accedan al túnel.

Ante situaciones con incendio en el interior del túnel, la primera medida consiste en facilitar la evacuación de las personas más próximas al lugar del incendio a través de los itinerarios de evacuación existentes, mediante el confinamiento de la nube de humos, durante un tiempo suficiente que permita mantener condiciones ambientales compatibles con la vida. Para proceder a continuación a la extracción o en su caso, al barrido del humo, y facilitar así las labores de extinción.

Para atajar los efectos del humo, siendo importante el diseño del sistema de ventilación, lo es mucho más la definición de las pautas de ventilación de dicho sistema en caso de incendio. Recibe el nombre de pauta de ventilación, la estrategia secuencial de operación sobre el sistema de ventilación que responde y resuelve una determinada situación de incendio.

Fruto de los proyectos europeos de investigación desarrollados se ha profundizado en el conocimiento del comportamiento físico del fuego y de la propagación del humo y de los efluentes contaminantes en los túneles. Este conocimiento ha permitido el avance en materias como la dinámica de fluidos computacional que permite, mediante modelos numéricos avanzados, simular numéricamente escenarios de incendio concretos y determinar la forma de actuación óptima del sistema de ventilación del túnel para alcanzar los objetivos de seguridad requeridos para permitir la evacuación de la infraestructura de las personas atrapadas en ella durante la emergencia así como para permitir el acceso de los servicios de emergencia en condiciones de seguridad.

Este conocimiento adquirido, ha permitido a las ingenierías la elaboración de pautas de ventilación y protocolos de actuación en caso de emergencia que se integran en los Manuales de Explotación de los túneles con el objetivo de establecer unos criterios mínimos de seguridad en la explotación de la infraestructura.

Estas pautas de ventilación normalmente se implementan en el sistema SCADA de control del túnel en una serie de algoritmos que integran la totalidad de sistemas de seguridad del túnel con el objetivo de que, ante una detección de un incendio por parte del sistema de detección, el SCADA gestione de forma autónoma la actuación del sistema de ventilación.

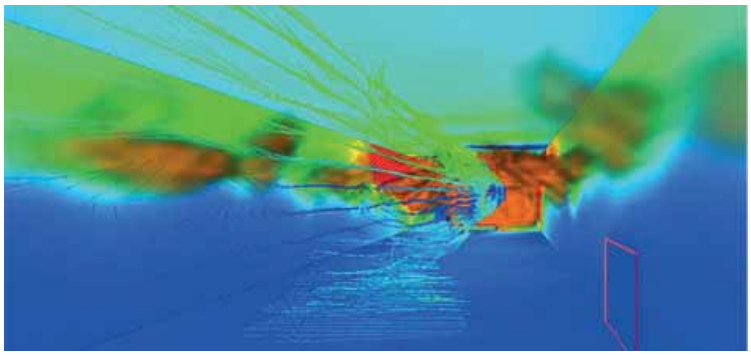
Túnel carretero

El procedimiento de diseño actual se basa en el acuerdo, entre la ingeniería responsable del desarrollo de los algoritmos de ventilación y la autoridad competente, de una serie de escenarios de incendio cerrados basados en ensayos de laboratorio. En base a estos escenarios de incendio teóricos, la ingeniería desarrolla un complejo estudio fluidodinámico en el que analizando las prestaciones reales del sistema de ventilación del túnel objeto de estudio y su interacción con los efectos provocados por el fuego de diseño acordado. A través del postproceso de los resultados obtenidos se diseñan los algoritmos de ventilación que automatizarán las pautas de ventilación a desarrollar en caso de producirse un incendio.

El cálculo numérico de una simulación fluidodinámica de un incendio en un túnel de más de 500 m, puede demorarse hasta 1 semana para obtener unos resultados válidos para el escenario de incendio considerado.

Esta forma de enfocar y tratar la ventilación en caso de incendio en los túneles presenta una serie de inconvenientes que en la actualidad no pueden ser abordados:

- El diseño de las pautas de ventilación y protocolos de actuación en base a escenarios de incendio estáticos cerrados implica la asunción de que el desarrollo de todos los incendios posibles en el túnel va a ser el mismo que el escenario de incendio considerado (laboratorio). Esto hace que no se tengan en cuenta:
    - o Las diferencias en la propagación y crecimiento de los posibles fuegos.
    - o El avance en la tecnología de automoción está provocando la aparición de vehículos cuya carga de fuego es muy diferente a la de los vehículos que se utilizaron en los proyectos europeos de investigación en los que se desarrollaron los fuegos de cálculo. Actualmente el auge de la electrónica en el sector de la automoción y de los vehículos eléctricos hace que el uso de materiales plásticos sea más habitual que hace 15 años. Esto provoca que, el crecimiento y propagación de estos incendios vaya a diferir con respecto a los incendios de cálculo, por lo que la actuación del sistema de ventilación no se va a adecuar a las necesidades reales del incendio.



Simulación CFD

- El tratamiento automático de la ventilación en caso de emergencia provoca que una vez desencadenada, esta no pueda adaptarse a las necesidades reales a no ser que se desactiven el modo de funcionamiento automático y se pase a un control manual. En esta situación, la responsabilidad de la gestión de la emergencia recae en los operadores de los centros de control que no disponen de una herramienta que les facilite la toma de decisiones.
- Las pautas de ventilación y los protocolos de actuación quedan recogidos en el Manual de Explotación del túnel. Estas pueden consultarse, sin embargo, los operadores no tienen la forma de ponerlas en práctica en un entorno real ni virtual. Esto provoca que, ante una emergencia en el que haya un fallo de comunicación entre el SCADA y las instalaciones del túnel los responsables de la gestión de la emergencia y de la actuación con el sistema de ventilación, no tengan la confianza de haberse enfrentado a dichas situaciones de emergencia. Asimismo, el paso al control manual para adecuar la actuación a las necesidades reales de la emergencia no sea una solución viable.
- Los incendios en túneles no son accidentes muy frecuentes, por lo que cuando los servicios de emergencia acceden al túnel (10-15 minutos después del aviso de incendio) se encuentran en un entorno poco habitual que dificulta en gran medida su intervención.

Las instalaciones de protección ante incendios suponen la partida más importante en términos económicos de las relacionadas con la seguridad de un túnel carretero, tanto en la fase de ejecución y puesta en marcha como en la de mantenimiento. Muestra de este aspecto son las operaciones de mantenimiento continuado que deben realizarse sobre estas instalaciones de acuerdo a lo establecido en la normativa aplicable.

Asimismo, es prescriptiva la formación y entrenamiento del personal encargado de la seguridad de los túneles en el tratamiento y gestión de las emergencias, puesto que tan importante como el correcto funcionamiento de las instalaciones de seguridad es el conocimiento, por parte de los operadores del sistema de control, de cómo deben de actuar ante una situación de emergencia.

Conscientes de estos problemas, la Asociación Mundial de la Carretera (P.I.A.R.C por sus siglas en inglés), recomienda la implementación en los planes de explotación de un sistema de formación y entrenamiento práctico que capacite al personal de seguridad para la actuación correcta en una situación de incendio.

Esta problemática, en parte, es común a otro tipo de actividades donde la formación y entrenamiento ante situaciones reales no se puede realizar en entornos reales debido al coste y dificultad asociados a la puesta en práctica de las pruebas. Por ejemplo, los pilotos de avión o conductores de trenes realizan de forma frecuente tareas de entrenamiento en simuladores virtuales que reproducen la física del avión o del tren.

Por todo ello, con el proyecto TWINTUN se pretende dar respuesta a esta necesidad con la construcción de un gemelo digital, con la capacidad de reproducir la física del incendio y que sea capaz de simular dinámicamente en un entorno virtual cambiante diferentes formas de actuación del sistema de ventilación permitirán los operadores del túnel entrenar en un simulador totalmente fidedigno al túnel real diferentes situaciones de emergencia.

Asimismo, este Gemelo Digital puede estar conectado en tiempo real con una red inteligente de sensores que, ubicados estratégicamente en el túnel. monitoricen el estado interior y la evolución real de los incendios. De esta manera, el gemelo digital reproducirá lo que ocurre en el interior del túnel y permitirá analizar en tiempo real las consecuencias provocadas por las diferentes formas de actuación, lo cual conllevará a la adaptación de las Pautas de Ventilación a las necesidades reales de actuación sobre incendios considerando su evolución y crecimiento real. De esta manera, la plataforma TWINTUN se convertirá en una herramienta de ayuda a la toma de decisiones que resolverá de forma eficaz la problemática causada con el diseño de pautas de ventilación en base a escenarios de incendio estáticos de laboratorio.

Esquema funcional plataforma TWINTUN

La plataforma TWINTUN también servirá como herramienta para dotar de información en tiempo real a los servicios de emergencia y de su evolución prevista. De esta forma se facilitará si intervención permitiendo que las decisiones y modo de actuación de estos se adapten a la situación real del entorno.

TWINTUN es una plataforma capaz de reproducir de forma virtual un túnel real, sus instalaciones de seguridad y la física del incendio e interacción con el sistema de ventilación. Dicha herramienta está completamente integrada en tiempo real con la sensórica del túnel generando un entorno virtual gemelo al real desde su puesta en servicio hasta el fin de su vida útil.

Esta herramienta aporta una valiosa información también en fase de proyecto y construcción, integrándose con los modelos BIM constructivos de la infraestructura permitiendo de este modo una optimización en el dimensionamiento y diseño de los sistemas de ventilación.

1.3. Objetivos

El objetivo de la plataforma basada en tecnologías Serious Games que permite interactuar en tiempo real sobre un gemelo digital del túnel carretero, considerando las prestaciones de los sistemas instalados para el manejo de una emergencia y la formación avanzada de operadores y equipos de extinción y rescate.

Esto permitirá garantizar la correcta formación y entrenamiento del personal encargado de operar este tipo de infraestructuras aprovechando las bondades del Gamed Based Learning o gamificación de la formación. Pero también permitirá optimizar y validar los protocolos de actuación, así como poder conocer a tiempo real la repercusión de cada una de las decisiones que se van tomando para manejar una determinada emergencia.

Este planteamiento supone un cambio de paradigma en el enfoque actual de la seguridad en caso de incendio de túneles carreteros en particular y el de la gestión de emergencias en túneles en general, pasando del actual posicionamiento pasivo-preventivo a un planteamiento proactivo de análisis holístico de la seguridad.

Los objetivos funcionales de la plataforma TWINTUN son:

- Formación y entrenamiento de operadores en situaciones reales de incendio en un gemelo digital del túnel real interactuable.
- Realización de simulaciones múltiples y análisis de acciones/consecuencias para la optimización de la toma de decisiones en situaciones de emergencia por parte de operadores y los servicios de emergencia.

Los objetivos tecnológicos del proyecto son:

- Desarrollo de una herramienta para la construcción virtual de un gemelo digital de un túnel carretero y sus instalaciones compatible con los modelos de construcción BIM.
- Integración en la plataforma TWINTUN de la información registrada por los dispositivos de sensorización del túnel real para la reproducción en el gemelo digital de condiciones de contorno dinámicas.
- Integración del motor físico en el gemelo digital constituyendo el conjunto un Serious Game dinámico e interactuable que permita reproducir en el entorno virtual diferentes escenarios de incendio en condiciones cambiantes.
- Integración dinámica en el gemelo digital del resto de instalaciones de seguridad del túnel (paneles informativos, barreras de corte de carril, megafonía, …) de forma interoperable para la simulación en el túnel virtual de protocolos de actuación.
- Integración de TWINTUN en la herramienta TRAFIKOA, propiedad de GERTEK, que permitirá la gestión de la explotación de los túneles carreteros desde un mismo entorno. Se pretende implementar en la herramienta SCADA actual TRAFIKOA los siguientes módulos:

- Módulo de entrenamiento: el simulador de emergencias basado en el gemelo digital será el encargado de servir como herramienta de formación para operadores y servicios de emergencia.

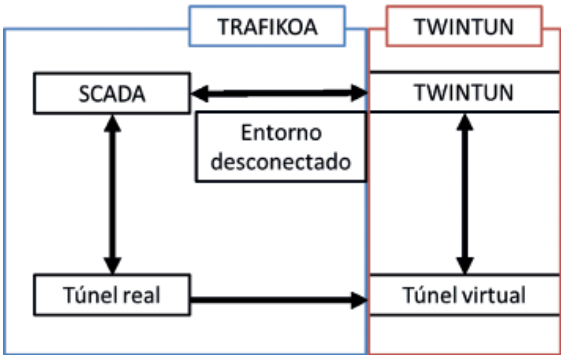
- Validación del motor físico implementado en TWINTUN a través de modelos numéricos fluidodinámicos contrastados específicos de simulación del comportamiento de incendios.
- Validación de las prestaciones de TWINTUN a través de pruebas reales de caracterización aerodinámica en un túnel real para verificar la capacidad del gemelo digital de simular en tiempo real las prestaciones del sistema de ventilación.
- Validación de la plataforma TWINTUN a través de pruebas reales de incendio en un túnel real para verificar la funcionalidad de la herramienta. Concretamente en el túnel de Argalario de la variante sur metropolitana.

Detalle BIM túnel Argalario

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1. Arquitectura de la plataforma TWINTUN

En este apartado se describe la arquitectura de la plataforma TWINTUN que estará íntimamente relacionado con el SCADA TRAFIKOA, en concreto con el entorno desconectado.



Esquema arquitectura TWINTUN

Se presentan 2 vías de comunicación actualizadas:

- Por un lado, el entorno desconectado de TRAFIKOA será el interfaz a partir del cual los usuarios manejarán la plataforma TWINTUN.
- Por otro, deberá existir una comunicación entre el túnel real y el virtual. A través de esta comunicación la plataforma TWINTUN dispondrá de datos reales y actualizados de las variables que se monitorizan en continuo en el túnel (velocidad del aire, concentración de sustancias, …).

2.2. De Modelo BIM a Unity 3D. Del modelo geométrico estático al gemelo digital interactivo

La construcción de infraestructuras en general y de túneles en particular tiende a la adopción de la tecnología BIM como base para el diseño, la construcción y la gestión de activos durante toda la vida útil de los túneles. Es por ello que la plataforma TWINTUN deberá adaptarse a esta tecnología y ser 100% compatible con los modelos BIM.

El túnel Argalario, que supondrá el caso piloto de la plataforma TWINTUN como se ha comentado, no dispone en la actualidad de un modelo BIM. Es por ello que se ha iniciado la construcción y modelado del BIM de Argalario partiendo de la información actualizada del túnel.

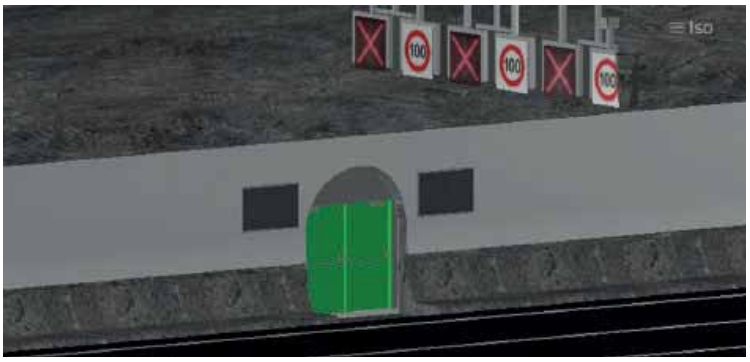
Este modelo no contará únicamente con la geometría del túnel. El modelo BIM incluirá todas las instalaciones consideradas del túnel y su información semántica de valor.

Esta situación establece un nuevo requisito a la plataforma TWINTUN que deberá ser completamente compatible con modelos BIM de modo que la construcción del túnel virtual no requiera un nuevo proceso de modelado sino que TWINTUN importará directamente toda la información desde el modelo BIM. De este modo a través de este proyecto se establecerán lo requerimientos a cumplir en los modelos BIM de obras futuras.

Tal y como se ha comentado con anterioridad, un aspecto fundamental para el proyecto TWINTUN es la capacidad de la plataforma para importar y transformar un proyecto BIM de un túnel en un túnel virtual interactuable de una forma rápida y eficaz. De este modo la construcción de futuros proyectos de túneles, en los que se vaya a aplicar TWINTUN, será muy eficiente.

Detalle modelo BIM

Para ello se realizó un análisis específico de las herramientas disponibles en el mercado para ello y se adaptó la solución óptima para dicho desarrollo.



Detalle modelo UNITY 3D

Asimismo, se especificaron las necesidades y criterios que debe cumplir el modelo BIM para que el traslado de este a UNITY 3D sea lo más completa posible y tras la importación se disponga además de la información del modelo geométrico la semántica de los elementos, así como las datasheet y características particulares del global de las instalaciones.

Para el caso piloto del túnel Argalario no se disponía de un modelo BIM. Por ello y a partir de los planos en 2D disponibles del trazado y de las instalaciones que se decidieron implementar (las relacionadas con aspectos de seguridad) se construyó un modelo BIM completo del túnel.

Los criterios básicos para la construcción de este modelo fueron principalmente la representación geométrica exacta del túnel, con un nivel de detalle alto.

Dado que al realizar la importación a UNITY 3D los elementos del modelo BIM se trasladarían a la herramienta como objetos geométricos a los cuales posteriormente habría que dotarles de dinámica a través de los scripts basados en C#, se decidió agrupar todo el modelo BIM por familias en las que la organización y nomenclatura respetara la posición y ordenamiento real de los elementos.

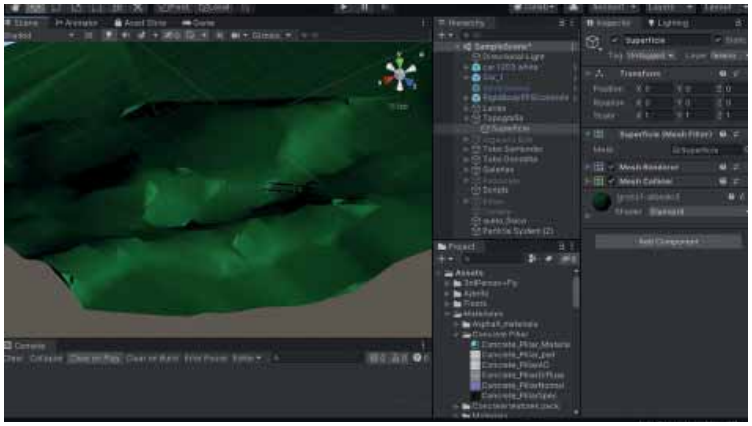
La geometría, incluyendo paredes, trazado y galerías, se construyeron como elementos independientes por cada tubo. De esta forma al importarse a UNITY 3D se les implementaría su física independiente y propiedades necesarias para convertirlos en superficies sólidas interactuables.

En relación a las instalaciones, estas se construyeron agrupándose por clase incluyendo a cada elemento su nomenclatura real en el SCADA TRAFIKOA (previendo la necesidad para la integración del protocolo OPC-UA

que se realiza en otros PT). A estas una vez en UNITY 3D y mediante scripts específicos se les dota de las capacidades dinámicas reales de las mismas, así como la física particular de cada una de ellas

Bocas de túnel Argalario UNITY 3D

Se decidió construir el modelo BIM sin aplicar texturas a los elementos ya que al no disponer de las originales el proceso de construcción y aplicación en BIM de estas es mucho más laborioso que su aplicación directa en UNITY 3D. Aún así, la herramienta para la importación de modelos BIM aplicada en la plataforma TWINTUN es capaz de importar las texturas directamente de BIM.



Modelo UNITY 3D

La imagen anterior muestra una panorámica del túnel y su orografía así como las diferentes secciones en las que se divide el frontend de UNITY 3D. A diferencia de en las imágenes anteriores correspondientes al modelo BIM en Revit, aquí ya se han aplicado texturas a los elementos, iluminación y propiedades físicas a los elementos.

Modelo UNITY 3D

También se han desarrollado los scripts sobre C# que gobernarán el comportamiento e interacción del humo ante una situación de incendio en el interior del túnel virtual. Esta serie de scripts forman el módulo de simulación de incendios específicamente diseñado para su aplicación en la plataforma TWINTUN.

Simulación dinámica e interactuable de incendio UNITY 3D

Se ha prestado especial interés al desarrollo de la capacidad del módulo de simulación de incendios en reproducir el fenómeno llamado backlayering (retroceso de los humos en un túnel cuando la velocidad de ventilación es negativa), así como en la interacción con el sistema de ventilación longitudinal del túnel y la capacidad del módulo en reproducir la desestratificación de los humos provocada por la activación de ventiladores próximos a la capa de humo y a la aplicación de una ventilación excesiva.

2.3. Comunicación bidireccional en tiempo real entre túnel – TRAFIKOA – TWINTUN. protocolo OPC-UA

Un requisito indispensable para la correcta funcionalidad de la plataforma TWINTUN es la comunicación en tiempo real entre el túnel real y el virtual a través del SCADA TRAFIKOA.

De esta forma el control tanto de los sistemas e instalaciones del túnel real como del virtual se realizará desde el mismo entorno.

La importancia de esta característica viene relacionada con las capacidades de formación de la plataforma TWINTUN. Puesto que dicha formación debe ser realizada sobre el mismo entorno en el que los operadores desarrollan su trabajo.

Además, por motivos de seguridad, el túnel virtual se encontrará "emparejado" con el entorno desconectado del SCADA TRAFIKOA. De esta forma, aunque valores instantáneos y reales como la lectura de los anemómetros del túnel real si se lean desde l túnel virtual, las acciones a desarrollar como formación (planes de emergencia de cierre de túnel, protocolos de incendio, etc.) se aplicarán para que únicamente tengan efecto en el túnel virtual y en el entorno desconectado del SCADA TRAFIKOA.

Dados estos condicionantes y la estructura de TRAFIKOA se optó por la tecnología de comunicación OPC-UA. En concreto se han desarrollado las herramientas necesarias, basadas en el lenguaje de programación C#, que permiten la aplicación de dicha tecnología en el entorno de Unity 3D.

La OPC UA es un protocolo de comunicación disponible de forma gratuita diseñado específicamente para la automatización industrial. Permite el intercambio de información y datos en dispositivos dentro de máquinas, entre máquinas y desde máquinas a sistemas. La OPC UA cierra la brecha entre la tecnología de la información y la tecnología operativa.

La OPC UA es una evolución del estándar de OPC original, que solo funcionaba en dispositivos con Windows de Microsoft. Sin embargo, la OPC UA fue diseñada para permitir a los fabricantes aprovechar toda la tecnología moderna que ayuda a crear una fábrica inteligente: dispositivos móviles, grandes bases de datos, aprendizaje artificial, visión artificial, inteligencia artificial y aprendizaje profundo, mantenimiento predictivo y más. Dado el gran número de máquinas, dispositivos y sistemas dentro de una instalación de fabricación moderna o una operación de logística, la OPC UA es el medio para conectar estas islas aisladas.

Mediante el uso de modelos, OPC UA especifica reglas básicas para exponer datos a cualquier aplicación o dispositivo que quiera consumirlos. OPC UA es, en sí mismo, un modelo de datos centrado en la información. Comprende un modelo de objeto genérico con un sistema de tipos extensible con modelos integrados para el acceso a los datos. Estos modelos integrados especifican funciones tales como información de alarmas y eventos, información sobre datos históricos, detalles de acceso a datos, descripciones de dispositivos y programas para ejecutar.

OPC UA se basa en SOA, el framework de comunicación cliente-servidor. Por tanto, en OPC UA hay servidores y clientes.

Un servidor de OPC UA proporciona a un cliente de OPC UA aplicaciones y sistemas de control, como MES y SCADA, y acceso seguro a datos de automatización industrial utilizando modelos de información OPC UA que especifican la forma en que se organizan, almacenan y recopilan dichos datos. El término "servidor de OPC UA" se refiere al estándar de software OPC UA en la máquina y no al hardware en sí, que podría ser un servidor virtual.

Un cliente OPC UA puede soportar un modelo de información OPC UA. Los clientes de OPC UA solicitan y escriben datos en los componentes de un sistema a través de servidores de OPC UA.

Los sistemas SOA, como OPC UA, integran aplicaciones dispares a través de una red y conectan dispositivos en diferentes nodos de la misma.

Un nodo es la unidad básica de información en el espacio de direcciones OPC UA y proporciona una forma estándar para que los servidores OPC UA representen objetos para los clientes de OPC UA. Los nodos son fragmentos de información (por ejemplo, un valor de temperatura único) y consisten en atributos, el valor real de los datos y una o más referencias a otros nodos, cada uno en su propio espacio de direcciones. Por lo tanto, si queremos registrar una temperatura única, esta ocupará varias direcciones en el espacio de direcciones.

La siguiente imagen muestra la estructura del servidor OPC UA del entorno desconectado de TRAFIKOA. Se puede apre apreciar la información que contiene el nodo seleccionado (Velocidad de viento del anemómetro 000A del túnel Argalario).

Los nodos se referencian a través de un ID de nodo único: un URI (identificador de recurso único) de espacio de nombres, un tipo de datos y el identificador en sí. Cada nodo pertenece a un espacio de nombres específico. El URI de espacio de nombres se encuentra en una tabla de espacios de nombres independiente en el servidor OPC UA. Esta tabla, que almacena URI separados para los modelos de información empleados por organizaciones individuales con sus propios requisitos sobre cómo deben verse y comportarse los datos, permite a OPC UA ampliar sus servicios sin cambiar el diseño subyacente del estándar.

En OPC UA, los nodos poseen múltiples clases que permiten la creación de variantes en el nodo básico. Hay ocho clases de nodos centrales en OPC UA, incluyendo objetos (entidades físicas), métodos (funciones que almacenan datos cuando se consultan) y variables (los datos reales).

Las clases de nodos de objetos en OPC UA son la clave para crear datos complejos y distinguir entre entidades similares, pero diferentes; por ejemplo, un sensor de temperatura para un aire acondicionado y un sensor de temperatura para una caldera.

Teniendo en cuenta l estructura de datos de los servidores OPC UA y del funcionamiento de Unity 3D, se decidió el desarrollo de una serie de scripts o programas que permitieran:

1. Conectarse de forma segura a modo de cliente a cualquier servidor OPC UA.
2. Importar de forma automática todos los nodos del servidor OPC UA y convertirlos en objetos en Unity con sus características.
3. Los objetos en Unity deben ser capaces de leer en tiempo real cualquier cambio que pueda producirse en su nodo correspondiente del servidor OPC UA.
4. La comunicación debe ser bidireccional, de modo que los objetos de Unity pueden escribir valores en sus nodos del servidor.

Dichos programas se han desarrollado a lo largo del proyecto TWINTUN realizándose diferentes pruebas de funcionamiento y particularizándolos a la estructura de los servidores OPC UA que utiliza TRAFIKOA. De esta manera, estos programas de comunicación serán válidos para su aplicación en futuros túneles.

En total se han desarrollado 3 programas específicos:

1. Interfaz. Con este script se consigue se le aporta a TWINTUN la funcionalidad de un cliente OPC UA y además importa los nodos de interés del servidor convirtiéndolos de forma automática en objetos en Unity.
2. Lectura. Se trata de un script que asociado a un objeto de Unity es capaz de detectar una señal de cambio en el valor de su nodo asociado del servidor, para posteriormente realizar la lectura del mismo. De este modo se evita que Unity esté llamando al servidor de forma continua.
3. Escritura. Como su nombre indica, este script se ha desarrollado para que los objetos de Unity puedan sobreescribir valores en los nodos del servidor OPC UA. Principalmente se utiliza para actualizar datos de los valores de anemómetros y detectores (CO, NO, Opacímetros).

3. PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA LA VALIDACIÓN DEL MOTOR FÍSICO DESARROLLADO

3.1. Cálculos y algoritmos

El cálculo numérico avanzado es la herramienta clave para la realización de simulaciones fluidodinámicas CFD para el estudio y análisis del comportamiento del incendio y la propagación del humo en un túnel. Estas simulaciones se caracterizan por su nivel de realismo y cálculo de numerosos factores de riesgo provocados por el incendio (movimiento del humo, evolución de la visibilidad, temperatura, velocidad de ventilación, radiación, contaminantes, etc.).

Sin embargo, este nivel de precisión lleva asociado un coste computacional enorme. Por ejemplo, para el túnel piloto de Argalario, la simulación de un único escenario de incendio conlleva 4-5 días de cálculo. Además estas simulaciones son fijas es decir, se deben determinar desde el inicio todas las condiciones de contorno. Debido a esto la tecnología fluidodinámica es incompatible con las necesidades de TWINTUN para la simulción de incendios ya que se requiere que sean simulaciones en tiempo real y totalmente dinámicas e interactuables. Es decir, las simulaciones de un escenario de incendio en TWINTUN son dinámicas e interacuables en tiempo real para que puedan cumplir su función de formación en la operativa de emergencia en caso de incendio, pudiéndose activar ventiladores durante el transcurso del incendio a criterio del operador.

Pese ala precisión que aporta la tecnología de cálculo fluidodinámico, su coste computacional impide que pueda aplicarse en TWINTUN por razones obvias. Es por ello que, dentro del marco del proyecto, se ha desarrollado un motor físico que simule los factores de riesgo de interés para la plataforma TWINTUN en tiempo real y de forma dinámica e interactuable.

Con el objetivo de formación en operativa de operativa en caso de emergencia de TWINTUN hay factores de riesgo del incendio que no son relevantes para esta tarea, por ello se seleccionaron los principales y el motor físico desarrollado se centra en simular estos, que son:

- Movimiento del humo – backlayering.
- Velocidad de ventilación.

Para validar la funcionalidad del motor físico desarrollado en Unity, se llevaron a cabo una serie de pruebas experimentales de ventilación con los siguientes objetivos:

1. Verificar la capacidad del motor físico para simular en tiempo real las prestaciones y la aportación a la velocidad de ventilación de la activación de ventiladores.
2. Verificar la capacidad del motor físico para reproducir el fenómeno de backlayering (retroceso de los humos cuando la velocidad de ventilación es inferior a la velocidad crítica).

El movimiento del humo generado por un incendio está gobernado por la velocidad de ventilación siendo la Velocidad Crítica una variable fundamental para entender su comportamiento.

La Velocidad Crítica es aquella velocidad longitudinal interior del túnel que evita que el humo retroceda (avance en sentido contrario a la ventilación). Por tanto si la velocidad de ventilación es igual a la Vc el backalayering registrado será 0.

La velocidad crítica (Vc) depende principalmente de la potencia del incendio y de la geometría de la sección del túnel. A grandes rasgos la Vc aumenta con la potencia del incendio y disminuye con la altura y sección del túnel.

Para lograr simular de forma realista el movimiento del humo en función de la velocidad de ventilación, el motor físico desarrollado realiza en tiempo real un cálculo analítico que determina el avance aguas arriba y aguas abajo del humo.

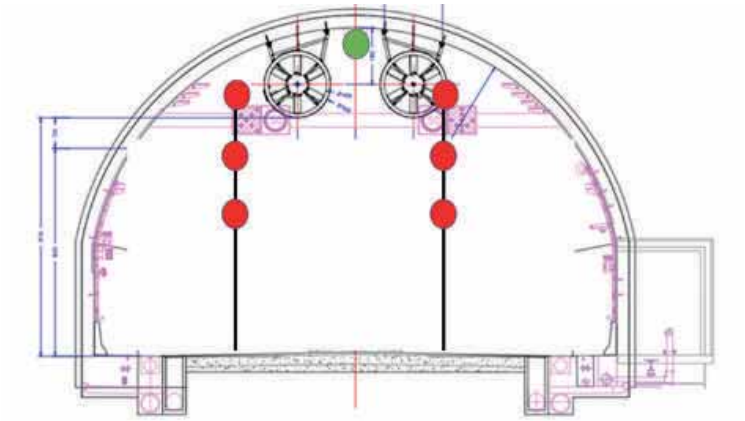
3.2. Monitorización durante el ensayo

Para registrar la velocidad interior del túnel se instaló 1 sección móvil de monitorización que se trasladó a las diferentes zonas de interés de medición en cada ensayo.

Las zonas de interés del túnel son las partes del mismo donde el flujo de aire puede verse afectado significativamente por la actuación de la ventilación forzada, por un cambio de sección, por tratarse de una zona en curva significativa, etc. Los anemómetros del túnel se sitúan a lo largo del mismo cubriendo diferentes zonas y en cada ensayo la red de anemómetros se ubicó en la zona de interés correspondiente controlando los anemómetros propios del túnel.

Estas secciones de monitorización, consistieron en una malla de anemómetros que se utilizó para calcular la velocidad representativa en la sección del túnel, así como la distribución y variabilidad de la medida puntual en función de la altura.

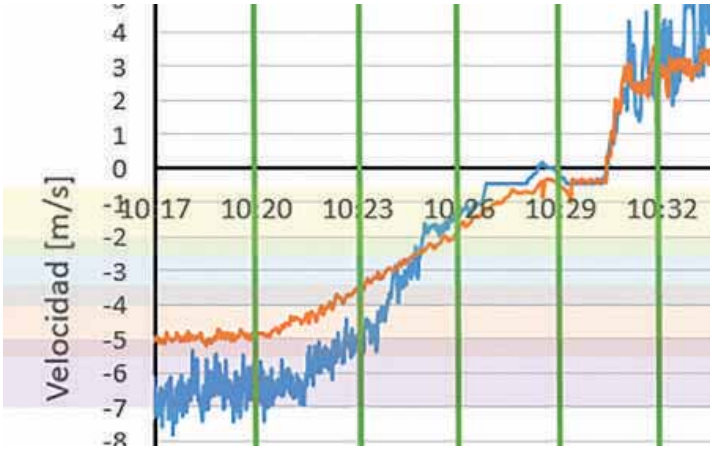
La imagen siguiente muestra una red de anemómetros similar a la utilizada en los ensayos del túnel, donde los círculos rojos muestran los anemómetros de referencia, esta red de anemómetros junto al propio del túnel (circulo verde) permiten la determinación de la velocidad media de la sección, así como del perfil de velocidades y uniformidad.



Esquema básico de ensayo de caracterización aerodinámica

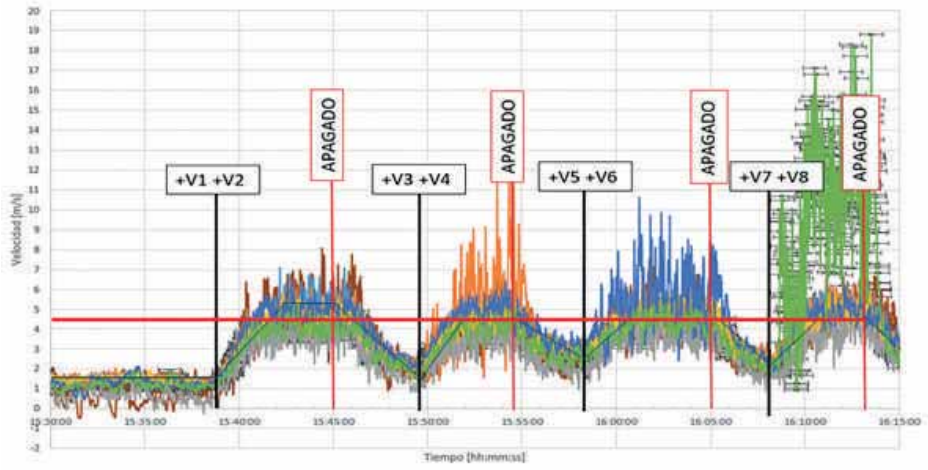
Para caracterizar adecuadamente el efecto de los ventiladores, se precisa conocer el tiempo necesario desde que se ordena el encendido o apagado de un ventilador hasta que su efecto se consolida en el interior del túnel.

Para ello se ha utilizado el registro de mediciones de anemómetros realizadas durante las pruebas experimentales.



Resultados experimentales ensayo caracterización aerodinámica

En la figura anterior se puede observar cómo la activación de cada uno de los ventiladores (líneas verticales VERDES) va ayudando a frenar el tiro natural existente de -5m/s. La velocidad va reduciéndose de forma quasi-lineal al encender 1 ventilador, el cual logra restarle a la velocidad alrededor de 1,5m/s en el período de 3 MINUTOS (TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN). Este tiempo será algo superior si en el periodo analizado se produce el cambio de sentido en la velocidad del aire.



Resultados experimentales ensayo caracterización aerodinámica

Para el caso de encendido simultáneo de 2 ventiladores el tiempo de estabilización, de acuerdo a los registros de la figura anterior, son también del orden de los 3 MINUTOS.

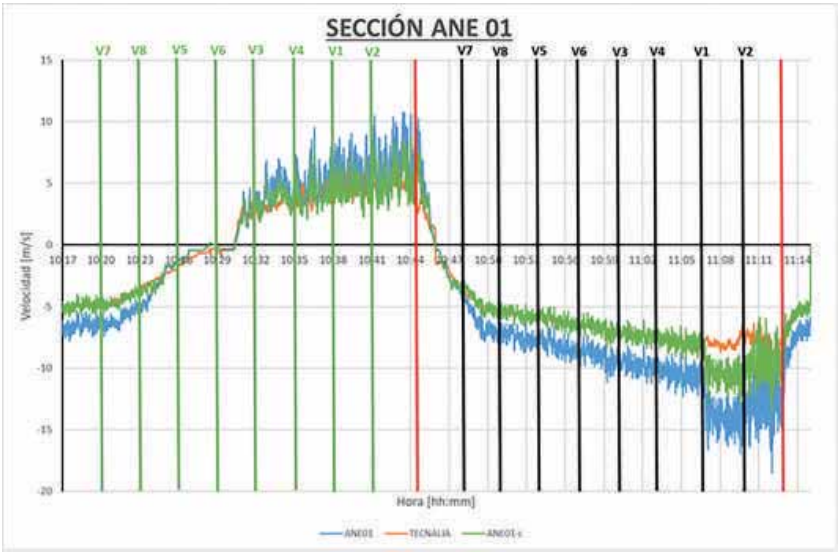
Estas pruebas se repitieron durante diversos días contando con una monitorización detallada, partiendo de diferentes escenarios de tiro natural por lo que se logró alcanzar unas conclusiones válidas a implementar en el motor físico.

- Aporte unitario de cada ventilador unitario activo: +1.5 m/s.
- Tiempo de estabilización: 3 minutos.

Se realizaron pruebas en ambos sentidos de ventilación.

La imagen siguiente muestra los resultados de una prueba experimental en la que se fueron encendiendo hasta 8 ventiladores de forma simultánea en ambos sentidos.

La curva verde se corresponde con los datos registrados por la malla de anemómetros, la curva azul muestra el registro del anemómetro propio del túnel y la curva naranja la estimación del motor físico desarrollado en Unity.



Resultados experimentales ensayo caracterización aerodinámica

Asimismo, se realizó una prueba experimental de incendio a escala real para verificar que le motor físico de incendio desarrollado era capaz de reproducir de forma realista el movimiento del humo bajo unas condiciones de ventilación dadas.

Ensayo real de incendio. EHCL – Tecnalia ®

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En el presente apartado se resumen los principales resultados y conclusiones obtenidos durante el desarrollo del proyecto TWINTUN.

1. Caso piloto:

- Se construyó un modelo BIM del túnel Argalario de la Variante Sur Metropolitana ya que se trata del túnel seleccionado en el PT1 como caso piloto y no se disponía de modelo BIM original.
- Se implementaron en el modelo BIM del túnel Argalario la totalidad de instalaciones relacionadas con la seguridad y que entran en juego en los diferentes planes de emergencia recogidos en el Manual de Explotación del túnel objeto de estudio.
- Se ha definido la estructura óptima de construcción de modelos BIM para su posterior traslado eficiente a la herramienta para la construcción del gemelo digital interactivo.

2. En cuanto al motor de videojuegos a utilizar en el desarrollo del gemelo digital interactuable:

- Se ha trabajado con el motor de videojuegos Unity3D para el desarrollo del gemelo digital interactuable del túnel de Argalario.
- Se ha desarrollado la metodología para la importación de modelos BIM a UNITY 3D de forma que toda la información disponible en BIM se traslade a UNITY 3D y sea completamente accesible desde esta plataforma para la construcción del gemelo digital interactivo.
- Se ha construido una librería dinámica de scripts genéricos de instalaciones que formarán parte de la plataforma TWINTUN y que servirán para el prototipado y construcción rápida de futuros gemelos digitales.

3. En cuanto a las funcionalidades de la plataforma objetivo:

- Se ha desarrollado una serie de scripts específicos para lograr una comunicación a través de un protocolo OPC-UA entre el túnel virtual y el SCADA TRAFIKOA real instalado en el Centro de Control de la Variante Sur Metropolitana.

- Se han desarrollado scripts específicos para la simulación en tiempo real del comportamiento del humo en diferentes escenarios de incendio y su interacción con el sistema de ventilación longitudinal del túnel.
- Se ha decidido obviar del cálculo dinámico del incendio factores de riesgo no relevantes para la formación de operadores dado el coste computacional requerido.
- Se han implementado las funcionalidades dinámicas de las instalaciones consideradas en el modelo (CCTV, paneles luminosos, barreras, señalética lumínica, …).
- Se ha verificado que el túnel virtual mediante el protocolo de comunicación OPC-UA es una herramienta válida para el testeo y prueba de nuevos sistemas de control, algoritmos y SCADA´s.

4. En cuanto a las pruebas experimentales:

- Se han realizado pruebas experimentales de caracterización aerodinámica en un túnel real y comparado (y ajustado) con las estimaciones del módulo físico desarrollado en Unity 3D.
- Se ha realizado una prueba de incendio real para verificar que la simulación de incendios y movimiento del humo de la plataforma TWINTUN es realista y cumple con el objetivo de formación marcado.

5. En cuanto a la plataforma TWINTUN:

- La conexión a través del protocolo de comunicación OPC UA entre el SCADA TRAFIKOA y la plataforma es continua y en tiempo real.
- Se ha verificado que el lanzamiento de los planes automáticos de emergencia desde el entorno desconectado de TRAFIKOA provoca los cambios en los valores de los nodos del servidor OPC UA y estos son leídos desde TWINTUN. Con ello, dicha secuencia de acciones automáticas tiene un reflejo y acción en las instalaciones afectadas del túnel virtual.

5. REFERENCIAS

[1] Y.Z. Li, H. Ingason. Overview of research on fire safety in underground road and railway tunnels. Tunn. Undergr. Space Technol., 81 (2018), pp. 568-589.

[2] F. Wang, M. Wang, R. Carvel, Y. Wang. Numerical study on fire smoke movement and control in curved road tunnels. Tunn. Undergr. Space Technol., 67 (2017), pp. 1-7.

[3] C. Liu, M. Zhong, S. Song, F. Xia, X. Tian, Y. Yang, Z. Long. Experimental and numerical study on critical ventilation velocity for confining fire smoke in metro connected tunnel. Tunn. Undergr. Space Technol., 97 (2020), p. 103296.

[4] Wang, Q., Kawabata, N. and Ishikawa, T., Evaluation of Critical Velocity Employed to Prevent the Backlayering of Thermal Fume during Tunnel Fires, Proc. of Int. Conf. on ACFD, Oct., (2000), pp. 404-411.

[5] PIARC Committee on Road Tunnel Operations (C3.3), Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels (2007).

[6] D. Yang, L.H. Hu, Y.Q. Jiang, R. Huo, S. Zhu, X.Y. Zhao. Comparison of FDS predictions by different combustion models with measured data for enclosure fires. Fire Saf. J., 45 (5) (2010), pp. 298-313.

[7] K. Van Maele, B. Merci. Application of RANS and LES field simulations to predict the critical ventilation velocity in longitudinally ventilated horizontal tunnels. Fire Saf. J., 43 (8) (2008), pp. 598-609.

THE NAN'AO TRAFFIC CONTROL CENTER: AN OPTIMAL SOLUTION FOR AN INTEGRATION OF TRAFFIC CONTROL AND EMERGENCY RESPONSE MANAGEMENT

Yu-Kuang Lin
CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan (R.O.C)

The Nan'ao Traffic Control Center is located in Nan'ao Township, Yilan County, and serves Eastern Taiwan's critically important Suhua Highway Corridor. Its functions are not limited to traffic control, as it also plays a key role in emergency response management and handling for the Suhua Highway Corridor's multiple long tunnels, which requires an integration of disaster prevention and mitigation requirements into the traffic control center's equipment and facilities operation.

The Center thus features highly integrated traffic control and electromechanical facilities. Moreover, in accordance with the Suhua Highway Improvement Project Emergency Response Plan, the Suhua Highway Emergency Response Joint Prevention System was established, which brings together the police force, the fire brigade, the accident handling team, the specialized fire protection unit, and the Traffic Control Center in the core role of hazard reporting and disposal. By means of continuous drills, assessments and evaluations, education and training courses, the personnel's disaster prevention awareness and familiarity are maximized so as to effectively maintain the safety of the Suhua Highway Corridor.

EL CENTRO DE CONTROL DE TRÁFICO DE NAN'AO: UNA SOLUCIÓN ÓPTIMA PARA LA INTEGRACIÓN DEL CONTROL DEL TRÁFICO Y LA GESTIÓN DE LA RESPUESTA DE EMERGENCIA

El Centro de Control de Tráfico de Nan'ao está ubicado en el pueblo de Nan'ao, condado de Yilan, y sirve con mucha importancia al corredor de la autopista Suhua en el este de Taiwán. Sus funciones no se limitan al control del tráfico, ya que también desempeña un papel clave en la gestión y el manejo de la respuesta a emergencias para los múltiples túneles largos del corredor de la autopista Suhua, la que requiere una integración de la prevención de desastres y los requisitos de mitigación en la operación del equipo y las instalaciones del Centro de Control del Tráfico.

Así, el Centro cuenta con el de control de tráfico y las instalaciones electromecánicas altamente integradas. Además, de acuerdo con el Plan de Respuesta a Emergencias del Proyecto de Mejoramiento de la Carretera de Suhua, se estableció el Sistema de Prevención Conjunta de Respuesta a Emergencias de la Carretera de Suhua, en el que reúne a la policía fuerza policial, la brigada de bomberos, el equipo de manejo de accidentes, la unidad especializada de protección contra incendios, y el Centro está en la función central de notificación y eliminación de peligros. Por medio de los ejercicios continuos, las valoraciones y evaluaciones, los cursos de educación y formación, se maximiza la conciencia y la familiaridad de prevención de desastres del personal para mantener de manera efectiva la seguridad del Corredor de la Autopista Suhua.

LE CENTRE DE CONTRÔLE DU TRAFIC DE NAN'AO : UNE SOLUTION OPTIMALE POUR L'INTÉGRATION DU CONTRÔLE DU TRAFIC ET DE LA GESTION DES INTERVENTIONS D'URGENCE

Le centre de contrôle du trafic de Nan'ao est situé dans le canton de Nan'ao, dans le comté de Yilan, et dessert l'important corridor routier de Suhua, dans l'est de Taïwan. Ses fonctions ne se limitent pas au contrôle du trafic, car il joue également un rôle clé dans la gestion et la gestion des interventions d'urgence pour les multiples longs tunnels du corridor routier de Suhua, ce qui nécessite une intégration des exigences de prévention et d'atténuation des catastrophes dans le fonctionnement des équipements et des installations du centre de contrôle du trafic. .

Le Centre dispose ainsi d'installations électromécaniques et de contrôle de la circulation hautement intégrées. En outre, conformément au plan d'intervention d'urgence du projet d'amélioration de l'autoroute de Suhua, le système de prévention conjoint d'intervention d'urgence de l'autoroute de Suhua a été mis en place, qui regroupe les forces de police, les pompiers, l'équipe de gestion des accidents, l'unité spécialisée de protection contre les incendies et le Centre de contrôle dans le rôle central de signalement des dangers et d'élimination. Au moyen d'exercices, d'évaluations et d'évaluations continus, de cours d'éducation et de formation, la sensibilisation et la familiarité du personnel en matière de prévention des catastrophes sont maximisées afin de maintenir efficacement la sécurité du corridor routier de Suhua.

BACKGROUND INFORMATION

The Nan'ao Traffic Control Center is located in Nan'ao Township, Yilan County, and serves Eastern Taiwan's critically important Suhua Highway Corridor. The Corridor is composed of the Suhua Highway Improvement Section and the existing Suhua Highway, staggered in a parallel and collinear manner, providing a safe way home from Su'ao to Chongde, as shown in Figure 1.

Figure 1 Suhua Highway Corridor in Eastern Taiwan

The Suhua Highway Improvement Project aims to improve the following three disaster-prone sections of Suhua Highway: Section A extending from Su'ao to Dong'ao, Section B stretching Nan'ao to Heping, and Section C running from Hechung to Taichingchui. These sections have a combined total length of 38.8 kilometers, with 8 tunnels (24.6 kilometers), 13 bridges (8.6 kilometers), and a 5.6-kilometer flat roadway. Among the 8 tunnels, 7 are twin-tube one way tunnels, and only the Renshui Tunnel is a single-tube two-way tunnel open to bikes and motorcycles. The basic tunnel information is as shown in Table1, as well as Figures 2-4.

Table 1 Suhua Highway Corridor Tunnel Basic Information

Tunnel Number	Tunnel Name	Length (km)	Section Type
No.1	Su'ao Tunnel	0.25	twin-tube one-way
No.2	Dong'ao Tunnel	3.38	twin-tube one-way
No.3	Dongyue Tunnel	0.22	twin-tube one-way
No.4	Wuta Tunnel	0.46	twin-tube one-way
No.5	Guanyin Tunnel	7.9	twin-tube one-way
No.6	Gufeng Tunnel	4.7	twin-tube one-way
No.7	Zhongren Tunnel	4.8	twin-tube one-way
No.8	Renshuei Tunnel	2.9	single-tube two-way

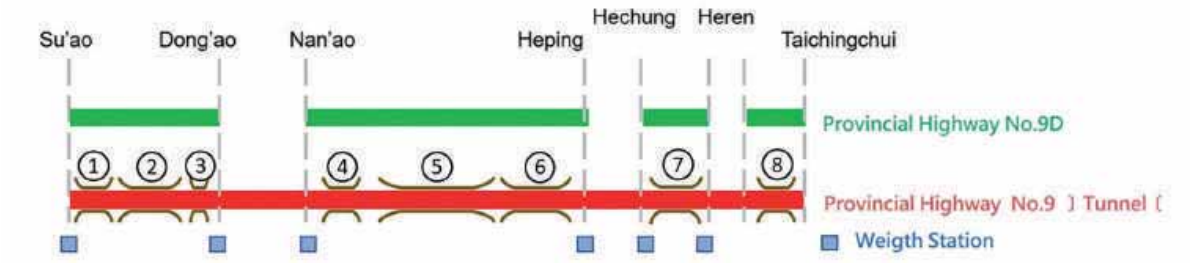


Figure 2: Suhua Highway Corridor Tunnel Configuration

Figure 3: Section View of the Twin-Tube One-Way Tunnel

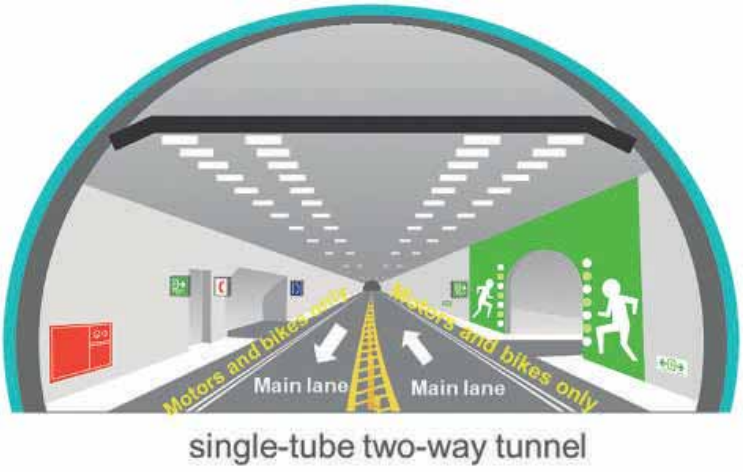


Figure 4: Section View of the Single-Tube Two-Way Tunnel

In February 2018, the section from Su'ao to Dong'ao became the first to officially open to traffic, and by January 2021 all three sections were opened to passenger vehicles, buses and non-regulated trucks. In addition to the improved sections, the original road continues to pass through the section from Dong'ao to Nan'ao and the section from Heping to Hechung. After the Suhua Highway improved sections were opened to traffic, the original Provincial Highway No. 9 was renamed Provincial Highway No. 9D, and became partially co-lined with the new Provincial Highway No. 9.

Since the Suhua Highway Corridor is staggered in a parallel and collinear manner and includes multiple tunnel groups, the primary task of the Nan'ao Traffic Control Center is to establish a complete road tunnel safety protection architecture, including the necessary engineering facilities and structures, E&M and traffic control equipment, and operation management procedures. The facilities allow for a 10-minute safe escape route; the tunnel equipment ensures a 10-minute safe escape environment; and the operation management comprises emergency response and disaster relief support to avoid potential deteriorations of the emergency situation. The architecture is shown schematically in Figure 5 and Figure 6.

Figure 5: Road Tunnel Safety Protection Architecture

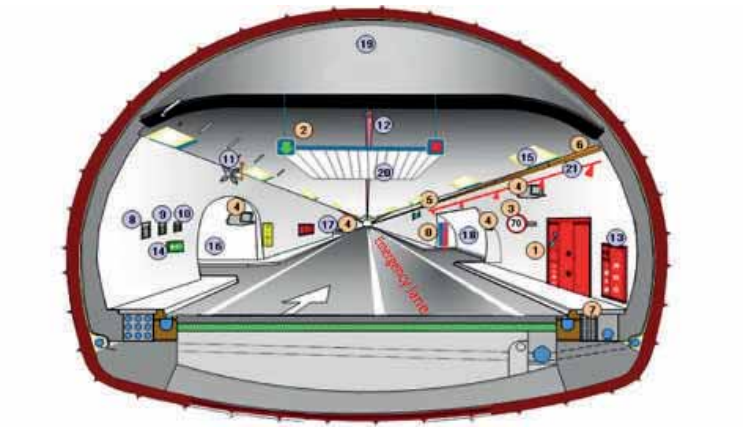


Figure 6: Sectional Drawing of Safety Facilities in the Tunnel

Traffic control facilities:

0 Changeable Message Sign	1 Emergency Telephone, every 175 meters
2 Lane Control Signal	3 Changeable Speed Limit Sign
4 Closed-Circuit Television	5 Broadcasting Speaker
6 Radio Leaky Wave Cable	7 Traffic Control Facility Pipeline

Electrical and Mechanical facilities:

8 CO Detector	9 NOx Detector
10 Smoke Detector	11 Wind Speed and Direction Detector
12 Fire Detector	13 Fire Hydrant Box with Fire Extinguisher, every 50 meters
14 Escape Guide Sign	15 Lighting Fixtures
16 Vehicle and Pedestrian Evacuation Communication Channel, every 1400 meters	
17 Pedestrian Evacuation Communication Channel, every 350 meters	
18 Emergency Parking Area	19 Exhaust Piping
20 Ventilation Outlet	21 Water Mist Equipment

ORGANIZATION AND THE ROLE OF THE NAN'AO TRAFFIC CONTROL CENTER

The Nan'ao Traffic Control Center functions under the jurisdiction of the Jinyue Branch, Directorate General of Highways of Taiwan's Ministry of Transportation and Communications (MOTC). Its organizational structure is differentiated to be able to work under "normal operational conditions" and "emergency conditions", details of which are shown in Figure 7 and Figure 8.

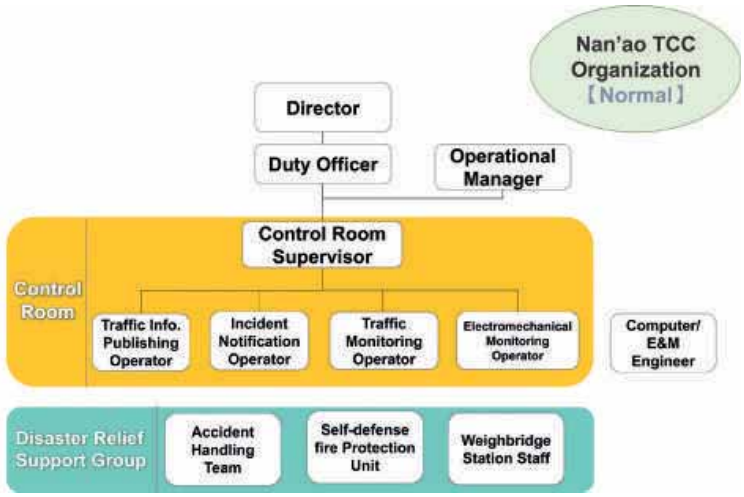


Figure 7: Organization of the Nan'ao TCC in Normal Operational Conditions

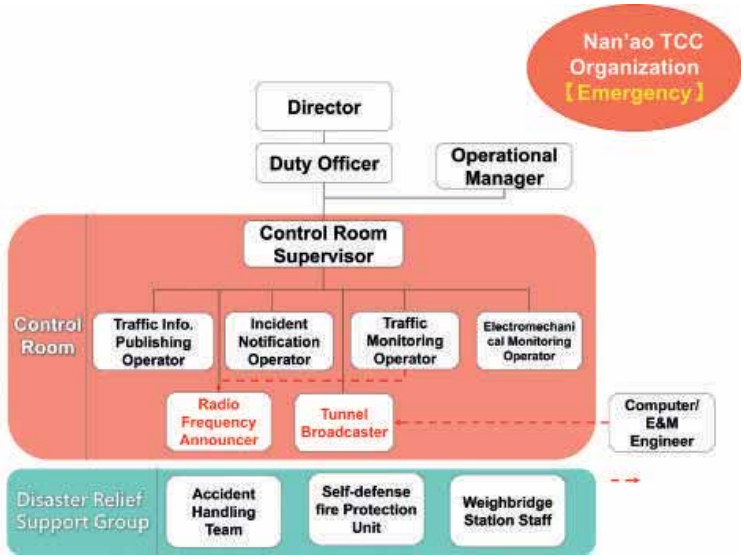


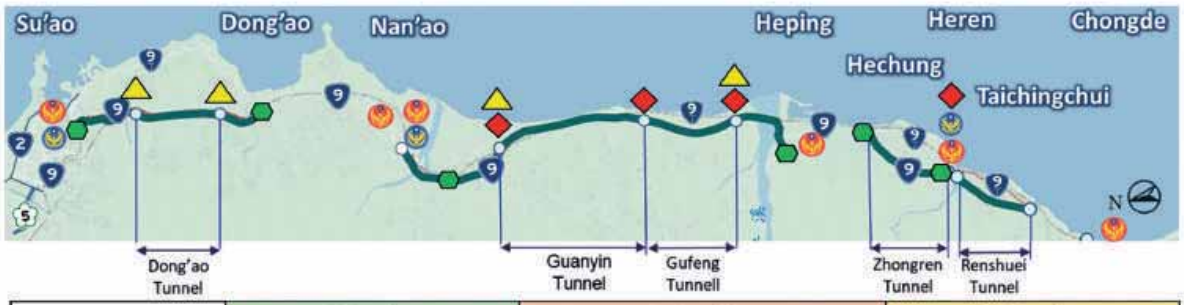
Figure 8: Organization of the Nan'ao TCC in Emergency Conditions

Under such configuration, the traffic control room serves as the core of operations monitoring traffic conditions 24 hours a day, 7 days a week, performing traffic control and traffic information release in response to changes in the traffic flow. Under normal operational conditions, the personnel in the traffic control room includes the supervisor, the traffic information publishing operator, the incident notification operator, the traffic monitoring operator, and the electromechanical monitoring operator, each of which have their own designated tasks and duties.

In addition, the traffic control center has a very important role in the event an emergency occurs: it must implement the most immediate notification procedures to the relevant authorities and traffic management strategies to reduce and mitigate the impact of disasters or accidents. Personnel from the accident handling teams and specialized firefighting units are stationed at the entrances of both ends of the tunnel. If a disaster or an accident occurs, they can reach the actual site as quickly as possible to perform all the necessary rescue and response actions.

To maximize efficiency and timeliness of the response activities, the tasks and duties of some of the personnel in the traffic control center are changed from the normal operational mode to the emergency mode in the event of an emergency. Following completion of the incident notification to the relevant government agencies, the traffic monitoring operator becomes the radio frequency announcer, and the incident operator supplements for traffic monitoring tasks. At the same time, the electromechanical/computer engineer is stationed in the traffic control room as a tunnel broadcaster, and continues to provide evacuation guidance, personnel reassurance, and disaster handling notifications in the tunnel.

When an incident occurs, the operation management unit sets up an emergency response team based on the incident's severity, and at the same time contacts the joint disaster relief unit to perform the relevant emergency response coordination, incident relief support dispatch, traffic control, and injured persons rescue actions. The location of each associated unit's station is shown in Figure 9.



Classification	A Section				B Section					C Section			
	Su'ao Weigh Station	Dong'ao Tunnel		Dong'ao Weigh Station	Nan'ao Weigh Station	Guanyin-Gufeng Tunnel			Heping Weigh Station	Hechung Weigh Station	Zhongren Tunnel		Heren Weigh Station
		North Entrance	South Entrance			North Entrance	Middle Station	South Entrance			North Entrance	South Entrance	
Specialized firefighting crews	--	--	--	--	--	V	V	V	--	--	V	--	--
Accident handling teams	--	V	V	--	--	V	--	V	--	--	--	--	--
Weigh Station staffs	V	--	--	V	V	--	--	--	V	V	--	V	--

Classification	Su'ao	Nan'ao	Heping	Heren	Chongde
Fire Brigade	Su'ao District	① Guanyin Dedicated ② Nan'ao District	Heping District	Heren Dedicated	Xinxiu District
Police Unit	Su'ao Squad	Nan'ao Squad		Heren Dedicated	

Figure 9 Location of each associated defense unit's station

Moreover, in accordance with the Suhua Highway Improvement Project Emergency Response Plan, the Suhua Highway Emergency Response Joint Prevention System was established, which brings together the police force, the fire brigade, the accident handling team, the specialized fire protection unit, and the Traffic Contol Center in the core role of hazard reporting and disposal. In order to integrate functions of multi-unit joint disaster prevention and relief system, after continuous drills, reviews and improvements, a seven-stage emergency response standard operating procedure was formulated, as demonstrated in Figure 10.

Figure 10: Seven-Stage Emergency Response Standard Operating Procedure

KEY DISASTER PREVENTION AND MITIGATION STRATEGIES

The Suhua Highway Improvement Project comprises, in addition to at-grade sections, elevated (viaduct) sections and multiple tunnel groups. When disasters occur, roads are often blocked and disaster relief becomes rather difficult. Therefore, in order to reduce the impact of accidents or disasters, the Nan'ao Traffic Control Center has developed several prevention and disaster mitigation measures, elaborated as follows:

Large truck management

Vehicles driving on the Suhua Highway's improved sections include passenger cars, buses, large trucks and heavy motorcycles (currently in the trial phase). The Renshuei Tunnel is the only tunnel open to motorcycles in addition to other types of vehicles, and is thus prone to heavier traffic particularly during consecutive holidays, with the vehicle type management system allowing to reduce damage in the event of accidents, where large trucks, by their very nature, tend to cause most severe damage of all types of vehicles. Therefore, the tunnel operator employs a strategy prohibiting large trucks from passing during peak traffic periods and holidays so as to reduce the potential severity of accidents.

There are 6 weighbridge stations in the Suhua Highway improved sections which serve all the entering large trucks. There are two main management strategies for doing this. First one is the load-and-scale management. Large trucks are large in size and heavy by weight. Excessive scale can damage the road pavement, facilities and other vehicles; secondly, there are ramp metering signals setting before the weighbridge station merges into the main line. The use of ramp metering signals can effectively separate the distance between

trucks and other vehicles. In addition, on the Suhua Highway improved sections, large trucks are required to maintain a safe distance of 100 meters from the vehicle in front to ensure driving safety. The above-mentioned large truck management strategy is shown in Figure 11.

Figure 11: Large Truck Management Strategy

Traffic volume control

The Suhua Highway improved sections feature a main (left lane) and an emergency lane (right lane). The emergency lane is only used by emergency vehicles for disaster relief and rescue purposes, and general vehicles can only drive on the left lane. Based on such traffic restrictions, the capacity of the Suhua Highway improved sections can only accommodate about 1,000 vehicles per hour. Therefore, Nan'ao Traffic Control Center has set a control target of 1,000 vehicles per hour for traffic flow and a threshold value for the length of congestion and blocking of important nodes as the basis for the activation of the traffic signal control strategy. This strategy includes a long-cycle length from 180 to 210 seconds, and a short-cycle length from 70 to 120 seconds. When the traffic flow is within the control target value, the long-cycle length strategy is adopted, and the short-cycle length strategy is activated when the threshold is reached. After many consecutive holidays, the above strategy can always reach the target of 1000 vehicles/hour during peak hours. When the traffic volume control strategy is implemented, the travel time saving can reach about 60 minute, as shown in Figure 12.

Figure 12 Traffic Volume control strategy

Post completion construction and maintenance notification management

The construction and maintenance works for the Suhua Highway improvement sections which are required after the completion of the main project involve various types of measures – those related to civil engineering, electrical and mechanical and traffic control equipment. Considering the significant difference in the construction of the Suhua Highway improvement sections and Taiwan's general provincial roads, the responsible unit of the Directorate General of Highways formulated the construction notification management process for the construction contractors participating in the Project. This process aims to allow the Nan'ao Traffic Control Center to more efficiently manage the scope and time of the construction activities, entry and exit of people and vehicles, and ensure the general safety on the vehicles and personnel. Post completion construction and maintenance activities include traffic engineering, pavement cleaning, tunnel cleaning, pavement

repair, road planting, maintenance of mechanical and electrical equipment, maintenance of traffic control equipment, installation of new and relocation of existing equipment, etc. The construction notification method includes three different modes applicable for various circumstances: the general construction mode, the project construction mode, and the emergency construction mode. Additionally, based on the construction site location and whether it is in a moving range (e.g., pavement cleaning operations), the works are divided into fixed or mobile types, as shown in Figure 13.

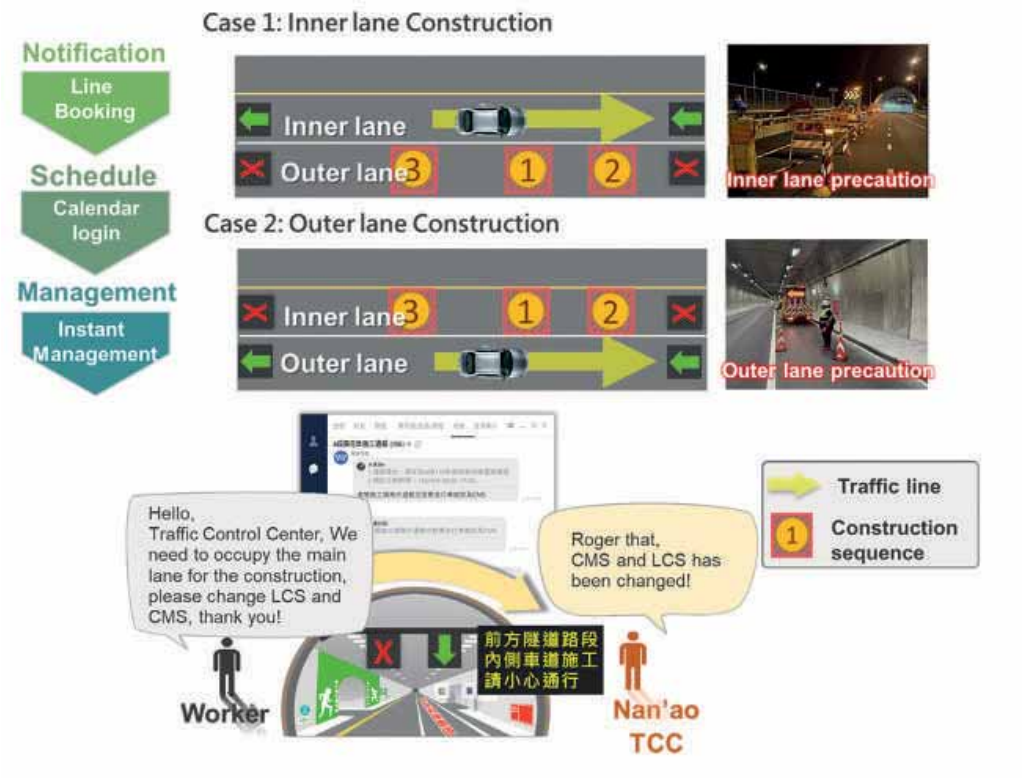


Figure 13 Nan'ao Traffic Control Center Construction Notification Management Type

Strengthen infrastructure availability and personnel capabilities

In accordance with the "Regulations on Emergency Response Supervision and Evaluation of Highway Tunnels" formulated by the Directorate General of Highways, MOTC, in order to ensure that the tunnel disaster prevention and relief response personnel and various joint defense units accept and become proficient in the notification mechanism and the relevant processes, and to ensure that the communication equipment can function as expected, all personnel involved in the work need to be well trained and qualified. To bolster the familiarity with emergency operations and maintaining the safety of the passers-by, a three-level management mechanism has been established. It includes the first level of the branch self-management, the second level of the maintenance office audit management, and the third level of general bureau supervision assessment. In addition, in order to maintain the familiarity of the personnel with the 7-stage disaster prevention and response process, the Nan'ao Traffic Control Center implements autonomous daily drills, regular monthly notification drills, routine quarterly drills , and project drills every year, as shown in Figure 14.

Frequency of drills in 2021

Type / Month	Notification	Routine	Project	Date
	Monthly	Seasonally	Yearly	
Jan			V	01.14
Feb	V			02.25
Mar		V		03.25
Apr	V			04.28
May	V	V		05.20 05.27
Jun	V	V		06.24 06.30
Jul	V			07.22
Aug		V		08.25
Sep	V			09.29
Oct	V			10.28
Nov		V		11.25
Dec	V			12.23

Figure 14 Frequency of drills in 2021

CONCLUSION

The upgraded sections of Suhua Highway Improvement Project replace the original highway sections which featured difficult, winding and dangerous disaster-prone alignment with long tunnels. The improved sections not only provide direct and convenient transportation, but also a safe road for people returning home and a better environment for businesses in the east of Taiwan. Among the challenges of this project are some of the longest tunnel groups in Taiwan, complex vehicle composition with small cars, large buses, large and heavy trucks (whose proportion is particularly high at 15% to 20%). Added to this are the peculiarities of the local transportation patterns, whereby traffic pressures become multiples of normal times during long holidays. All these issues need to be at the forefront of Nan'ao Traffic Control Center's planning and operational philosophy. Currently, the disaster prevention and response management capabilities of the Suhua Highway Corridor are constantly improving to take into account better safety and service efficiency, integrate traffic control, equipment management and disaster response.

It has been over four years since the Suhua Highway improved sections were opened to traffic. Fortunately, no major accidents have occurred in the tunnel due to large truck management, safe vehicle distance regulations, and efficient congestion management measures. The incidents that have occurred in the tunnel on the Suhua Highway improved sections are mainly faulty vehicles, accidental entry by pedestrians and vehicle speeding. It is obvious that the local public is still somewhat unfamiliar with the road conditions of the new tunnel, and the awareness of vehicle safety inspection and compliance with laws and regulations before driving on the road is still lacking. The driving behavior of passers-by is a potential factor for traffic accidents. The scale of disasters and casualties may be much larger than those of ordinary road sections. Therefore, education campaigns for passers-by need to be continuously implemented, with driving safety promotions whereby the passers-by participate in the drills. It is hoped that the concept of disaster prevention and safety can be deeply rooted in the people's minds through more interesting and eye-catching ways.

The next stage of the Suhua Highway Safety Improvement Project is expected to be completed in 2030, with a total length of 31 kilometers. At that time, all sections from Su'ao to Chongde will be upgraded to a direct route consisting of viaducts and tunnels, connecting all townships along the route with ramps, leading to

great improvements in the speed and convenience for road users. The new route includes long tunnels such as the Nan'ao Tunnel (5km) and the Chongde Tunnel (10km). The length of the tunnels on the improved sections of Suhua Highway will increase by 1.6 times compared with the current length. At that time, the traffic control center of Nan'ao can be expected to face new challenges.

With difficult tasks laying ahead, all parties involved in this massive project need to keep engaging in constant drills and assessments to ensure that they are up to the future challenges. The accident handling teams and specialized fire brigades need to constantly adjust their operating methods in response to the location of new tunnels and the disaster relief capabilities of the surrounding police and fire departments. Accumulating new experience through drills and relevant analysis, as well as through compilation of event data and formulating all necessary contingency plans and SOPs, will allow us to keep making the Suhua Highway safer and more efficient for the public.

PIARC
2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROAD TUNNEL OPERATIONS AND SAFETY
&
VIII SPANISH TUNNELS SYMPOSIUM

FIFTH SESSION:

Operation and sustainable management of tunnels (II)

Topic: "Risk Analysis"

PROPUESTA DE ACTUALIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGO EN TÚNELES DE LA RED DE CARRETERAS DEL ESTADO DE ESPAÑA (MARTE)

Guillermo Llopis Serrano
Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda UrbanaT

La Metodología de Análisis de Riesgo en Túneles de la red de carreteras del Estado de España, más conocida por su acrónimo MARTE, fue aprobada por la Autoridad Administrativa de estos túneles en mayo de 2012.

Esta metodología contempla dos métodos de análisis de riesgo diferentes: el Método General y el de Mercancías Peligrosas. Este último basado en el Modelo de Evaluación Cuantitativa de Riesgos de Mercancías Peligrosas o DG QRAM, desarrollado por la OCDE y PIARC entre 1997 y 2001, que está en proceso de actualización y mejora.

Desde la aprobación de la MARTE, se han realizado infinidad de análisis de riesgo en túneles, tanto en fase de proyecto, construcción, como en explotación, siendo lógicamente esta última la fase de los túneles en la que mayor cantidad de análisis de riesgo se han llevado a cabo.

Transcurrida una década de su aprobación, en el seno del Comité de Túneles de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC) se ha formado un grupo de trabajo en el presente ciclo 2020-2023 que tiene por objeto la revisión de la metodología, así como la propuesta de actualización, introduciendo justificadamente las correcciones y modificaciones que la experiencia acumulada en su aplicación ha puesto de manifiesto como necesarias.

En este artículo, tras recodar los antecedentes, estructura y características de la MARTE, se desarrollan las principales propuestas de actualización de la misma, resultantes de la revisión de la metodología realizada por el citado grupo de trabajo del Comité de Túneles español.

PROPOSAL FOR UPDATING THE METHODOLOGY FOR RISK ANALYSIS IN TUNNELS OF THE SPANISH STATE ROAD NETWORK (MARTE)

The tunnel risk assessment methodology of the Spanish state road network, better known by its acronym in Spanish MARTE, was approved by the Administrative Authority of these tunnels in May 2012.

This methodology considers two different risk analysis methods: the General Method and the Dangerous Goods Method. The latter is based on the Quantitative Risk Assessment Model for Dangerous Goods or DG QRAM, developed by the OECD and PIARC between 1997 and 2001, which is in an updating and improving process.

Since the approval of MARTE, countless risk assessments have been carried out on tunnels, in the project phase, construction, and in operation, the latter being logically the tunnel phase in which the greatest number of risk assessments have been carried out.

A decade after its approval, within the Tunnels Committee of PIARC in Spain (ATC), a working group has been created in the current 2020-2023 cycle whose purpose is to review the methodology, as well as to propose an update, justifiably introducing the corrections and modifications that the experience accumulated in its application has revealed as necessary.

In this article, after reviewing the background, structure and characteristics of MARTE, the main proposals for updating it are developed, resulting from the review of the methodology carried out by the aforementioned working group of the Spanish Tunnels Committee.

PROPOSITION DE MISE À JOUR DE LA MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DES RISQUES DANS LES TUNNELS DU RÉSEAU ROUTIER DE L'ÉTAT ESPAGNOL (MARTE)

La méthodologie d'analyse des risques des tunnels du réseau routier national espagnol, plus connue sous son acronyme MARTE, a été approuvée par l'autorité administrative de ces tunnels en mai 2012.

Cette méthodologie envisage deux méthodes différentes d'analyse des risques : la Méthode Générale et la Méthode des Marchandises Dangereuses. Cette dernière est basée sur le modèle d'évaluation quantitative des risques pour les marchandises dangereuses ou DG QRAM, développé par l'OCDE et l'AIPCR entre 1997 et 2001, qui est en cours d'actualisation et amélioration.

Depuis l'approbation de MARTE d'innombrables analyses des risques ont été réalisées dans les tunnels aussi bien en phase de projet, de construction qu'en exploitation, cette dernière, étant logiquement la phase tunnel dans laquelle le plus nombre d'analyses de risques a été menée à bien.

Après une décennie d'application, au sein du Comité des Tunnels de l'AIPCR en Espagne (ATC), un groupe de travail a été formé dans le cycle actuel 2020-2023 dont le but est de revoir la méthodologie, ainsi que la proposition de mise à jour, en introduisant à juste titre les corrections et des modifications que l'expérience accumulée dans son application a révélées nécessaires.

Dans cet article, après avoir passé en revue le contexte, la structure et les caractéristiques de MARTE, sont développées les principales propositions de mise à jour de celle-ci, issues de la révision de la méthodologie effectuée par le groupe de travail susmentionné du Comité des Tunnels espagnol.

1. LA MARTE

1.1. Aprobación

Para llevar a cabo el análisis de riesgo de un túnel es necesario seguir una metodología que defina tanto el procedimiento de cálculo del riesgo, como los criterios que permitan determinar si éste es o no aceptable. Por ello, la Directiva 2004/54/CE, de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras, establece que los Estados miembros deben garantizar que los análisis de riesgo en túneles de cada país se llevan a cabo siguiendo una metodología detallada y bien definida, así como informar a la Comisión Europea de la metodología aplicada, en un plazo de 5 años desde la entrada en vigor de la directiva.

En cumplimiento de la directiva, aunque con algo de retraso sobre el plazo fijado, en mayo de 2012 la Autoridad Administrativa de los túneles de carreteras del Estado en España aprobó la Metodología de Análisis de Riesgo en Túneles de la red de carreteras del Estado, más conocida por su acrónimo MARTE.

1.2. Métodos de análisis de riesgo

La MARTE es de obligado cumplimiento en todos los análisis de riesgo llevados a cabo en los túneles pertenecientes a la Red de Carreteras del Estado. Además, a falta de una metodología propia, también se ha aplicado para análisis de riesgo de túneles de otras Administraciones autonómicas y locales españolas.

La metodología se compone a su vez de dos métodos de análisis de riesgo en túneles de carretera, el Método General y el Método de Mercancías Peligrosas.

1.2.1. Método General

El Método General, como su propio nombre indica, será el que se aplique con carácter general en la realización de análisis de riesgo en túneles. Este método tiene por objeto definir una herramienta que permita llevar a cabo el análisis de riesgo de un túnel cuando concurra alguna de las circunstancias previstas en la normativa, con la excepción de aquellas relacionadas con la circulación de vehículos de transporte de mercancías peligrosas.

El Método General se basa en la comparación del túnel objeto de estudio con un túnel de referencia, denominado túnel virtual. El análisis de riesgo está enfocado a analizar el nivel de riesgo de un túnel ante una serie de escenarios de incendio predeterminados, al considerar que son estas situaciones las que entrañan un mayor riesgo para los usuarios.

Para determinar el riesgo del túnel analizado se deben realizar unos cálculos paralelos comparando, las potenciales consecuencias que los escenarios de incendio considerados tendrían sobre los usuarios del túnel real, que es el túnel objeto de estudio, con las consecuencias que tendrían esos mismos escenarios en el túnel virtual.

El túnel virtual tiene el equipamiento que establece el Real Decreto 635/2006 en función del tipo de túnel (longitud, tráfico...). Por lo que, el túnel virtual tiene unas características de diseño y unas medidas de seguridad que se consideran adecuadas o de referencia, de acuerdo con lo dispuesto en la reglamentación aplicable al respecto.

El Método General de análisis de riesgo en túneles se basa, a su vez, en la integración de tres modelos, cada uno de los cuales trata de reproducir un determinado aspecto del riesgo del túnel, para llegar finalmente a cuantificar el riesgo en el túnel analizado. Estos modelos son:

- Modelo de riesgo del túnel. Trata de reproducir el riesgo de accidente que da lugar a un escenario de incendio en el túnel analizado en función de sus características de diseño, equipamientos y explotación. Para ello, se contemplan una serie de escenarios de accidente, todos ellos desencadenantes de incendios en el interior del tubo, y se parametrizan mediante una serie de factores todas las características del túnel.
- Modelo de ventilación. Tiene por objeto simular el comportamiento de los humos producidos por un incendio en el interior del túnel en función de la ventilación, natural o artificial, disponible.
- Modelo de comportamiento de los usuarios. Persigue reproducir el comportamiento de los usuarios durante la evacuación del túnel por sus propios medios, o auto-evacuación, una vez que se ha producido un accidente que da lugar a un incendio.

1.2.2. Método de Mercancías Peligrosas

El segundo método de análisis de riesgo que se propone en la MARTE tiene por objeto estudiar y evaluar el posible paso de mercancías peligrosas por el interior del túnel, por ello se ha denominado Método de Mercancías Peligrosas.

El método se basa en el empleo del modelo DG QRAM ("*Dangerous Goods Quantitative Risk Assessment Model*" – Modelo Cuantitativo de Evaluación del Riesgo de Mercancías Peligrosas), desarrollado por la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) y la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC).

Previamente a la aplicación del modelo se deben determinar una serie de parámetros que tienen en cuenta la accidentabilidad y medidas de seguridad disponibles en el túnel. Los resultados del cálculo se representan en un diagrama F/N, en el que:

- El eje de ordenadas F(n), representa la frecuencia anual de ocurrencia de accidentes con n víctimas
- El eje de abscisas N, representa el número de víctimas

Estos resultados se comparan con los criterios de aceptación que son unas rectas límite representadas sobre este mismo diagrama.

2. REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE LA MARTE

En los diez años de aplicación de la MARTE se han detectado multitud de puntos susceptibles de mejora, bien por tratarse simplemente de erratas; porque el texto no es lo suficientemente claro, dando lugar a diferentes interpretaciones de los analistas; bien porque es deseable completar la definición de los parámetros contemplados en los modelos, consiguiendo así una mayor homogeneización de los análisis; bien porque la modelización contemplada en la MARTE puede ser mejorada con las herramientas disponibles hoy en día; o bien porque los modelos no contemplan en el cálculo alguna situación con una considerable relevancia, como la congestión.

Esto ha dado lugar a que, en el seno del Comité de Túneles de la ATC se haya propuesto para el presente ciclo 2020-2023 la creación de un grupo de trabajo para la revisión y propuesta de mejora de la Metodología de Análisis de Riesgo en Túneles de la red de carreteras del Estado.

El grupo de trabajo se centró en el Método General de la MARTE, puesto que el Método de Mercancías Peligrosas de la MARTE, al estar basado en el modelo DG QRAM desarrollado por la OCDE y PIARC, ya está siendo actualizado y mejorado por PIARC.

El contenido de la metodología a revisar se dividió en 7 subgrupos de trabajo:

- Subgrupo 1: debía abordar los apartados 1. Marco normativo, 2. Definición y tipología de análisis de riesgo, 3. Determinación del método a aplicar y 4.4. Criterios de aceptación de la MARTE.
- Subgrupo 2: le correspondía la definición de los escenarios y el posicionamiento del incendio (4 a 4.1.1)
- Subgrupo 3: la determinación de los coeficientes de riesgo del túnel virtual y real, así como del índice de riesgo (4.1.2, 4.1.2.1, 4.1.2.2 y 4.1.2.4)
- Subgrupo 4: el factor corrector del coeficiente de riesgo (4.1.2.3)
- Subgrupo 5: el modelo tabulado de ventilación (4.2 a 4.2.1)
- Subgrupo 6: el modelo unidimensional de ventilación (4.2.2)
- Subgrupo 7: El modelo de comportamiento de los usuarios (4.3)

En este grupo de trabajo han participado activamente, integrándose en uno o más de los anteriores subgrupos de trabajo, las siguientes personas:

- Alberto Cuadrado
- Arturo Muñiz
- Carlos del Álamo
- Guillermo Llopis (líder del grupo de trabajo y coordinador del subgrupo 1)
- Ignacio del Rey (coordinador de los subgrupos 5 y 6)
- José Ramón Ochoa (coordinador del subgrupo 4)
- Juan Manuel Sanz (coordinador del subgrupo 2)
- Justo Suárez
- Lucía Ruiz (coordinadora del subgrupo 3)
- Luis Gil
- Luis Javier Díaz
- Mar Martínez
- Rafael López
- Rafael Sánchez (coordinador del subgrupo 7)
- Raquel Campo
- Sergio Patón

Entre septiembre de 2020 y junio de 2022 (fecha de finalización del presente artículo) se han celebrado 26 reuniones del grupo de trabajo, con una participación media de cerca de 12 miembros. Por lo que, está siendo un grupo de trabajo muy activo, en el que se ha desarrollado un enorme esfuerzo para recoger en un documento la propuesta conjunta de actualización de la vigente Metodología de Análisis de Riesgo en Túneles de carreteras del Estado.

3. PROPUESTA DE MEJORA

A continuación, se van a repasar, siguiendo el índice de la metodología, las principales propuestas de actualización formuladas por el grupo de trabajo, especificando para una cuál es el problema que tratan de solventar:

• DENOMINACIÓN DE LA METODOLOGÍA

A la Metodología de Análisis de Riesgo en Túneles de la red de carreteras del Estado, se la denomina habitualmente por su acrónimo MARTE, pese a no ser este su nombre oficial. Esta denominación de la metodología se remonta al año 2015, concretamente a la ponencia titulada "*Aplicación del análisis de riesgo como herramienta de ayuda a la toma de decisiones relativas a la seguridad en túneles de carretera*" que tuve presenté en el VI Simposio de Túneles, celebrado en Zaragoza. Por ello, es de justicia que, tal como realiza la Real Academia Española al incorporar nuevas palabras al diccionario debido a su extendido uso, se introduzca también el nombre de MARTE como denominación oficial de la misma en el texto de la metodología, junto a su nombre completo.

1. MARCO NORMATIVO

• AUTOR DEL ANÁLISIS DE RIESGO

En relación con quién debe o puede realizar el análisis de riesgo de un túnel, cuando sea necesario, el artículo 11.2 del R.D. 635/2006 establece que: "*Los análisis de riesgo serán realizados, cuando resulten necesarios, por un organismo funcionalmente independiente del gestor del túnel. El contenido y los resultados de los análisis de riesgo se incluirán en el manual de explotación…*".

Por otro lado, la MARTE dice que: *"De acuerdo con lo establecido en el Real Decreto 635/2006, el gestor del túnel debe mantener actualizado el manual de explotación y, por lo tanto, será el encargado de elaborar y actualizar el estudio de análisis de riesgo incluido en dicho documento.".*

Al establecer el R.D. 635/2006 que todos los análisis de riesgo se deben incluir en el manual de explotación correspondiente, la MARTE interpreta que esto implica que le corresponde al gestor del túnel la elaboración y actualización de estos análisis. Sin embargo, esto entra en contradicción directa con lo establecido en el real decreto de que los análisis de riesgo se deben realizar por un organismo funcionalmente independiente del gestor del túnel.

Por ello, se propone eliminar de la MARTE el citado párrafo que es contrario a lo establecido en el R.D. 635/2006.

• NIVEL DE SEGURIDAD EQUIVALENTE

El artículo 14.1 del R.D. 635/2006 establece, con respecto al procedimiento de solicitud de excepción, que el gestor del túnel deberá solicitar autorización de la autoridad administrativa justificando debidamente, entre otros, el siguiente extremo: "*Las medidas de reducción de riesgo alternativas que vayan a adoptarse o a reforzarse con objeto de garantizar al menos un nivel equivalente de seguridad, incluida su comprobación mediante el correspondiente análisis de riesgo.*".

Asimismo, en el 14.2 se dice, con respecto a los túneles no ubicados en la red transeuropea de carreteras, que: *"La solicitud se acompañará de un estudio de análisis de riesgo en el que se deberán justificar las razones que motivan la excepción, las medidas alternativas propuestas y el mantenimiento de niveles de seguridad en el túnel análogos a los que se obtendrían de no aplicarse la excepción.".*

Sin embargo, no se aclara en el real decreto, ni en su normativa de desarrollo, como es la Resolución por la que se aprueba la MARTE, qué debe entenderse por un nivel de seguridad equivalente o análogo. Podría interpretarse que, para obtener un nivel de seguridad equivalente, los índices de riesgo resultantes de realizar un análisis de riesgo con las medidas de seguridad prescritas por la normativa y con las medidas propuestas en la solicitud de excepción, deben ser iguales. O bien considerar que para tener un nivel de seguridad análogo es suficiente con que la calificación del túnel resultante de los análisis de riesgo (túnel seguro, túnel con posibles restricciones o túnel con peligrosidad elevada) sea la misma.

Se propone aclarar este concepto, entendiendo que lo más correcto es la opción de considerar que hay un nivel de seguridad equivalente, cuando el túnel obtenga la misma calificación con cada uno de los análisis de riesgo cuyas medidas de seguridad se desea comparar. La calificación del túnel es el resultado último del análisis de riesgo, siendo todos los demás valores obtenidos en el cálculo del riesgo pasos intermedios hasta la determinación de la calificación del túnel. Por lo que, se entiende que la equivalencia o analogía entre niveles de seguridad se debe establecer con respecto a este resultado final de análisis de riesgo.

Además, se propone incluir una nueva calificación para los túneles en los criterios de aceptación, para diferenciar los túneles con un nivel de seguridad, de acuerdo con análisis de riesgo, mayor que el del túnel virtual correspondiente.

Esta propuesta se detalla en el punto 4.4 de este artículo, correspondiente a los criterios de aceptación del Método General de la metodología.

• CARRIL DE EMERGENCIA

La versión española de la Directiva 2004/54/CE, traducida de la versión original en inglés, hace referencia en diversas ocasiones al término "carril de emergencia".

En el punto 2.1 del anexo I, relativo al número de tubos y carriles, se establece lo siguiente:

"2.1.3 Con excepción del carril de emergencia, se mantendrá el mismo número de carriles, tanto dentro como fuera del túnel."

Por otro lado, en el punto 2.4 del anexo I, relativo a las aceras, se dice que:

"2.4.1 En los túneles nuevos sin carril de emergencia, se habilitarán aceras, preferentemente elevadas, para que los usuarios del túnel las empleen en caso de avería o accidente. Esto no será de aplicación cuando las características de la construcción del túnel no lo permitan o sólo lo permitan con costes desproporcionados y cuando el túnel sea unidireccional y disponga de vigilancia permanente y de sistema de cierre de los carriles.

2.4.2 En los túneles ya existentes que no tengan ni carril de emergencia ni acera, se tomarán medidas adicionales o reforzadas para proporcionar seguridad."

Ni en la legislación, ni en la normativa españolas sobre la materia se incluye el término "carril de emergencia", ni se utiliza dicho término en las principales publicaciones sobre ingeniería de carreteras. Por lo que, se considera que no es la mejor traducción del mismo.

Consultando en Wikipedia, descubrimos a qué hace referencia el "emergency lane" que recoge la Directiva 2004/54/CE:

A shoulder, hard shoulder or breakdown lane [1], is an emergency stopping lane by the verge of a road or motorway, on the right side in countries which drive on the right, and on the left side in countries which drive on the left.

[1] Cambridge English Dictionary

De acuerdo con esto, la traducción más correcta de "emergency lane" sería la de arcén, siempre que este arcén tenga un ancho mínimo suficiente como para que un vehículo pueda circular por él.

La norma 3.1 IC de trazado, aprobada por Orden FOM/273/2016, de 19 de febrero, establece que la anchura mínima de los carriles de circulación de carreteras estatales es de 3 m, en el caso de vías con velocidad de proyecto de 40 o 50 km/h. Sin embargo, en el caso de una emergencia se podría considerar que la velocidad de circulación será considerablemente menor, por lo que cabría considerar una anchura menor.

Por otro lado, el Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Vehículos, establece que, como regla general, la anchura máxima autorizada a los vehículos para poder circular, incluida la carga, es de 2,55 m.

Además, se debe considerar que el apartado 2.7.3 del anexo I del real decreto dice, con respecto a los apartaderos, lo siguiente: "*En los restantes túneles en los que sea requisito la disposición de apartaderos, de acuerdo con el apartado 2.21, cuando las características de la construcción del túnel no lo permitan o sólo lo permitan con costes desproporcionados, no será preciso habilitar apartaderos si la anchura total del túnel accesible para los vehículos, excluyendo las partes elevadas y los carriles normales de circulación, sea al menos igual a la anchura normal de un carril.*".

Puesto que la anchura de arcén máxima establecida en la norma 3.1 IC de trazado es de 2,5 m, que prácticamente coincide con la anchura máxima de vehículos, se propone considerar 2,5 m el ancho mínimo del arcén derecho para que pueda considerarse que se dispone del carril de emergencia al que hace referencia el R.D. 635/2006. Pero puesto que la anchura máxima de los vehículos es ligeramente superior y por analogía con lo establecido en el apartado 2.7.3 citado, se deberá también disponer de un arcén izquierdo de al menos 1 m de anchura.

Para ello se propone introducir el siguiente párrafo en la MARTE:

"Se considerará que un túnel dispone de carril de emergencia cuando el arcén derecho tenga al menos una anchura de 2,5 m, siempre que el arcén izquierdo tenga al menos 1 m de anchura. En túneles bidireccionales se considerará cada sentido, pudiendo disponer de carril de emergencia en un sentido, en ambos o en ninguno."

2. DEFINICIÓN Y TIPOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGO

• APROBACIÓN DE LOS ANÁLISIS DE RIESGO:

El R.D. 635/2006 no recoge la obligatoria aprobación de los análisis de riesgo de túneles realizados. Tal como se ha comentado anteriormente, el art. 11.2 del real decreto determina que los análisis de riesgo realizados *"… se incluirán en el manual de explotación que se remite a la autoridad administrativa para recabar las autorizaciones pertinentes."*.

Las autorizaciones pertinentes a que se refiere, que se recogen en el anexo II del real decreto, son las siguientes:

- Aprobación de un proyecto de construcción de un túnel (túnel en fase de proyecto)
- Autorización de puesta en servicio de un túnel (túnel en fase de construcción)
- Autorización de apertura al tráfico de un túnel, tras un cambio o modificación sustancial del mismo (túnel en fase de explotación)

En los tres casos, el gestor del túnel debe reunir la documentación que constituye el manual de explotación del túnel, consultar al responsable de seguridad y presentarle a la autoridad administrativa el manual junto con el dictamen del responsable de seguridad, para su consideración. Por lo que, se considera que

la aprobación o autorización de la autoridad administrativa lleva implícita la aprobación del manual de explotación que se le ha remitido.

Por otro lado, la Orden Circular 33/2013 sobre el manual de explotación de los túneles de la Red de Carreteras del Estado, establece el procedimiento de aprobación del manual de explotación de un túnel, cuando no debe someterse a ninguno de los anteriores procedimientos, como ocurre en los túneles en fase de explotación que no requieren una apertura al tráfico, tras un cierre previo.

La aprobación de un manual de explotación implica la aprobación de toda la documentación contenida en el mismo, incluyendo los análisis de riesgo. Es por ello que, cuando en el punto 2.1 de la MARTE se dice: *"Los análisis de riesgo de un túnel deberán ser aprobados por la Autoridad Administrativa, de forma conjunta o independiente del manual de explotación del túnel."*, contradice lo establecido en el real decreto y en su normativa de desarrollo. Por lo que, se propone la eliminación de este párrafo de la MARTE.

• DEFINICIÓN DE TÚNEL VIRTUAL

La MARTE no deja completamente claro qué valor se debe adoptar en el túnel virtual para algunas variables, como por ejemplo el tráfico o las condiciones meteorológicas, lo que da lugar a diferentes interpretaciones por parte de los analistas. Por ello, se propone incluir en la MARTE una definición completa de túnel virtual, de forma que ningún aspecto del mismo sea susceptible de interpretación. Para lo que se incluye en el punto 2.3 el siguiente párrafo:

"El túnel virtual tendrá las siguientes características:

- Longitud: igual a la del túnel real
- Tipo de circulación del tráfico (unidireccional o bidireccional): igual al del túnel real
- Trazado en planta: igual al del túnel real
- Trazado en alzado: igual al del túnel real, salvo que éste tenga una inclinación media de la rasante superior al 3%, en cuyo caso la del túnel virtual será del 3%
- Trazado de la sección transversal: tendrá la misma forma que la del túnel real (rectangular, herradura, circular…), pero cumpliéndose en ella los anchos y gálibo vertical establecidos en la norma de trazado aplicable
- Tráfico: igual al del túnel real, salvo que en éste se supere el nivel de servicio C en autopistas y autovías o el D en carreteras convencionales y multicarril. En cuyo caso, la intensidad de tráfico del túnel virtual será la máxima para la que no se supere dicho nivel de servicio
- Ubicación y orientación: igual a las del túnel real
- Ventilación: será la mínima para cumplir con las exigencias del R.D. 635/2006 (incendio con potencia mínima de 30 MW y caudal mínimo de humos de 120 m3/s)
- Equipamiento: el definido por el R.D. 635/2006 según la tipología del túnel."

• ANÁLISIS DE RIESGO DE TÚNELES CON MÁS DE UN TUBO

En los túneles en carreteras de calzadas separadas es habitual que haya, al menos, un tubo por calzada, por lo que para determinar el riesgo de estos túneles se debe analizar individualmente cada uno de sus tubos. No obstante, en la MARTE no se aclara qué índice de riesgo tendrá el túnel, a partir de los índices de riesgo de cada uno de sus tubos.

Por otro lado, en túneles con más de un tubo, puede ocurrir que cada uno de los tubos corresponda a una tipología diferente de las definidas en el punto 2.21 del anexo I del Real Decreto 635/2006. Esto ha dado lugar a que, en algunas ocasiones para reducir las exigencias de seguridad, se obtuviera el riesgo de cada tubo considerando el equipamiento mínimo para el mismo en función de su tipología, como si se tratara de un túnel de un solo tubo, es decir, sin tener en cuenta que estos tubos pertenecen a un mismo túnel que no puede equiparse de forma diferente en cada uno de sus tubos.

En la propuesta de modificación de la MARTE se adopta un criterio respecto a estos dos aspectos, introduciendo el siguiente párrafo en el punto 2.3:

"Para obtener el riesgo de un túnel con más de un tubo, se deberá analizar el riesgo de cada uno de sus tubos, considerándose como resultado del análisis de riesgo del túnel, el del tubo con un resultado más desfavorable. Además, deberá tenerse en cuenta que, al realizar el análisis de riesgo de cada uno de los tubos del túnel, se debe considerar como equipamiento mínimo de todos los tubos el que corresponda al tubo de mayor longitud."

- **VALIDEZ DE LOS ANÁLISIS DE RIESGO**

El análisis de riesgo de un túnel se realiza para un determinado tráfico, bien sea este resultado de una prognosis o bien sea el existente en el túnel en el momento de realizar el análisis. En cualquier caso, dado que la intensidad del tráfico, tanto total como de pesados, tiene una considerable influencia en el resultado del análisis y, puesto que el tráfico cambia con el tiempo, se considera necesario aclarar que el análisis de riesgo realizado dejará de ser válido cuando se superen el tráfico considerado en el cálculo del riesgo.

Para ello se propone introducir el siguiente párrafo en el punto 2.5 de la MARTE:

"En cualquier caso, el análisis de riesgo será válido para las hipótesis de tráfico consideradas, si bien el analista podrá plantear una prognosis de tráfico para determinar a partir de qué datos de tráfico (IMD e IMD de pesados) la calificación del túnel obtenida con el análisis (p.e. seguro, sin necesidad de restricciones, etc.) cambiaría."

3. DETERMINACIÓN DEL MÉTODO A APLICAR

Los métodos contemplados en la MARTE para realizar el análisis de riesgo de un túnel son el Método General y el Método de Mercancías Peligrosas. Tal como se ha comentado anteriormente, la propuesta de actualización de la MARTE se ha centrado en el Método General, al basarse el Método de Mercancías Peligrosas en el modelo DG QRAM que está siendo actualizado por PIARC.

4. MÉTODO GENERAL

4.1. MODELO DE RIESGO DEL TÚNEL (subgrupos 2, 3 y 4)

- **ESCENARIOS DE INCEDIO**

La MARTE actual contemplaba para cada escenario de incendio la posibilidad de originarse por varios posibles accidentes. Esto se ha simplificado, dejando un solo accidente como origen del incendio provocado en cada uno de los escenarios que contempla la metodología.

Por otro lado, se ha planteado la posibilidad de eliminar el escenario 5 (E5), en el que se produce un incendio de potencia 100 MW, en túneles con paso prohibido de mercancías peligrosas, al entender que es un vehículo de mercancías peligrosas el más fácilmente puede generar un incendio de esta potencia. Pero finalmente se rechazó por el grupo de trabajo esta posibilidad, en primer lugar, porque los vehículos de

mercancías peligrosas no son los únicos capaces de provocar un incendio de 100 MW. Y, en segundo lugar, porque el objeto del Método General no es el análisis de los riesgos relacionados con la circulación de mercancías peligrosas por el túnel, y este cambio podría dar lugar pensar que sí que se está analizando esta circunstancia.

• POSICIONAMIENTO DEL INCENDIO EN EL TÚNEL

La MARTE contempla en el punto 4.1.1.3 los criterios a seguir para posicionar el accidente y posterior incendio que se producen en cada uno de los escenarios. Estos criterios son diferentes en función de si se trata de un túnel unidireccional o bidireccional, y de las salidas de emergencia de que dispone el mismo, considerando los siguientes casos:

- Sin salidas de emergencia ni en el túnel real ni en el virtual
- Sin salidas de emergencia en el túnel real pero sí en el virtual
- Con salida/s de emergencia en el túnel real y en el virtual

El principal problema a la hora de aplicar estos criterios es que en el caso de que tanto en el túnel virtual como en el real (existente o proyectado) haya, al menos, una salida de emergencia intermedia, el accidente se debe producir junto a esta salida, que quedará inhabilitada por el posterior incendio. Por lo que, al realizar el análisis puede resultar necesario disponer una salida de emergencia adicional a la inhabilitada, pese a que, según los requisitos mínimos de seguridad del R.D. 635/2006, por longitud del túnel no sería necesario disponer esta salida de emergencia adicional.

La propuesta que se realiza para posicionar el incendio, además de solucionar el citado problema, simplifica considerablemente el posicionamiento reduciendo toda la casuística de la actual MARTE. Se propone un nuevo criterio para el posicionamiento del incendio de forma que, en todos los túneles (real y virtual) y escenarios, se analizarán dos posiciones de incendio:

- Posición 1 (o P1): en el punto medio (50%) entre las dos salidas de emergencia consecutivas más separadas del túnel real, considerando a estos efectos las bocas del túnel como salidas de emergencia
- Posición 2 (o P2): en el punto situado al 80% entre las mismas dos salidas de emergencia.

Para realizar el análisis de riesgo, la ubicación de las salidas de emergencia será la siguiente:

- Túnel real: coincidiendo con las salidas de emergencia existentes o proyectadas
- Túnel virtual: manteniendo la máxima interdistancia, según las características del túnel en el R.D. 635/2006, en torno a la posición del incendio fijada para el túnel real.

Finalmente, se establece que el coeficiente de riesgo del túnel será el más alto de los obtenidos para cada una de las posiciones de incendio analizadas.

• FACTOR CORRECTOR DEL RIESGO EN FUNCIÓN DEL TRÁFICO O FACTOR IMD

La MARTE contempla un factor corrector en función del tráfico que circula o circulará por el túnel, denominado FIMD, que corrige la probabilidad de ocurrencia de cada escenario, a partir de la que se obtiene el coeficiente de riesgo, en función de la IMD por carril del túnel real. Igualmente se realiza para el túnel virtual, teniendo en cuenta que la intensidad de tráfico del túnel virtual será la misma que la del real siempre que en este no se supere el nivel de servicio C, en cuyo caso la intensidad de tráfico del túnel virtual será la máxima para la que no se supera el nivel de servicio C.

Puesto que el índice de riesgo de un túnel es el cociente del coeficiente del túnel real entre el de su túnel virtual, lo que es relevante para determinar la sensibilidad del índice de riesgo del túnel frente la intensidad de tráfico del mismo es el cociente entre el factor IMD del túnel real y del virtual.

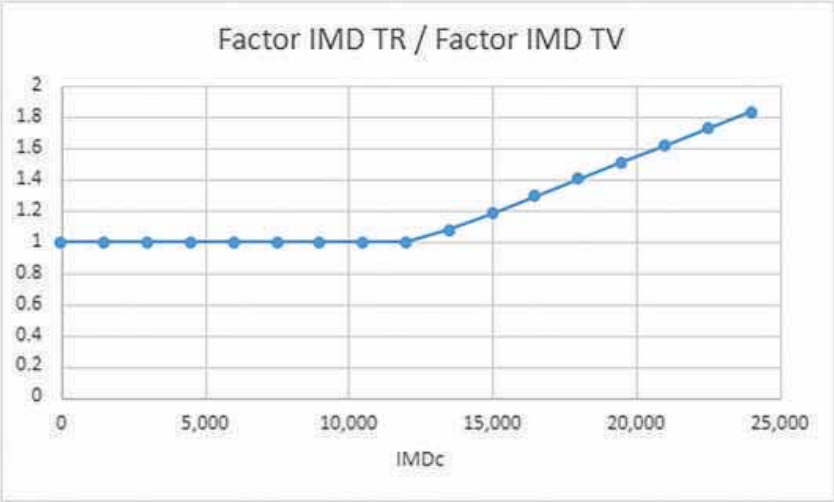


Figura 1. Variación del cociente entre el factor IMD del túnel real y del virtual en función de la IMD por carril del túnel real en una autopista o autovía con dos carriles por sentido

Tal y como se observa en la gráfica anterior y se deduce de la definición del mismo, el factor IMD no tiene influencia hasta que no se supera en el túnel real la intensidad de tráfico máxima para el nivel de servicio C. A partir de este valor de IMD, la influencia de este factor sobre el índice de riesgo crece rápidamente hasta un valor máximo que llega casi a duplicarlo.

Esto supone que, en un túnel con muy elevado tráfico sea prácticamente imposible conseguir reducir su índice de riesgo hasta conseguir que alcance un valor que permita calificarlo como seguro, por más medidas de seguridad adicionales o complementarias con las que se dote al mismo. Lo que ha llevado a muchos analistas a no considerar este factor en el cálculo, o bien a reinterpretar su aplicación por considerar desproporcionada su influencia sobre el índice de riesgo.

Además, como también se observa en la gráfica anterior, por la propia definición del factor IMD, este únicamente penaliza el riesgo en los túneles con muy elevado tráfico. Sin embargo, no considera la reducción del riesgo que supone para un túnel tener un tráfico muy reducido.

Por estos motivos se incluye en la propuesta de actualización de la MARTE un nuevo factor IMD, para tener en cuenta la influencia del tráfico sobre el índice de riesgo del túnel. Este factor se aplica para determinar el factor corrector del coeficiente de riesgo, de forma análoga a como se hace con los otros factores que consideran elementos de la geometría, el equipamiento y la explotación del túnel, en lugar de modificar la probabilidad de ocurrencia de cada escenario como contempla actualmente la MARTE.

El factor IMD del túnel virtual será siempre igual a la unidad, mientras que para el túnel real se obtendrá mediante la siguiente fórmula:

$$F_{IMD} = 1 + 0{,}15 \cdot \frac{IMDc_{real} - IMDc_{virtual}}{IMDc_{virtual}}$$

Pero antes de obtener este factor, es necesario determinar el valor de la IMD por carril del túnel virtual ($IMDc_{virtual}$). Para ello, se ha tomado como referencia lo establecido en la norma 3.1 IC (tabla 7.1), en la que se fija el nivel de

servicio mínimo en la hora de proyecto del año horizonte en función del tipo de carretera y su velocidad de proyecto. Así pues, se tomará como nivel de servicio mínimo en función del tipo de carretera, que se corresponde con el nivel de servicio máximo para el túnel virtual, el siguiente:

- Autopistas y autovías: nivel de servicio C
- Carreteras convencionales y multicarril: nivel de servicio D

Del mismo modo, para tener en cuenta la reducción del riesgo que supone un reducido tráfico en el túnel, se adopta un nivel de servicio mínimo para el túnel virtual, que será:

- Autopista y autovías: nivel de servicio A
- Carreteras convencionales y multicarril: nivel de servicio B

Finalmente, teniendo en cuenta que la IMDc del túnel virtual para cada uno de estos niveles de servicio será la máxima para la que no se supera el mismo, se puede determinar la misma, en función del tipo de carretera y de la IMDc del túnel real, a partir de:

- En autopistas y autovías:
  - Si $IMDc_{real} > IMDc_{N.S.C}$ -> $IMDc_{virtual} = IMDc_{N.S.C}$
  - Si $IMDc_{N.S.A} < IMDc_{real} < IMDc_{N.S.C}$ -> $IMDc_{virtual} = IMDc_{real}$
  - Si $IMDc_{real} < IMDc_{N.S.A}$ -> $IMDc_{virtual} = IMDc_{N.S.A}$
- En carreteras convencionales y multicarril:
  - Si $IMDc_{real} > IMDc_{N.S.D}$ -> $IMDc_{virtual} = IMDc_{N.S.D}$
  - Si $IMDc_{N.S.B} < IMDc_{real} < IMDc_{N.S.D}$ -> $IMDc_{virtual} = IMDc_{real}$
  - Si $IMDc_{real} < IMDc_{N.S.B}$ -> $IMDc_{virtual} = IMDc_{N.S.B}$

En las siguientes gráficas se muestra cómo evoluciona el factor IMD para el túnel real en función de la IMD por carril del mismo, tanto para autopistas y autovías, como para carreteras convencionales y multicarril.

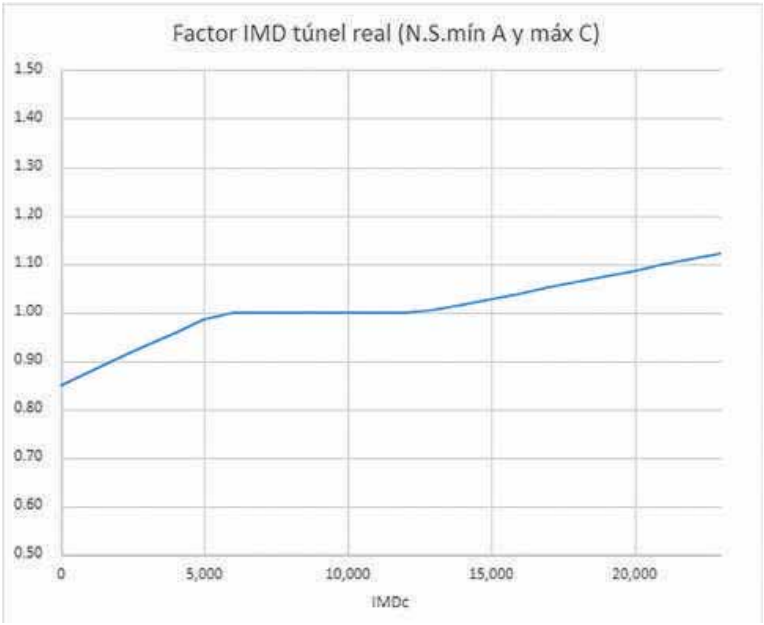


Figura 2. Evolución del factor IMD del túnel real de una autopista o autovía con dos carriles por calzada en función de la IMD por carril

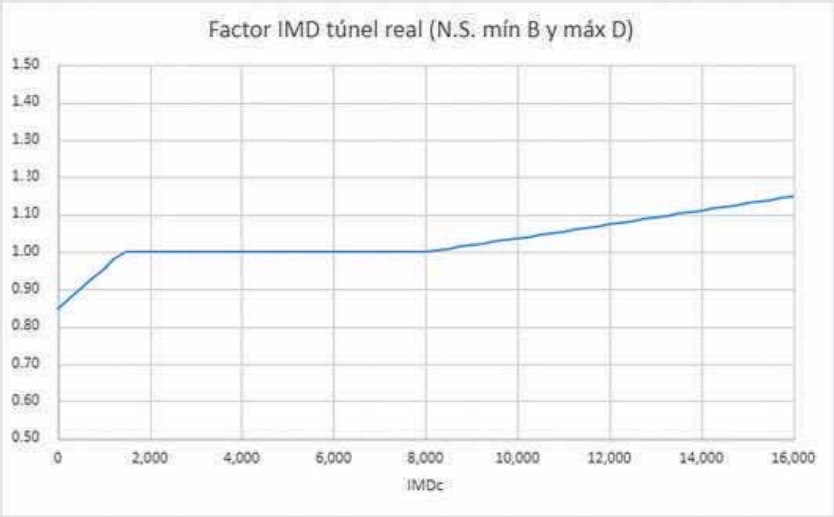


Figura 3. Evolución del factor IMD del túnel real de una carretera convencional o multicarril en función de la IMD por carril

Tal como se observa en las figuras anteriores, este factor se traduce en una reducción de hasta un 15% del índice de riesgo para túneles con reducido tráfico y en un aumento de menos de un 15% para túneles con elevado tráfico, que se deberá compensar con medidas de seguridad adicionales o complementarias.

• FACTOR DE OTRAS MEJORAS

La MARTE contempla, dentro de los factores de ponderación por criterios de equipamiento del túnel (Feq), un factor que engloba otras mejoras en la dotación del túnel sobre lo exigido para él en el R.D. 635/2006 (Feq_{OTR}). Este factor, que no podrá ser inferior a 0,9, es un cajón de sastre para que el analista considere tanto el equipamiento contemplado en el real decreto que no se considera directamente por la metodología (que se enumera en la MARTE), como otro posible equipamiento no contemplado por el real decreto.

La MARTE no da ninguna pauta para la determinación del valor de este factor en función del equipamiento, por lo que es cada analista quien lo determina según su criterio.

La propuesta busca dar unas pautas a los analistas para la determinación de este factor corrector, pues se ha observado que en muchas ocasiones este factor se obtiene de forma arbitraria, con el único objetivo de acercarse al resultado que se espera del análisis de riesgo.

Para ello, en primer lugar, se ha aumentado el peso del factor, que podrá oscilar entre 0,8 a 1,2, puesto que son muchas las instalaciones a considerar en el mismo. A continuación, se ha dividido en dos el peso del factor (±0,2), una parte del mismo estará destinada a evaluar el equipamiento contemplado en el R.D 635/2006 pero no considerado en la MARTE (el 75%) y la otra parte será para tener en cuenta el equipamiento no considerado en el real decreto (25%).

En la propuesta se dan también unas pautas para considerar el peso de cada una de las instalaciones incluidas en el real decreto. Mientras que la consideración del equipamiento no contemplado por el real decreto se determinará de forma discrecional por el analista.

4.2. MODELOS DE VENTILACIÓN (subgrupos 5 y 6)

Los modelos de ventilación tratan de reproducir el movimiento de los humos que se producen a consecuencia de un incendio.

La MARTE contempla dos modelos de ventilación diferentes:

- Modelo tabulado de ventilación: de aplicación en túneles cortos, para los que el real decreto no exija ventilación mecánica.
- Modelo unidimensional de ventilación: de aplicación en el resto de los túneles.

Con respecto al ámbito de aplicación de cada uno de estos modelos, en la propuesta de actualización se matiza que el modelo unidimensional también se deberá emplear en el caso de túneles que, a pesar de no exigirles ventilación forzada el real decreto, sí que dispongan de la misma.

• MODELO TABULADO DE VENTILACIÓN

En este modelo para determinar de forma simplificada el comportamiento de los humos a lo largo del túnel, la MARTE da valores de las siguientes variables para el incendio producido en cada uno de los escenarios:

- Caudal de humo producido, se da una horquilla de valores tanto para una distribución del humo con un solo frente de avance, que se aplica a túneles unidireccionales; como para dos frentes iguales de avance, que se aplica a túneles bidireccionales.

  Posteriormente, este valor de caudal de humo producido no se aplica en el modelo. Por lo que se propone eliminarlo.

- Velocidad de desplazamiento del humo, se da una horquilla de valores para cada escenario, diferenciando nuevamente entre un solo frente o dos frentes.

  Permite obtener cuándo el humo sale por la boca o bocas de entrada, que es uno de los factores que determina el momento en el que dejan de entrar más vehículos en el túnel.

- Tiempo de desestratificación del humo, a partir del cual el humo ocupa toda la sección del túnel.

  Durante este tiempo los usuarios afectados, salen de su vehículo y evacúan el túnel hacia la salida de emergencia más próxima en sentido de avance del humo.

- Tiempo adicional, que disponen los usuarios afectados tras la desestratificación de los humos, para evacuar el túnel.

  Durante este tiempo, los usuarios que aún no han salido continúan evacuando el túnel a una velocidad de avance reducida por la pérdida de visibilidad. Transcurrido este tiempo, los usuarios que no han alcanzado un lugar seguro quedan atrapados en el túnel.

Además, la metodología incluye una fórmula que permite determinar cuáles serían las velocidades de desplazamiento del humo, en cada escenario, para secciones de túnel distintas de la de 70 m^2, que es la que considera como referencia.

Uno de los problemas que se detectó en este modelo es que considera un tiempo fijo para la desestratificación del humo en túnel, llegándose a producir la paradoja de que el humo se desestratifique en un tramo del túnel al que todavía no ha llegado.

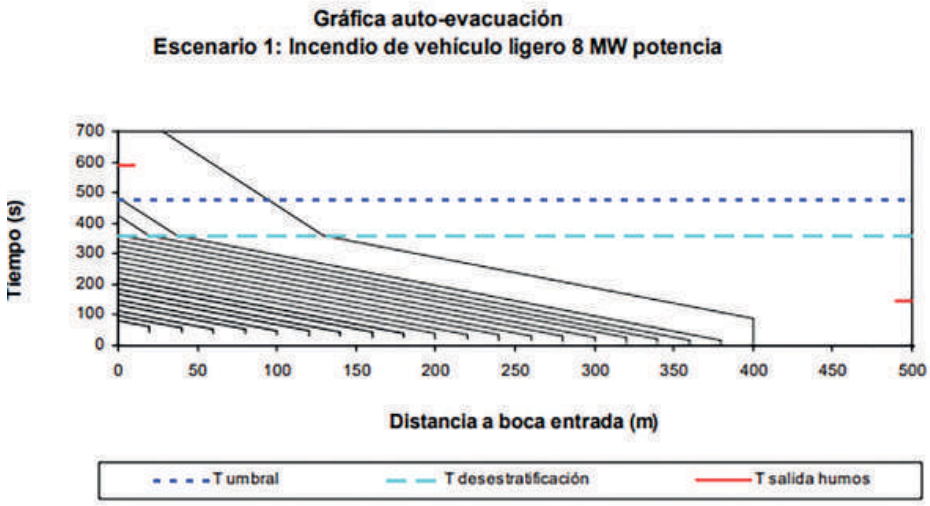


Figura 4. Diagrama espacio-tiempo extraído de la MARTE en el que, en un tramo de túnel contiguo a la boca de entrada (0 m), la desestratificación se produce antes de que el humo haya llegado

Para corregir esto, la propuesta introduce en el gráfico longitud-tiempo el avance de los humos, junto a los tiempos de desestratafication, adicional y de salida del humo por cada boca. De esta forma es posible corregir las líneas que definen los tiempos de desestratrafication y adicional a lo largo del túnel. Estas líneas dejarán de ser dos rectas horizontales, cuando la desestratificación se produzca antes de que el humo alcance una boca.

Además, a partir de diversas simulaciones con un modelo tridimensional se determina la velocidad de avance y el tiempo de desestratificación de los humos, en función de la pendiente longitudinal y para una sección tipo del túnel, permitiendo así calibrar los valores dados por el modelo tabulado, tal como se detalla más adelante.

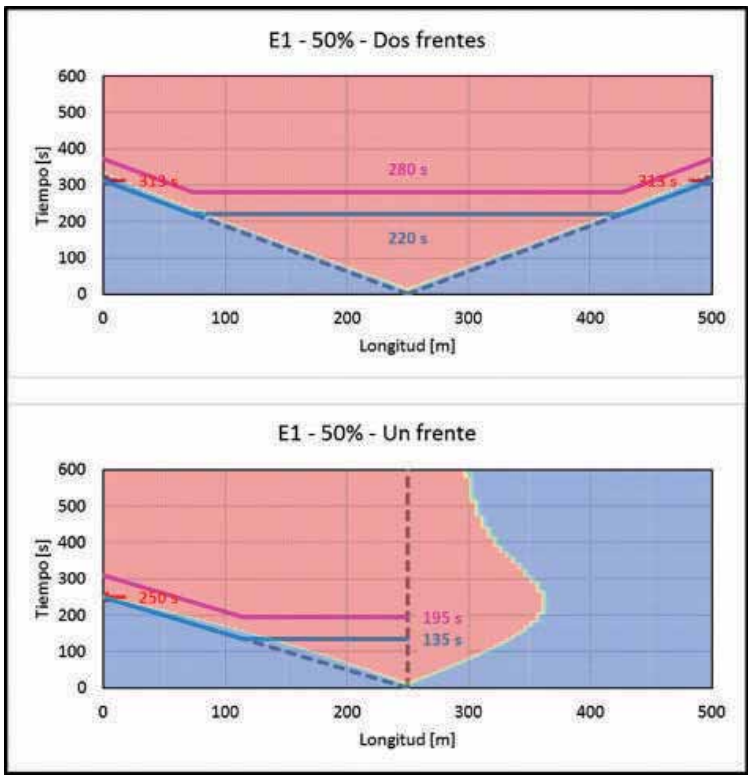


Figura 5. Comparación de la velocidad de avance del frente de humo (línea negra discontinua), según el modelo simplificado, con la obtenida con una simulación tridimensional, tanto para uno como dos frentes. Se incluyen también los tiempos de desestratificación (azul) y adicional (rosa/morado)

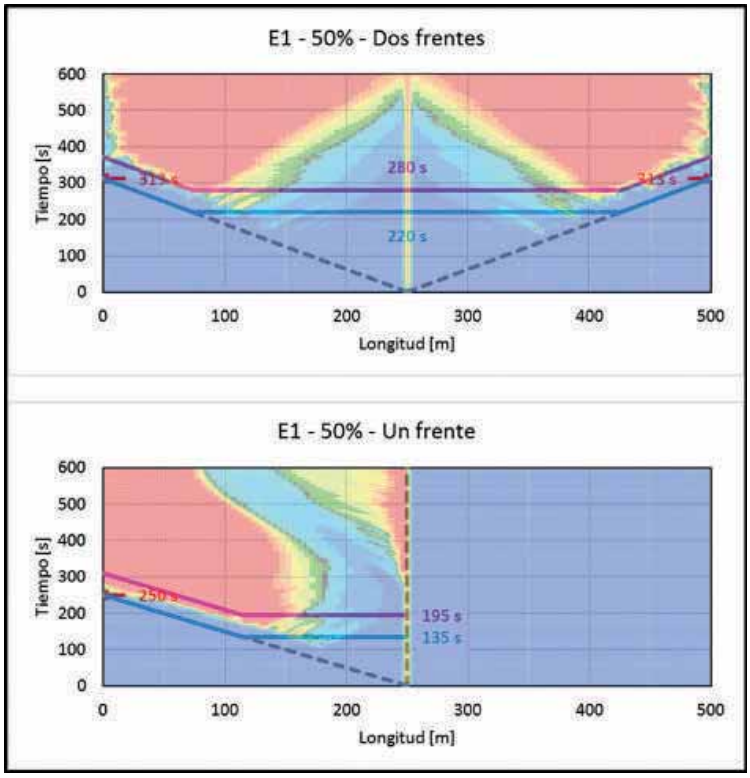


Figura 6. Comparación del tiempo de desestratificación (línea azul), según el modelo simplificado, con el obtenido a la altura de evacuación con un modelo tridimensional, tanto para uno como dos frentes. Se incluyen también el tiempo adicional (rosa/morado) y la velocidad de avance (negra discontinua)

Como se ha comentado, el modelo tabulado realiza la hipótesis de que el avance del humo en un frente se produce en túneles unidireccionales, mientras que en túneles bidireccionales se producirá en dos frentes. Sin embargo, es conocido que el avance en uno o dos frentes no depende del tipo de circulación del tráfico, sino de otros muchos factores como son la pendiente longitudinal (efecto chimenea), sección transversal, condiciones ambientales (viento, presión, temperatura), empuje del aire por los vehículos circulando (efecto pistón), etc.

Esto supone que, en determinadas situaciones, la hipótesis considerada en el modelo tabulado no queda del lado de la seguridad, como puede ser en el caso de un túnel bidireccional con pendiente elevada o en el de un túnel unidireccional congestionado. Para mejorar el ajuste a la realidad del modelo, se ha determinado de forma simplificada (sin considerar condiciones ambientales y para una sección transversal tipo), mediante múltiples modelizaciones tridimensionales en las que se ha estudiado el movimiento de los humos tanto a la altura de evacuación como en la clave del túnel, para qué valor de la pendiente longitudinal del túnel se pasa de un avance en dos frentes a uno en un solo frente.

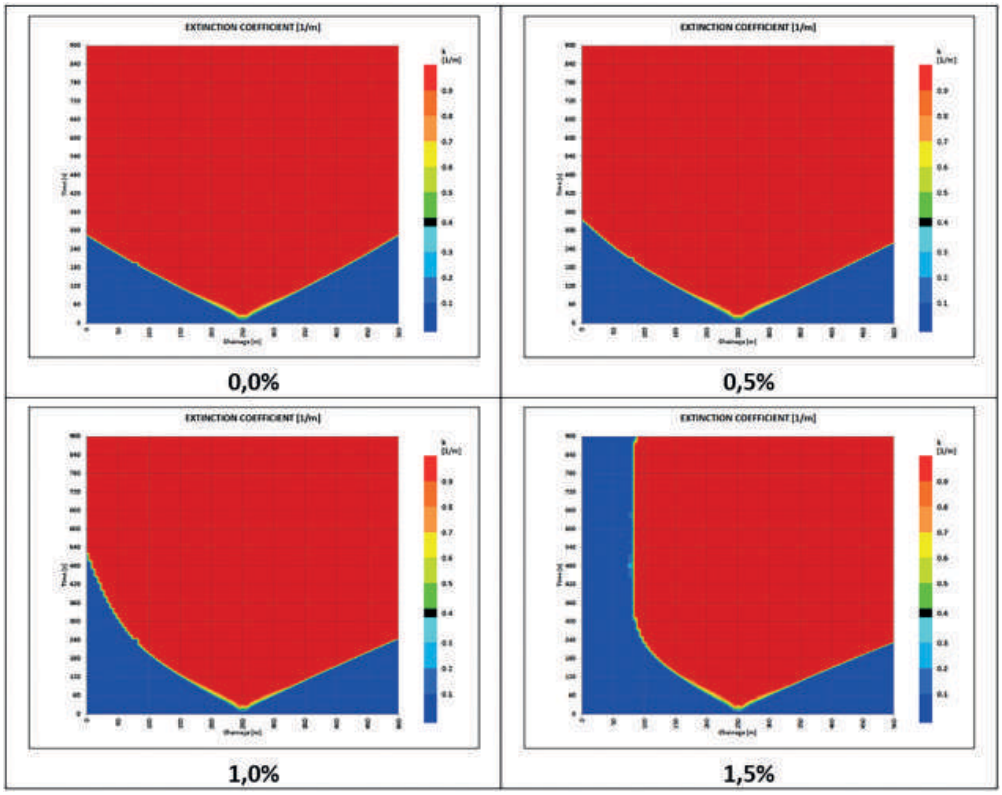


Figura 7. Comportamiento del humo en la clave del túnel, para el incendio del escenario 2, en función de la pendiente longitudinal del túnel

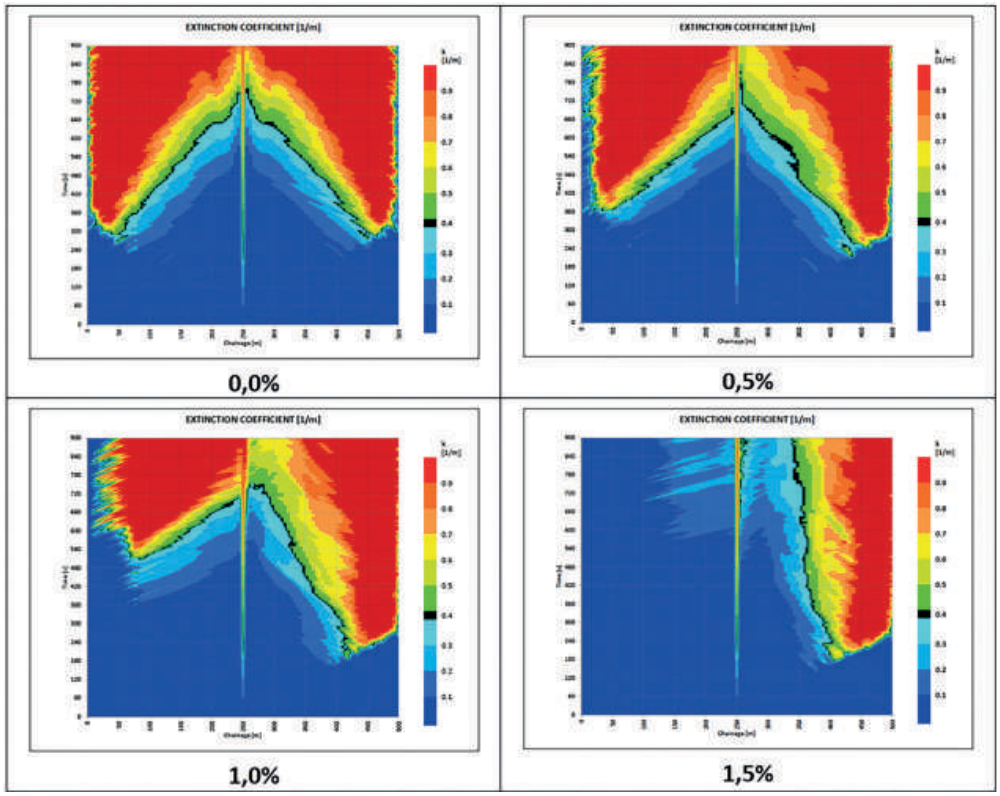


Figura 8. Comportamiento del humo a la altura de evacuación, para el incendio del escenario 2, en función de la pendiente longitudinal del túnel

Las conclusiones de este estudio se expresan en la propuesta de actualización de la metodología de la forma siguiente:

"Se distinguen tres tramos según el valor absoluto de la pendiente del túnel:

- Un tramo entre 0 y 1%, en el que se considera que el frente de humo avanza en ambos sentidos, con unos valores mínimos de la velocidad de avance y del tiempo de desestratificación.
- Un tramo entre 1 y 4,5%, en el que el frente de humo avanza en un único sentido, el de la pendiente ascendente, en el que los valores de la velocidad de avance y del tiempo de desestratificación siguen una relación lineal con el valor de la pendiente.
- Un tramo para pendientes por encima de 4,5%, con el humo avanzando en el sentido de la pendiente ascendente, con unos valores máximos de la velocidad de avance y del tiempo de desestratificación."

A partir de aquí, se dan en la propuesta los valores o las fórmulas (para el tramo de pendiente entre 1 y 4,5%) para determinar la velocidad de avance del frente y el tiempo de desestratificación, para un túnel de sección tipo de 70 m2. Pero, dado que tanto la velocidad del humo como el tiempo de desestratificación se ven afectados por la sección transversal del túnel (superficie, altura, forma), se introducen unos factores correctores para tener esto en cuenta. Estos factores varían en función del área de la sección y de la relación de la altura con el diámetro hidráulico, y se aplican tanto al túnel real como al virtual.

Finalmente, cabe comentar que, puesto que esta actualización del modelo tabulado supone en la práctica un cambio completo del mismo, se propone también cambiar el nombre del mismo por el de MODELO SIMPLIFICADO DE VENTILACIÓN que, además, se entiende que es una mejor descripción el modelo.

• MODELO UNIDIMENSIONAL DE VENTILACIÓN

La MARTE contempla el empleo de un modelo unidimensional para el análisis de riesgo en túneles con ventilación mecánica. En estos modelos, como es sabido, se considera que las variables físicas (velocidad del aire, concentración de humo, visibilidad...) son contantes en cada sección transversal del túnel. Por lo que los modelos unidimensionales, están especialmente bien adaptados para el estudio de la ventilación longitudinal de túneles unidireccionales sin congestión, pero no permiten modelizar adecuadamente los fenómenos de estratificación de los humos.

En los túneles bidireccionales o unidireccionales congestionados, con ventilación mecánica, la estrategia de ventilación se basa en mantener la estratificación de los humos el mayor tiempo posible, para favorecer durante ese tiempo la auto-evacuación de los usuarios desde ambos lados del incendio. Es por ello que, en estos casos, así como en cualquier otro en el que el fenómeno de la estratificación sea relevante, no es aconsejable emplear únicamente un modelo unidimensional y se recomienda recurrir a modelos tridimensionales.

Por este motivo, la propuesta de actualización introduce en la MARTE los modelos tridimensionales de ventilación. Para ello, en primer lugar, se contempla un cambio de denominación del modelo, pasando a denominarse MODELO COMPUTACIONAL DE VENTILACIÓN, que incluye tanto el modelo unidimensional como el tridimensional. Además, se recomienda el empleo del modelo tridimensional en túneles bidireccionales o unidireccionales congestionados con ventilación forzada.

Otro inconveniente que presenta el modelo de ventilación de la MARTE es que no se dan directrices sobre la consideración de las condiciones ambientales (viento, presión y temperatura), que tienen una enorme influencia en el resultado de la simulación. De esta forma, según los valores que considere cada analista el resultado del análisis puede variar considerablemente.

Para solucionar esto en la propuesta se introduce un apartado en el que se proponen criterios, tanto para el modelo unidimensional como para el tridimensional, que el analista podrá emplear a falta de datos más precisos, no solo para la consideración de las condiciones ambientales, sino también para la definición de los in-

cendios. Asimismo, se aclara cómo se debe considerar en el modelo computacional para el túnel virtual la geometría, el tráfico, el funcionamiento del sistema de ventilación o de los equipos de cierre del túnel, que es algo que actualmente no está definido en la MARTE, por lo que da lugar a diversidad de criterios según el analista.

4.3. MODELO DE COMPORTAMIENTO DE LOS USUARIOS (subgrupo 7)

Los modelos de comportamiento de los usuarios o de evacuación tratan de reproducir el proceso de evacuación de los usuarios por sus propios medios, o auto-evacuación, tras producirse un incendio.

En el modelo de comportamiento de los usuarios de la MARTE se define, en primer lugar, cómo determinar el número de usuarios afectados por el incendio. Para ello, además de definir la tasa de ocupación de cada tipo de vehículo, se considera que los vehículos siguen entrando en el túnel hasta que este se llene, se cierre (con semáforos o barreras), o bien el humo del incendio comience a salir por la boca de entrada.

Por lo que respecta al proceso de evacuación de los usuarios afectados, se considera que:

- Existe un tiempo de reacción hasta que cada usuario inicia la evacuación
- Cada usuario evacúa a 1 m/s, mientras no hay humo o está estratificado
- Cuando el humo alcanza a un usuario, tras la desestratificación, este continúa evacuando a una velocidad reducida durante el tiempo adicional correspondiente
- Si el usuario no consigue llegar a un lugar seguro en ese tiempo quedaría atrapado

El tiempo de reacción definido por el modelo de la MARTE es en el caso de los vehículos implicados en el accidente de 90 segundos para ligeros y pesados, y de 300 para autobuses. Mientras que, para el resto de los usuarios el tiempo de reacción es de 15 segundos.

Este tiempo de reacción de los usuarios de 15 segundos se considera excesivamente reducido para que una persona tome la decisión de evacuar, se quite el cinturón, coja lo mínimo imprescindible y salga del vehículo. Lo habitual en otras metodologías de análisis de riesgo, así como en publicaciones científicas, son tiempos de reacción que oscilan entre los 30 y los 90 segundas. Por lo que, se propone aumentar este tiempo hasta los 30 segundos, por ser el más próximo del citado intervalo al valor actual de la MARTE.

Por otro lado, la modelización de la evacuación de la MARTE considera que los usuarios que entran en el túnel comenzarán su proceso de evacuación cuando lleguen a la cola de vehículos detenidos, o bien cuando se crucen con un usuario evacuando a pie el túnel. La experiencia de este tipo de situaciones, así como ensayos a escala real realizados, muestran que lo habitual es que un conductor que circula por un túnel no se detenga hasta que encuentre una cola de vehículo detenidos, a pesar de que vea antes a una persona evacuando el túnel. Por lo que, en la propuesta se considera que los usuarios no comienzan su proceso de evacuación hasta alcanzar la cola de vehículos detenidos.

Una laguna detectada en el modelo de comportamiento de los usuarios de la MARTE es que no contempla la posibilidad de que el túnel esté congestionado en el momento que se produce el incendio, lo que puede suponer que del análisis resulte un menor riesgo del que se obtendría considerando esta circunstancia. Puesto que algunos túneles están congestionados durante un número considerable de horas al año, se considera necesario poder analizar esta situación. Para ello, se va a incluir en la propuesta de actualización la modelización de la evacuación de túneles congestionados, pese a que a fecha final de redacción de este artículo la propuesta no está cerrada por el grupo de trabajo. Además, también se define en la propuesta en qué casos sería necesario estudiar el caso del túnel congestionado, así como cuándo sería esto recomendable.

Por último, puesto que se ha introducido en la propuesta de actualización de la MARTE un modelo tridimensional de ventilación, se dan las pautas para la modelización de la evacuación y la determinación de los usuarios atrapados cuando se usa dicho modelo.

4.4. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN (subgrupo 1)

Tal como se comentó en el punto de este artículo sobre el "nivel de seguridad equivalente", la propuesta de modificación de la MARTE incluye una nueva categoría en la calificación de los túneles en función de su índice de riesgo contenido en el punto 4.4 Criterios de aceptación de la MARTE. Esta nueva categoría corresponde a túneles con un nivel de seguridad, de acuerdo con análisis de riesgo, mayor que el de su correspondiente túnel virtual.

Además, también se propone cambiar la denominación de las restantes categorías de túnel en función de su índice de riesgo, para que sean coherentes con la nueva categoría propuesta.

El resultado de esta propuesta, detallando en azul el texto que se modifica, es el siguiente:

"Se fija la siguiente calificación de los túneles en función de su índice de riesgo:

- Túneles seguros o con bajo riesgo: serán aquellos que presenten un valor del índice de riesgo inferior a la unidad y, por tanto, más seguridad que el túnel virtual correspondiente, de acuerdo con la presente metodología.

  Se considerarán así todos los túneles que presenten un valor del índice de riesgo inferior a 1'00.

- Túneles sin necesidad de restricciones o con riesgo aceptable: serán aquellos que presenten un valor del índice de riesgo muy próximo a la unidad, pero siempre superior a ésta.

- Se considerarán así todos los túneles que presenten un valor del índice de riesgo comprendido entre 1,00 y 1'15.

- Túneles con posibles restricciones o con riesgo medio: serán aquellos que presenten un valor del índice de riesgo comprendido entre 1'15 y 1'50.

  Este caso se corresponde con túneles en los que el riesgo es compatible con mantenerlos en servicio durante un cierto periodo de tiempo, a determinar individualmente por la Autoridad Administrativa. Será necesario estudiar las medidas complementarias aplicables para incrementar la seguridad en el túnel o en sus inmediaciones, que se pueden aplicar a medio plazo. En cada caso, será la Autoridad Administrativa la que deba aprobar las medidas a adoptar.

- Túneles inseguros o con riesgo elevado: serán aquellos que presenten un valor del índice de riesgo superior a 1'50 y no se considerarán seguros.

Estos túneles requerirán la adopción de medidas complementarias para aumentar su seguridad y poder mantenerse o ponerse en servicio, según su caso. En cada caso, será la Autoridad Administrativa la que deba aprobar las medidas a adoptar."

5. CONCLUSIONES

A modo de conclusiones, se pueden resaltar los siguientes aspectos del estudio realizado:

- La Metodología de Análisis de Riesgo en Túneles de red de carreteras del Estado (MARTE) es una potente herramienta que, desde su aprobación hace más de una década, ha permitido elaborar infinidad de análisis de riesgo en túneles de carretera de una forma racional, homogénea y razonablemente objetiva. Contribuyendo a la toma de decisiones en materia de seguridad en túneles de una forma eficiente y con una mayor transparencia.

- La propuesta de actualización de la MARTE descrita en el presente artículo, es el fruto de la experiencia acumulada en la aplicación de la metodología, así como de más de dos años de trabajo de los miembros del grupo de trabajo creado en el Comité de Túneles de la ATC

- Cada uno de los aspectos introducidos en la propuesta de actualización de la MARTE está perfectamente justificado y persigue uno o más de los siguientes objetivos:
  - Eliminar erratas
  - Aclarar aspectos que suponen diversas interpretaciones
  - Solucionar problemas que, en algunos túneles, supone la aplicación de determinados aspectos (posicionamiento del incendio, factor IMD)
  - Mejorar la simulación del comportamiento de los humos, en aquellos casos que así lo requieran (modelo tridimensional)
  - Permitir analizar situaciones no contempladas (túneles con congestión)

DANGEROUS GOOD QUANTITATIVE RISK ASSESSMENT MODEL AND ITS UPDATING/UPGRADING PROJECT

Christophe Willmann
France - CETU

Raphaël Defert
France - BG

Behrnard Kohl
Austria – ILF

Nikolaos Vagiokas
Greece – ENALOS

This paper informs about the upgrading and Improving of PIARC´s dangerous goods risk model for road tunnels, DG-QRAM.

Accidents involving toxic, flammable, explosive and other dangerous goods are extremely rare. However, the consequences of these accidents can be much more disastrous in tunnels than in the open air. For this reason, it is essential to carry out an objective risk assessment before deciding on regulations for dangerous goods transport. In this context DG-QRAM can be used for different purposes: assess the societal risks due to dangerous goods transport for a tunnel or a route and compare it with reference criteria; assess the societal risks for each ADR category (A to E) of a given tunnel in order to help choose one.

Due to these different application modes and its flexibility, DG-QRAM can be used within various methodological frameworks as long as it is solely applied for the risk assessment of dangerous goods transport on road. For instance it is used in the framework of a multicriteria methodology in France and in a three step approach in Austria.

DG-QRAM is based on various scenarios which enable to assess the hazards of a representative dangerous goods portfolio in a tunnel environment as well as in the open, allowing for the evaluation of the associated societal risk for different routes. The calculation takes into account accident frequencies, physical consequences of incidents within tunnels and along open routes, escape and sheltering effects, effects of hazards on people. The output are F/N curves, where F is the frequency of N or more fatalities (and/or injuries) and values representing the average number of fatalities per year, called the mathematical Expected Value. The model can be used in various and complex situations (for instance two possible approaches to consider local population).

The updating/upgrading project has especially achieved the following improvements of the model and its application: make possible for user to get result for each ADR [1] category; improve manuals; skip fire scenarios for HGV without dangerous good in order to prevent misuse of DG-QRAM; replace urban/rural parameter by other influencing ones that are more relevant; set up a tunnel data input interface to save time, avoid common mistakes, display information and check consistency.

[1] Accord for dangerous goods by road: European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road

MODELO DE EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE RIESGOS Y SU PROYECTO DE ACTUALIZACIÓN/MEJORA

Los accidentes con mercancías tóxicas, inflamables, explosivas y otras mercancías peligrosas son extremadamente raros. Sin embargo, las consecuencias de estos accidentes pueden ser mucho más desastrosas en los túneles que al aire libre. Por esta razón, es esencial llevar a cabo una evaluación objetiva de los riesgos antes de decidir la normativa sobre el transporte de mercancías peligrosas. En este contexto, la DG-QRAM puede utilizarse para diferentes fines: evaluar los riesgos sociales debidos al transporte de mercancías peligrosas para un túnel o una ruta y compararlos con los criterios de referencia; evaluar los riesgos sociales para cada categoría ADR (de A a E) de un determinado túnel con el fin de ayudar a elegir uno.

Debido a estos diferentes modos de aplicación y a su flexibilidad, la DG-QRAM puede utilizarse en varios marcos metodológicos siempre que se aplique exclusivamente para la evaluación del riesgo del transporte de mercancías peligrosas por carretera. Por ejemplo, se utiliza en el marco de una metodología multicriterio en Francia y en un enfoque de tres pasos en Austria.

La DG-QRAM se basa en varios escenarios que permiten evaluar los peligros de una cartera representativa de mercancías peligrosas en un entorno de túneles, así como en campo abierto, lo que permite evaluar el riesgo social asociado para diferentes rutas. El cálculo tiene en cuenta las frecuencias de los accidentes, las consecuencias físicas de los incidentes en los túneles y en las rutas abiertas, los efectos de la huida y el refugio, y los efectos de los peligros en las personas. El resultado son las curvas F/N, donde F es la frecuencia de N o más víctimas mortales (y/o heridos) y los valores que representan el número medio de víctimas mortales por año, denominado valor matemático esperado. El modelo puede utilizarse en situaciones diversas y complejas (por ejemplo, dos enfoques posibles para considerar la población local).

El proyecto de actualización/mejora ha conseguido especialmente las siguientes mejoras del modelo y de su aplicación: hacer posible que el usuario obtenga resultados para cada categoría de ADR; mejorar los manuales; omitir los escenarios de incendio para los vehículos pesados sin mercancía peligrosa con el fin de evitar el uso indebido de la DG-QRAM; sustituir el parámetro urbano/rural por otros que influyan y que sean más relevantes; establecer una interfaz de entrada de datos en el túnel para ahorrar tiempo, evitar errores comunes, mostrar la información y comprobar la coherencia.

MODÈLE D'ÉVALUATION QUANTITATIVE DU RISQUE DES MARCHANDISES DANGEREUSES ET SON PROJET DE MISE À JOUR/MISE À NIVEAU

Les accidents impliquant des produits toxiques, inflammables, explosifs ou d'autres marchandises dangereuses sont extrêmement rares. Toutefois, les conséquences de ces accidents peuvent être beaucoup plus désastreuses dans les tunnels qu'à l'air libre. C'est pourquoi, il est essentiel de procéder à une évaluation objective des risques avant de décider de la réglementation locale du transport des marchandises dangereuses. Dans ce contexte, l'outil DG-QRAM de l'AIPCR peut être utilisé à différentes fins : évaluer les risques sociétaux dus au transport de marchandises dangereuses pour un tunnel ou un itinéraire et les comparer à des critères de référence ; évaluer les risques sociétaux pour chaque catégorie ADR (A à E) d'un tunnel donné afin d'aider à en choisir une.

En raison de sa large gamme d'applications et de sa flexibilité, l'outil DG-QRAM peut être utilisé dans un large éventail de méthodologies, pour autant qu'il soit uniquement impliqué dans l'évaluation des risques du transport routier de marchandises dangereuses. Par exemple, il est utilisé dans le cadre d'une méthodologie multicritères en France et dans une approche en trois étapes en Autriche.

L'outil DG-QRAM est basé sur divers scénarios qui évaluent les dangers d'un portefeuille représentatif de marchandises dangereuses en tunnel ainsi qu'à l'air libre, ce qui permet d'évaluer le risque sociétal associé pour différents itinéraires. Le calcul prend en compte les fréquences d'accidents, les conséquences physiques des incidents dans les tunnels et le long des itinéraires à l'air libre, l'évacuation des usagers, les effets des dangers sur les personnes. Les résultats sont des courbes F/N, où F est la fréquence de N ou plus de décès (et/ou de blessures) et des valeurs représentants le nombre moyen de décès par an, appelé l'espérance mathématique. Le modèle peut être adapté à des situations variées et complexes (par exemple deux approches possibles pour prendre en compte la population locale).

Le projet de mise à jour/mise à niveau a notamment permis d'apporter les améliorations du modèle et de son usage suivants : permettre à l'utilisateur d'obtenir des résultats pour chaque catégorie d'ADR [2] ; améliorer les guides d'utilisations ; empêcher l'utilisation des scénarios d'incendie pour les poids lourds sans marchandise dangereuse afin d'éviter une mauvaise utilisation du DG-QRAM ; remplacer le paramètre urbain/rural par d'autres paramètres d'influence plus pertinents ; mettre en place une interface d'entrée des données des tunnels pour gagner du temps, éviter les erreurs courantes, afficher les informations et vérifier la cohérence.

[1] Accord européen relative au transport international des marchandises dangereuses par route

1. INTRODUCTION

In the 1990ies, the Organisation for Economic Cooperation and Development (OCDE) and the World Road Association (PIARC) jointly developed a methodology to evaluate the risks associated with the transport of dangerous goods through road tunnels. One of the outputs of this research project was the development of the Dangerous Goods Quantitative Risk Assessment Model (DG-QRAM) which was delivered with the oversight and coordination of the PIARC road tunnels committee.

The goal of DG-QRAM is to evaluate risks of dangerous goods transport through road tunnels in order to inform the decision-making process

Since its release, the DG-QRAM software has been widely used by many European countries to perform risk analysis for dangerous goods transport as required by the European Directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network, and to support the choice of a tunnel category according to ADR regulations. In some countries including Spain and Austria, the use of this software is compulsory and the corresponding requirement has been incorporated into the national regulations.

After more than 15 years of use, it appeared necessary to improve the model due to the evolution of other existing software used with DG-QRAM (Windows, Excel) and because some countries suggested to modify and improve some features of the DG QRAM software itself.

Therefore, in 2014, PIARC general secretary invited the technical committee TC3.3 to start a project that has been organized in two phases: a first phase to update the model to a modern IT environment (including bugs correction), and a second phase to upgrade it by implementing improvements. Eight European countries have funded the project (Austria, Belgium, Finland, France, Greece, Italy, Spain, Switzerland). The updating phase was achieved in 2019 with the release of version 4.04 (current version). The upgrading phase will be achieved not later than beginning of 2023 with the release of a new version.

Firstly, a short reminder about ADR categories[3] is presented as this notion is used many times in the article. Secondly, the article addresses the main purpose of DG-QRAM, the different questions it could contribute to answer, what it could provide and how it functions. Then, the updating and upgrading project will be presented focusing on the upgrade's part.

2. SHORT REMINDER ABOUT ADR CATEGORIES

The passage of dangerous goods through a tunnel may only be restricted by assigning one of the five ADR categories (A to E). With category A, there is no restriction in tunnel on vehicles carrying dangerous goods. With category E, the passage in tunnel is forbidden to all vehicles carrying dangerous goods[4]. The intermediate categories (B to D) correspond to different distributions of the dangerous goods and their risk on the tunnel route and the alternatives route. For instance, if a tunnel is assigned to category B, the passage for vehicle carrying dangerous goods capable of causing a very large explosion is forbidden in the tunnel and allowed in an alternative route.

In ADR, coherently with the category principle described above, each dangerous good is given one of four tunnel restriction codes (B to E). For instance, a dangerous good with a code C doesn't present a risk of a very large explosion but presents a risk of a large explosion or major toxic leak.

A vehicle carrying specific dangerous goods may only pass through tunnels with a category code ranked before its restriction code in alphabetical order. For example, a vehicle transporting goods with a code C may only pass through tunnels of categories A and B.

---

[3] Accord for dangerous goods by road": European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road

[4] apart from vehicles carrying UN numbers 2919, 3077, 3082, 3291, 3331, 3359 and 3373) that raise no specific risks in tunnel

3. DG-QRAM PURPOSES AND POSSIBLE USES IN RISK ASSESSMENT METHODS

DG-QRAM enables a user to assess the societal risks (for this purpose data on road users and on the potentially exposed population along the transport routes is required).

Therefore, this tool may be used for different purposes:

- assess the societal risks due to dangerous goods transport for a tunnel or a route;
- compare the societal risk of a tunnel or along a route with reference criteria. This includes all sorts of criteria, such as the mathematical expectation of the fatalities, one or more threshold F-N curves, the maximum number of deaths, etc.;
- assess the societal risks for each ADR category (A to E) of a given tunnel in order to help choose one. The societal risk of category A and E correspond respectively to the societal risk of the tunnel route and of one (or several) alternative transport route(s).

The QRA model offers numerous possibilities for its application. Therefore, in order to properly interpret the results provided by the model, the corresponding methodological framework (and the applicable evaluation criteria) must be identified in detail.

Due to these different application modes and its flexibility, DG-QRAM can be used within various methodological frameworks as long as it is solely applied for the risk assessment of dangerous good transport on roads. For instance, in many European countries, DG-QRAM is used to perform a risk analysis for dangerous goods transport as required by the European Directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network. Various methodological frameworks were developed for this purpose which can also be applied in other countries worldwide or which could inspire the development of new ones, fitting to the national requirements of a specific country.

As the next part dedicated to the tool functioning will highlight, DG-QRAM is a complex tool that needs a lot of data to be collected. It also needs a highly qualified expertise from the user. In general, the different methodologies are divided in two steps: one that could be called a simplified approach and a more elaborate one, triggered only if the simplified approach is not conclusive. To give some representative examples, the French and Austrian methodologies are presented below.

3.1. French method for dangerous good risk assessment related to road tunnels

In France, the risk analysis should help answering the following question:

Which category should be chosen for the tunnel in order to minimise the overall risk related to the transport of dangerous goods for the entire route comprising the tunnel being studied and other possible routes?

The choice between the five tunnel categories (A to E) is based on DG-Transport-related risks. When the tunnel is category A, the transport of all dangerous goods is permitted in the tunnel. If it is category E, no dangerous goods can be transported through the structure and vehicles carrying such goods must take alternative routes. The other three categories (B to D) lead to a distribution of dangerous goods between the route comprising the tunnel and any alternative route.

The methodology is based on a multi-criteria approach that involves the following criteria:

- Risk of death from type “M” accidents. These are the accidents involving a dangerous good transport and that causes a release of the dangerous goods being transported, in which case the user and/or local residents may be victims of the consequences of this release. DG-QRAM is only involved in the assessment of this first criterion;
- Risk of death from type “C” accidents. These are the accidents involving a dangerous good transport that may cause serious injury or death without the release of dangerous goods;

- Additional parameters describing the vulnerability of routes with regard to accidents involving dangerous goods : natural sites, sensitive structures like bridges, sensitive buildings (e.g. historical ones), industrial sites that might be damaged; population subject to pollution; constraints in case of route unavailability; constraints related to the possibility of the route; distance from rescue services;
- Economic implications of the decision: additional cost of investment resulting from the passage of DG-Transport; additional cost on shippers and hauliers due to restrictions

The method comprises two stages. The first takes the form of a simplified analysis, the results of which determine the value of doing a more in-depth risk assessment in the second stage.

The DG-QRAM model is required in both stages, albeit using a larger data set in the second.

The flowchart in Figure 1 shows what tasks need to be performed and by whom, along with the decisions that the owner needs to take.

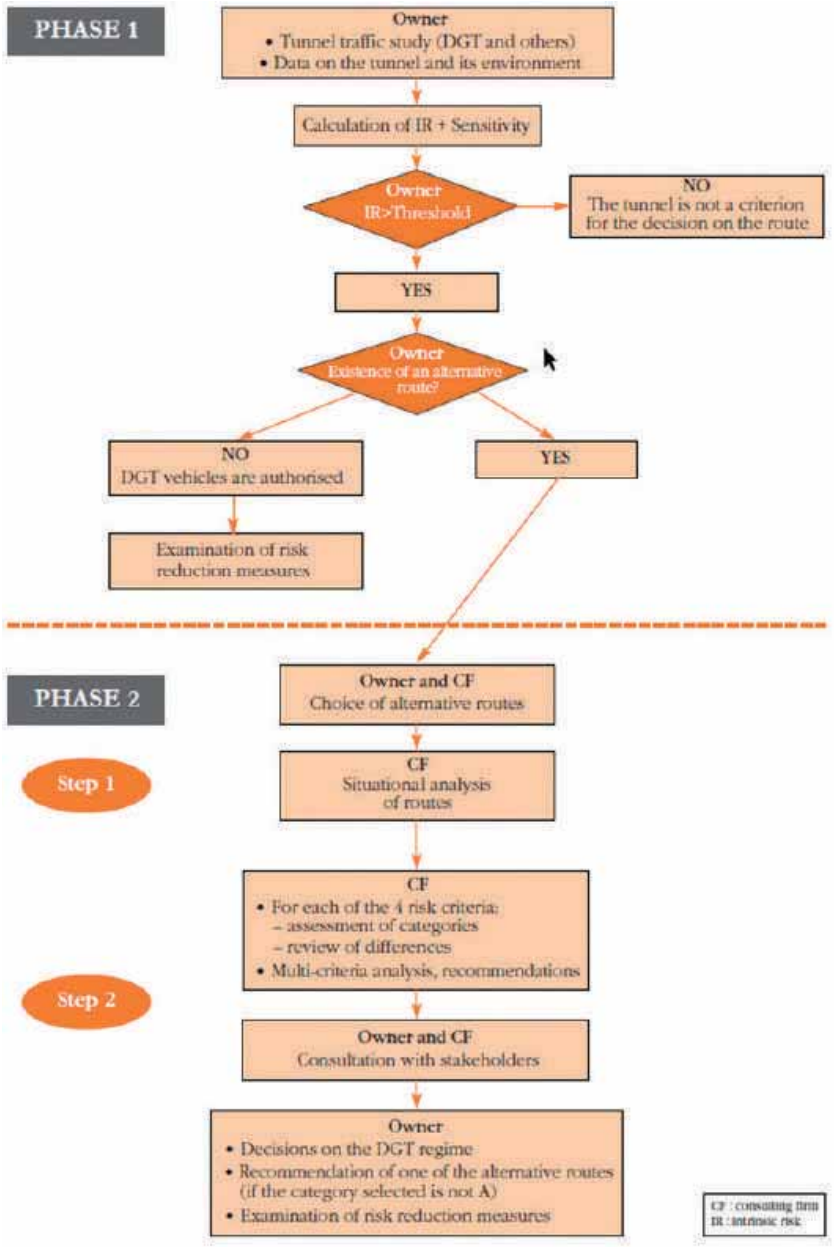


Figure 1: Flowchart of the French method for risk assessment of dangerous good transport related to road tunnels

3.1.1. Phase 1: Assessing intrinsic risk related to the tunnel and determining the existence of one or more alternative routes

This first stage only requires the collection of a limited data set (tunnel characteristics and its operation, tunnel traffic including vehicles carrying dangerous goods, and basic weather information). This data collection concerns only the tunnel in this first stage. The owner approves the data, then uses the QRA model to calculate the mathematical expectation (ME) of fatalities from type "M" accidents for category A tunnels (no restriction on vehicles carrying dangerous goods). This mathematical expectation is known as the intrinsic risk.

If after sensitive analysis, the intrinsic risk is low which means below a reference threshold (0.001), the tunnel is not considered to be of particular concern in terms of DGT-related risks and is not taken into deciding on the DGT regime for the route. At this point, there is no need to take the DGT-related risk analysis any further.

If the intrinsic risk associated with the tunnel is not low, the next step is to determine whether one or more alternative routes exist for vehicles carrying dangerous goods. In exceptional circumstances, there is no alternative route and these vehicles will therefore have no option but to pass through the tunnel. In such a case, the assessment focuses on risk reduction measures (see section 5). If an alternative route exists, the exercise moves to stage 2.

3.1.2. Phase 2: Comparing different categories

The second stage is only carried out if the findings of the first stage show it is necessary. Consistently with the method's objectives, the dangerous goods taken into account on alternative routes are only those which would have been able to go through the tunnel, but which are prohibited from doing so due to the category considered.

This part of the exercise involves the extensive collection of additional data about the route including the tunnel, and about each of the alternative routes. It aids understanding and characterises the DG-Transport-related risks for each possible tunnel category. These categories are then compared in order to reveal the one presenting the lowest level of risk. The level of risk of each possible category depends on the distribution of vehicles carrying dangerous goods between the various routes (the one that includes the tunnel and the alternative routes) but also the characteristics of these routes.

This second stage is divided into two steps.

The first takes the form of a situational analysis, which begins with the selection of the various alternative routes that vehicles carrying dangerous goods might take. Each of these routes is then analysed, along with the route including the tunnel. This analysis should give the consulting firm and stakeholders a clearer picture of these routes and issues surrounding them, as well as providing the input data required for the second step.

The second step begins with an analysis, evaluation and comparison of the possible tunnel categories according to the four assessment criteria. The possible tunnel categories are A, B, C and D/E (D and E are grouped together because they cannot be differentiated in the risk assessment for type "M" accidents); This second step is concluded by a multi-criteria analysis intended to reveal the most appropriate category, or admissible categories, with regard to all the criteria. This analysis helps the owner to make the final decision as to the tunnel category. If the tunnel is assigned to a category other than A, the results of the analysis exercise are used to determine which route hauliers should take when transporting dangerous goods that are not permitted in the tunnel.

3.1.2.1. The use of DG-QRAM for the criteria "Risk of death from type "M" accidents"

The data required for the calculation are collected as part of the analysis of the possible transport routes and its environment. The user then uses the QRA model to calculate the mathematical expectations of death for all the possible categories.

Fuzziness of modelling techniques and hypotheses for phenomena brought into play by the software on the one hand, and uncertainties about input data on the other, require cautious evaluation of the results. Their robustness will thus be tested by a sensitivity analysis on the model's input parameters, namely the local population (20% or possibly more if justified by urban development dynamics), all vehicle traffic (30% or possibly more according to the local or national context) and the accident rate (for example the model's default rate versus the observed rate).

The mathematical expectation (ME) of death for each category (A, B, C and D/E) are then compared pairwise. The difference is assessed as indicated below:

If the ME ratio (For the purpose of the comparison, the ratio will always be such that the numerator will be greater than the denominator):

- is greater than 10: we systematically consider there to be a significant difference between the ME values of the 2 categories
- If the ME ratio is less than 3: we systematically consider there to be a non-significant difference between the 2 categories.
- If the ME ratio is between 3 and 10:
    - it is only considered to be a significant difference between the ME values of the 2 categories if the sensitivity analysis shows situations (considered plausible) where the ME difference is above 10 and does not show any situations where it is below three,
    - the difference is otherwise indeterminate.

The results can be shown clearly in a table. It lists the comparison of pairs of categories in which the difference between the mathematical expectations of death is significant or indeterminate. The indeterminate differences are interpreted with caution particularly for the multi-criteria analysis. Non-significant comparisons between two categories are of little interest (the order of the comparison can be reversed according to variations within the margin of uncertainty).

3.2. Austrian method for dangerous good risk assessment related to road tunnels

3.2.1. Definition of Assessment Process for Austrian Road Tunnels

In principle, the risk involved in the transport of dangerous goods is evaluated in a multi-stage assessment process as illustrated in Figure 2.

3.2.2. Stage 1 – Classification Matrix (Simplified Approach)

The process starts out with a simplified assessment (stage 1) that enables the identification of tunnels with a low dangerous goods transport risk. A classification matrix is used to do so (see Figure 3), which takes into account the tunnel type (bidirectional or unidirectional traffic), the ventilation system, the traffic volume and the percentage of heavy goods vehicles. The respective parameters of the matrix were defined in a former study by systematic risk calculation for selected model tunnels using DG-QRAM. As relevance criteria, a mathematical expected value of 10-3 fatalities/year was applied for the elaboration of the classification matrix. In line with ADR, category A could be chosen for tunnels that, according to the classification matrix, require no further detailed risk analysis.

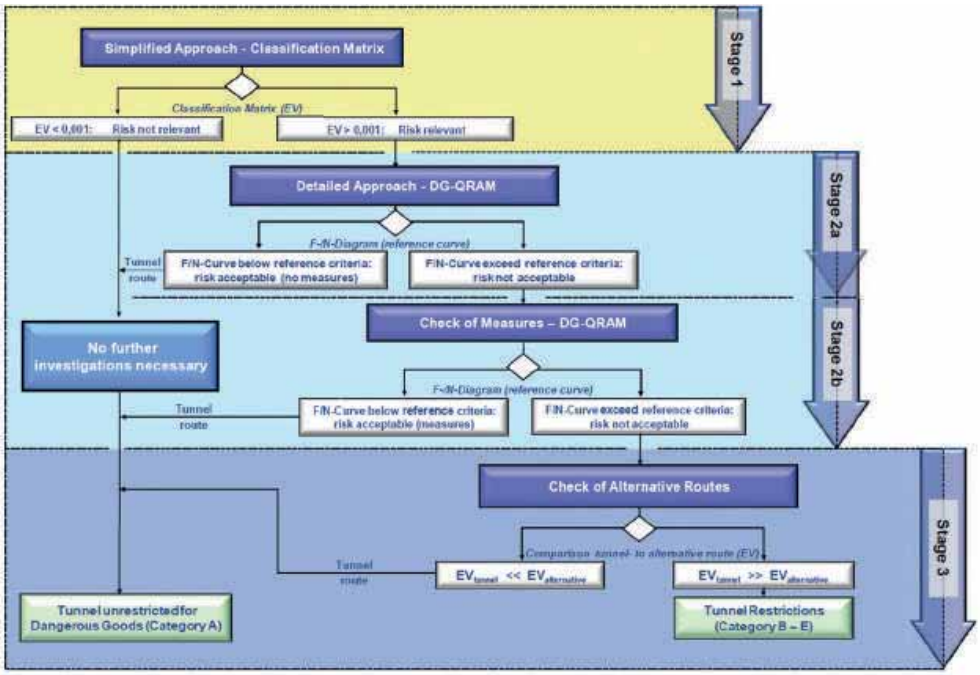


Figure 2 Process of the Austrian method for risk assessment of dangerous good transport related to road tunnels

Type of Traffic	Ventilation System	Tunnel length	Traffic Volume [veh/day]																	
			≤ 5000	≤ 10000				≤ 15000					≤ 20000					≤ 30000		≤40000
	HGV [%]		≤ 25	≤ 10	≤ 15	≤ 20	≤ 25	≤ 5	≤ 10	≤ 15	≤ 20	≤ 25	≤ 5	≤ 10	≤ 15	≤ 20	≤ 25	≤ 5	≥ 10	≥ 5
uni-directional	longitudinal	≤ 700																		
	longitudinal	≤ 1000																		
	longitudinal	≤ 1500																		
	longitudinal	≤ 2000																		
	longitudinal	≤ 2500																		
	longitudinal	≤ 3000																		
	transverse	≤ 4000																		
	transverse	≤ 7000																		
bi-directional	natural	≤ 700																		
	natural	≤ 1000																		
	longitudinal	≤ 1500																		
	longitudinal	≤ 2000																		
	longitudinal	≤ 2500																		
	transverse	≤ 3000																		
	transverse	≤ 4000																		
	transverse	≤ 7000																		

Figure 3 classification matrix of the Austrian method

3.2.3. Stage 2 – Detailed Approach (DG-QRAM)

All those tunnels for which a relevant dangerous goods risk is indicated by this simplified approach are subsequently reviewed in a detailed risk study approach. A tunnel-specific risk analysis is performed, using the DG-QRAM model (Stage 2a). In Stage 2, a comparison with a defined reference criterion is made in the F-N diagram for the tunnel system under evaluation (see. Figure 4).

If the reference criterion in the F-N diagram is exceeded, the dangerous goods risk is rated as unacceptable and special additional risk reduction measures are to be investigated (Stage 2b).

Considerations made to reduce the risk predominantly focus on organisational and operational measures. In this context, not every measure is equally suited or efficient. The envisioned measures will thus have to be checked individually for the respective tunnel system in an in-depth risk analysis.

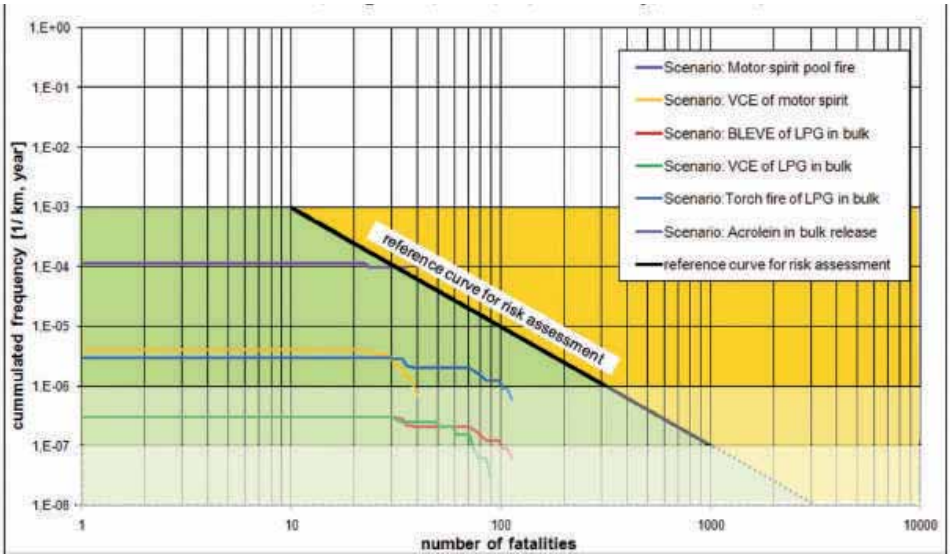


Figure 4 Reference curve assessment criteria in the F-N diagram (example)

3.2.4. Stage 3 – Alternative Route

If the F/N curve still exceeds the reference criteria despite the risk reduction measures taken into account in stage 2, transport restrictions for certain DG-groups must be considered. In this case it is to be checked, whether an adequate alternative route actually exists. A road only qualifies as alternative route if the entire road segment is suited and approved for heavy goods traffic. This check involves such aspects as number of lanes, longitudinal gradient, curve radii, road width, etc. to be reviewed on a case-to-case basis. If a suitable alternative route exists, the risk (mathematical expected value of deaths) of the DG transport on it for the exposed groups of people is assessed. It is then compared to the risk of DG transport through the tunnel for the tunnel users and the exposed population along the tunnel route. If the risk is significantly lower on the alternative route, then a category between B and E has to be chosen (similar to the French approach).

4. DESCRIPTION OF THE RISK MODEL AND ITS APPLICATION

In a nutshell, DG-QRAM is based on scenarios of dangerous phenomena. The societal risk of each scenarios can be evaluated for different routes. The calculation takes into account accident frequencies (derived from historical data), physical consequences of incidents within tunnel and along open routes, escape and sheltering effects, effects of hazards (such as heat and smoke) on people. The societal risk calculated reflects the range of possible outcomes of an accident, each with different probabilities. There might be a low chance of injuring most of the people in a town, or a higher chance of injuring just a few of them. This relationship is illustrated by an F/N curve, where F is the frequency of N or more fatalities (and/or injuries). Each curve can also be evaluated in terms of a single value representing the average number of fatalities per year (the mathematical Expected Value). The F-N curves can be produced for fatalities and/or injuries, and for road users and/or the local population. Then the scenarios results can be aggregated as needed.

The QRAM runs in an Excel environment, with help of VBA (Visual Basic Application) libraries.

More detail concerning the use of DG-QRAM, its sub-tools imbrication and its functioning (especially how the probabilities and consequences are assessed) can be found respectively in the User's guide and the reference manual of the software.

The current version 4.04 of the QRAM is compatible with the 32 and 64 bits versions of Windows 7 to 10 and Excel 2007 to 2016 although it might work with more recent environment and software with non-significant differences in the results.

4.1. A model based on representative accident scenarios

A complete assessment of the risks involved in transporting dangerous goods would require the consideration of all kinds of dangerous materials, all possible meteorological conditions, all possible incidents, sizes of breaches, vehicles fully or partially loaded and many other variables. Since all circumstances are impossible to consider, simplifications have to be made.

Several thousands of goods are listed in the ADR. A number of events representative of the main risks associated with the transported goods were therefore selected in order not to make the process too cumbersome, and given the degree of precision that can be achieved with this type of model.

As a result, DG-QRAM covers a limited number of dangerous-good-and-packaging pairs, which are combined with certain accident types in which these pairs may be involved. Consequently, DG-QRAM uses 13 base scenarios which are considered representative of mass casualty events.

Scenario No.	Description	Capacity	Size of breach (mm)	Mass flow rate (kg/s)
1	HGV fire – 20 MW (no dangerous material)	-	-	-
2	HGV fire – 100 MW (no dangerous material)	-	-	-
3	BLEVE[20] in a 50 kg LPG cylinder	50 kg	-	-
4	Premium petrol pool fire	28 tonnes	100	20,6
5	Premium petrol VCE[21]	28 tonnes	100	20,6
6	Chlorine spill	20 tonnes	50	45
7	BLEVE in an LPG tanker	18 tonnes	-	-
8	VCE of LPG	18 tonnes	50	36
9	Jet fire in an LPG tanker	18 tonnes	50	36
10	Ammonia spill	20 tonnes	50	36
11	Acrolein tanker spill	25 tonnes	100	24,8
12	Acrolein cylinder spill	100 litres	4	0,02
13	BLEVE of non-flammable gas (CO_2)	20 tonnes	-	-

Figure 5- List of scenarios included in DG-QRAM

The uses of scenario 1 and 2 depends on the assumptions of the methodological framework in which DG-QRAM is involved. For instance none of the two scenarios is used in the French and Austrian methodologies. Although it might be tempting to use scenarios 1 and/or 2 for non-dangerous good transport (which is still possible in the current version 4.04 to fulfil a specific ancient need), it is highly not recommended. By the way, this possibility will be removed from the new version to be released (see. the part "improvement phase"). Indeed as indicated above, DG-QRAM must be only used for dangerous goods transport risk assessment.

DG-QRAM also includes three optional scenarios for radioactive substances (see Figure 6). These should only be used in exceptional circumstances (e.g. in the vicinity of an installation involving the transport of large quantities of radioactive substances).

Scenario No.	Description	Capacity	Size of breach (mm)	Mass flow rate (kg/s)
14	Release of natural UF	9,471 kg	50	360
15	Release of enriched UF	1,743 kg	50	360
16	Radioactive source (gamma radiation)	-	-	-

Figure 6 optional scenarios (generally not relevant)

All scenarios are not necessarily relevant in each case. Scenarios are first selected based on the relevance for the country in which the calculation is performed. For example, scenario 6 (chlorine) can be skipped if the considered country is a country where chlorine is not transported by road in bulk tankers. Of course the scenarios effectively taken into account in the calculation depend on the dangerous good traffic characteristics, which should be determined carefully based on a sufficiently reliable data base.

4.2. A model adapted to various and complex situations

DG-QRAM was developed as a very flexible tool able to deal with complex situations (for instance routes that differs as a function of time periods and/or direction). As a corollary, the resulting software itself is very complex and needs a substantial amount of data.

4.2.1. Two possible approaches for taking into account local population in open sections

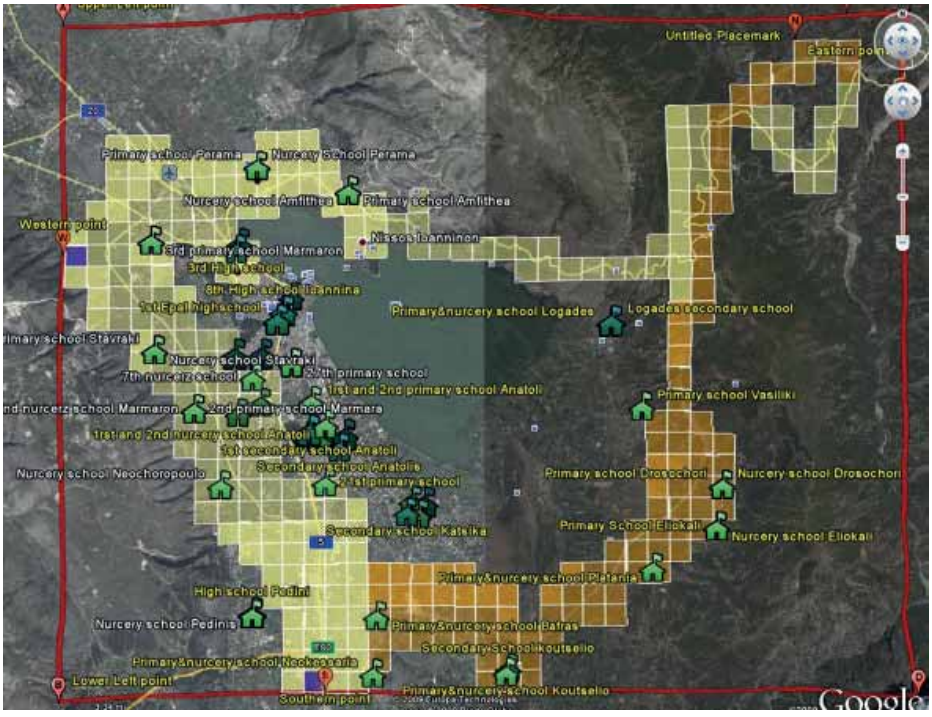


Figure 7- example of grid for 2D description of the population

For the open sections, two very different approaches are possible for taking into account local population:

1. a simplifying one (called 1D) where local population densities are considered as uniform along parts of the route (probabilities to get wind in a certain direction are not needed). In this case different densities can be chosen for each route segment;
2. a 2D description of the populations and a directional wind rose to deal with the meteorological aspects.

The 2D description is achieved throughout an excel grid (see example in Figure 7), for each period of time.

4.2.2. Possible differences between directions and division into sections

To make the risk assessment more accurate, for a considered route it is possible to:

- indicate that the route directions have not the same characteristics which allows for example the user to define a route with geographic discrepancies between the two directions but also different traffic/accident rate characteristics between the two directions.
- Divide the route in homogenous sections in order to take into account relevant differences (see Figure 8). It is possible to consider:
  - o periods differing by their traffic or its composition, or local population, or a lot of other parameters such as the number of people inside of the vehicles or the accident frequencies etc. The division into sections is required to achieve homogeneous parameters for a given period and direction.
  - o sections where the two traffic directions pass on geographically different roads.

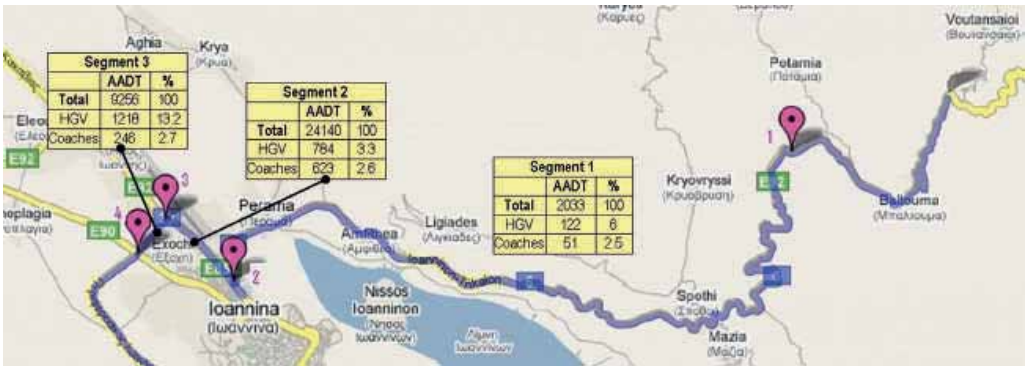


Figure 8 example of route division into sections

4.2.3. A wide range of possibilities in terms of input and their accuracy

Different time periods can be chosen (maximum 3) and for each one a time ratio can be entered. The denominations suggest a fractionating of the day (or of the year for tourist resorts with seasonal peaks). Periods may differ by traffic and also by local population density.

For each period and direction, default values are proposed for the average number of people per light vehicle, Heavy good vehicles (HGV) and BUS/coach but can be modified by the user if more accurate and reliable data for the specific case studies are available.

Concerning the proportion of each DG type (for example LPG in cylinder or flammable liquids) in the DG traffic, national default values can be used (if applicable). However it is strongly recommended to use specific data for each individual application for example based on a traffic survey with collection of UN numbers and DG hazard codes. The empty Lorries traffic can also be taken into account.

For each route section, the number of lanes, the traffic, local population data and the accident rates can be defined for each time period. The proportion of HGV and Bus coaches are taken into account and average speed of HGV/Bus can be different from the one of light vehicle. It is also possible to indicate if the section is urban of rural which induces differences in the risk calculation. To take into account the extension of a traffic jam after an accident occurred, the delay for stopping approaching traffic can be defined. Concerning accident rates, default' values are proposed but can, once again, be customised if more accurate ones are available (especially local ones), provided that they are reliable (especially based on robust statistical data).

If the section is a tunnel, precise input will be required in terms of geometrical characteristics, ventilation (with distinction between normal and emergency situation), emergency exits, operating and safety devices, and drainage. It also possible to perform calculation by using sub-segments of the tunnel to provide better resolution of the dangerous phenomenon.

5. THE DG-QRAM UPDATING AND UPGRADING PROJECT

Over the years before 2015, certain users have faced difficulties in installing and operating of the software. This was caused by the incompatibility of the more recent computer operating systems with the DG-QRAM version 3.60 and the fact that this software was based on old versions of Microsoft Excel which are no longer available.

As asked by PIARC, the technical Committee on Road Tunnel Operations has decided to investigate possible solutions to overcome this problem. A task group has been set up under the umbrella of this committee with the first objective of updating the tool to make it compatible with more recent versions of the software that it is based on. With the release of the version 4.04 of the software, this objective was achieved in 2019 along with the correction of three bugs.

Within the discussion of the task group, funding countries representatives expressed the need of upgrading the software. Then, a set of improvements was decided and ranked under the approval of PIARC general secretary. A consultant (ENALOS) was hired to technically detail these improvements and define tests in order to verify their successful implementation. Then a contractor (BG with ILF as subcontractor) was hired in order to implement these improvements under the supervision of the consultant. The three co-authors of this article belonging to BG, ILF and ENALOS are experts in the DG risk analysis and the use of DGQRA. They have involved their respective team of engineers, especially Philippe Cassini in BG team, who was the main designer and developer of the initial version of DG-QRAM (3.61).

The available budget enabled to implement the five prioritised improvements as presented below. They have all been achieved and the provisional DG-QRAM version that integrates these improvements has been validated.

5.1. Improvement 1: get a result for each ADR category

The current software version (v4.04) provides results (Expected Values or F/N curves) for each scenario and groups of scenarios. For a user fully aware of the DG-QRAM functionalities and the correspondence between its scenarios and the goods codes of the ADR, it is possible to deduce from these output the results for each ADR category. But this is complex, needs expertise and introduces a risk of mistakes.

So this improvement enables to automatically obtain the result (EVs and F/N curves) for each ADR category in addition to the results already provided by the tool. Two DG-QRAM modifications were proposed to reach this goal:

1. for a given route (for example with a tunnel), F/N curves are built and EVs for each ADR category are calculated which allow to compare these results with acceptance criteria (if available). DG-QRAM out-

put files are completed by an additional graphical display of the 5 F/N curves obtained for each ADR category and the legend of the graph includes the 5 corresponding EVs;

2. for a route with a tunnel whose category has to be assessed and a possible alternative route, global (sum of the risks contributions of the two routes) F/N curves are built and global EVs are calculated for each category. A simple new additional tool has been developed to do so. This tool extracts results from 2 previous QRA calculations, one for a route with the tunnel whose category is questioned, and an alternative route without this tunnel. It combines the results found in the 2 previous route calculations and calculates a global (tunnel route + alternative route) EV and F/N curve for each one of the 5 ADR categories.

In Figure 9, Figure 10 and Figure 11, three illustrations show what the additional tool is able to provide on the basis of F/N curves obtained with DG-QRAM for a tunnel route and an alternative route.

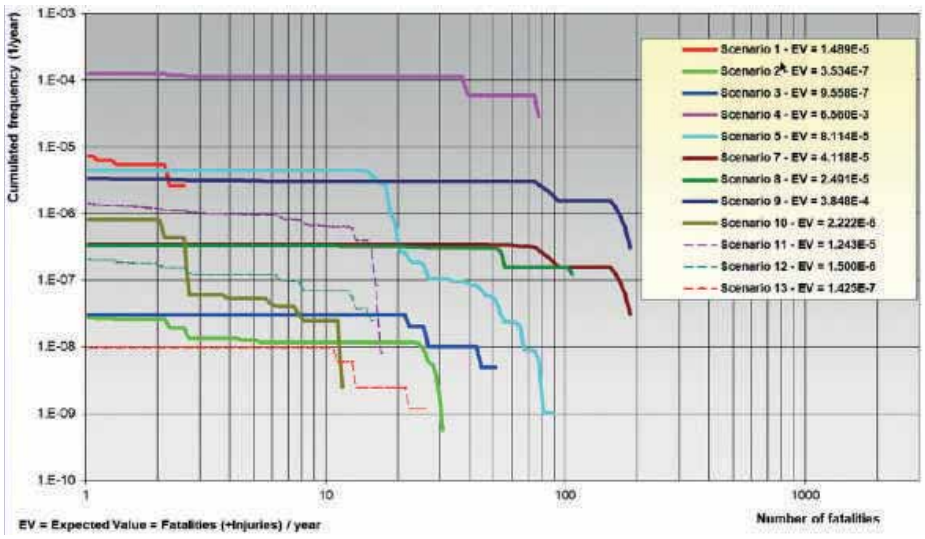


Figure 9- F/N curves and EVs for the tunnel route

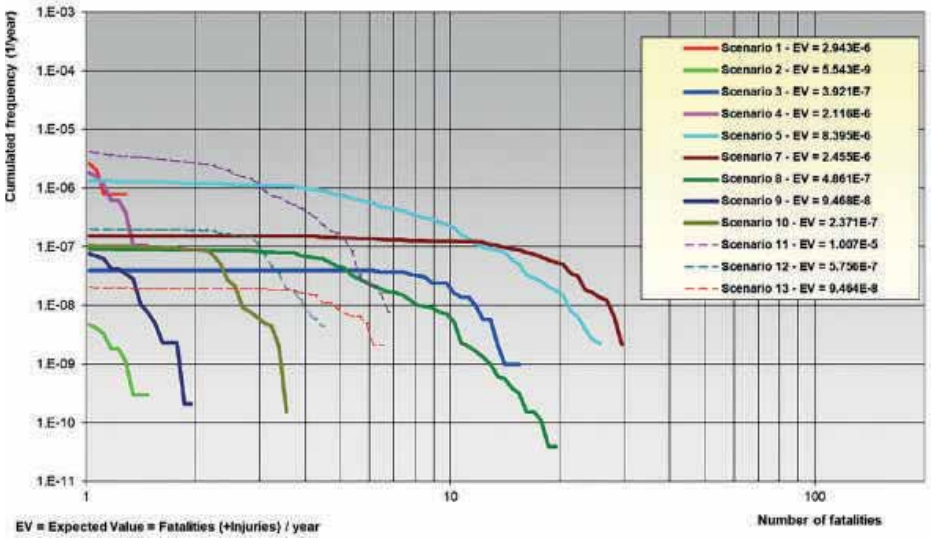


Figure 10- F/N curves and EVs for the alternative route

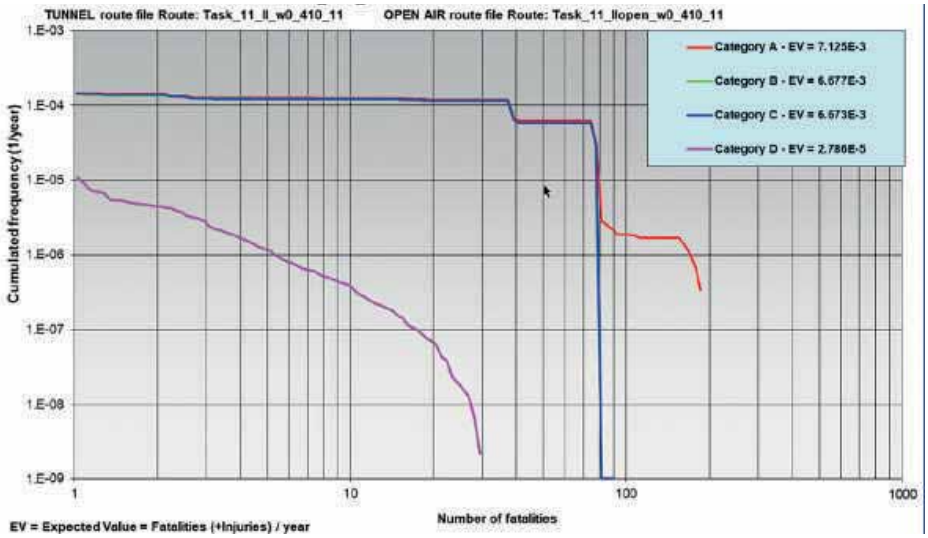


Figure 11- F/N curves and EVs of the tunnel categories taking into account tunnel route and alternative route

5.2. Improvement 2: improve guidelines

The main guideline improvements are:

a. Update and completion of the existing guidelines
   - including advice for data collection
   - explaining how an expert user can deal with the scenarios 11 and 12 and change the toxicity parameter
   - addressing the issues of empty vehicles and "non- identified" dangerous goods (without UN numbers) and giving advice to take these vehicle types into account in the calculation in order to allow countries to adapt their national methodologies
   - giving advices on the choice of data (accident rates, conditional probabilities)
   - giving advices on how to link HGV data with DG-HGV data
   - giving advices on the use of default statistic values
   - giving advices how to distinguish categories E and D (without using any results from DG-QRAM) for countries that don't use scenario 1 and 2

b. Enhance the existing guideline with a specific table and appropriates explanation for the selection of scenarios and the calculation of traffic composition in terms of percentages

c. Add tool guideline in the current manuals regarding:
   - the issue of empty vehicles and "non- identified" dangerous goods (without UN numbers)
   - the link between classes and scenarios for non-expert users (based only on hazard identification number and UN codes of the transported substances)
   - the explanation about class 1 that generally is not relevant in QRA calculations and how this class can be taken into account (without using DG-QRAM) when it is necessary for the user.
   - the explanations about class 8, class 4, class 5 and class 9 and how this classes (or some specific dangerous goods from these classes) can be taken into account.

5.3. Improvement 3: skip scenario 1&2 for HGV without dangerous good

Until version 4.04, DG-QRAM allows users to take into account HGV without dangerous good in by two conventional fire scenarios (20 MW and 100 MW).

Hence this possibility is clearly linked to risks which are not associated with DG- transport, it has therefore be skipped (see Figure 12 and Figure 13), to avoid blurring of results and consecutive misinterpretation. Indeed as indicated previously DG-QRAM software should only be used for DG-Transport risk assessment.

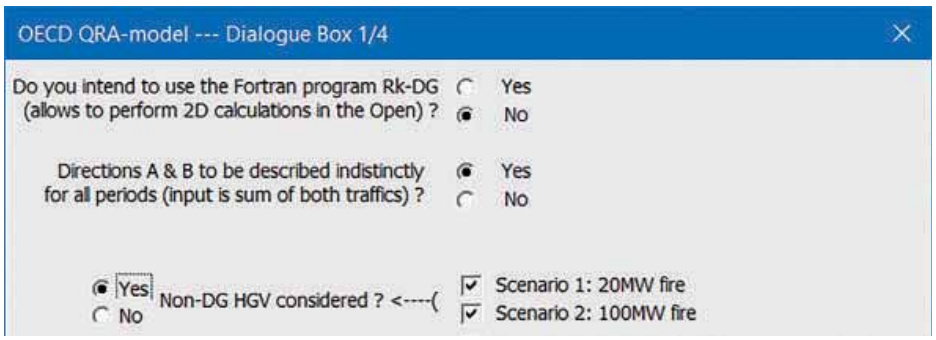


Figure 12- scenario 1&2 in DG-QRAM version 4.04

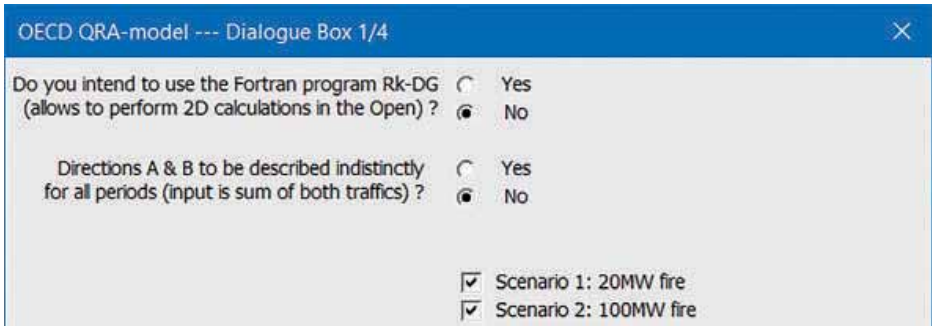


Figure 13- scenario 1&2 in DG-QRAM new version

5.4. Improvement 4: replace urban/rural parameters by other influencing ones

When describing a road section in DG-QRAM a user has to choose between the two parameters urban and rural. Until the current version (4.04), selecting one of these two values of this parameter had the following influence on the calculation:

- It determines the exposure / vulnerability of the road users and local population to the hazards related to the different QRA scenarios.
- It determines the conditional probability a DG-scenario occurs once an accident happened, i.e. how likely dangerous goods will be released in case of an accident involving a DG transport (with respect also to the infrastructure : tunnel or open road).

While the terminology of "urban" and "rural" fits well to the exposure description, it often leads to misunderstandings regarding the scenarios' conditional probabilities these were determined with speed as primary influencing parameter. Indeed, slower traffic speeds are generally associated with urban roads, while higher traffic speeds are associated with rural roads which doesn't fit in every context. For example, a user describing an urban motorway would select the parameter urban. In regard to the people´s exposure this is the right choice, but considering the conditional probabilities it leads to an underestimation as the urban scenarios

probability values are lower than the rural ones because of a lower speed even though the speed limit of a motorway is better reflected by the speed limits of rural roads than by the speed limits of urban roads.

So two main modifications have been achieved:

- Uncouple urban/rural parameter and speed parameters. This means that the urban/rural parameter shall only be used to describe the people's exposure / vulnerability to the hazards of different QRAM scenarios.
- Define and implement a relationship between the traffic mean speed and the conditional probability to get a scenario once a traffic accident involving the right kind of DG vehicle has occurred.

5.5. Improvement 5: Set up a better Data Input Interface (DII)

With the aim to enhance the way to enter data in DG-QRAM, it has been decided to adapt the already existing French data input interfaces so to generate an internationally applicable

Data Input Interface (DII) that facilitates tunnel assessments. Thereby, "tunnel assessments" are assessments considering tunnels only (no open road sections, no 2D calculations).

The user still has the capability to make any desired changes in Data Input file generated for run in DG-QRAM. He same applies also to the DG distribution, for which the Data Input Interface (DII) does not provide the capability to enter different data for each traffic period per direction. If there are data for altered DG distribution sets for each traffic period, the user can edit accordingly the Data Input file created by the process of DII transcription

The new interface has the advantage to avoid relevant mistakes that can be made with the original version of the tool, which may remain unnoticed by the users who will take the result for granted. The most known example is when the user defines a one tube bidirectional tunnel in the model while thinking defining a unidirectional one with two tubes.

The new interface also provides informative messages (e.g. ventilation sketch see Figure 14) and consistency checks which is not the case with the old version of DG-QRAM.

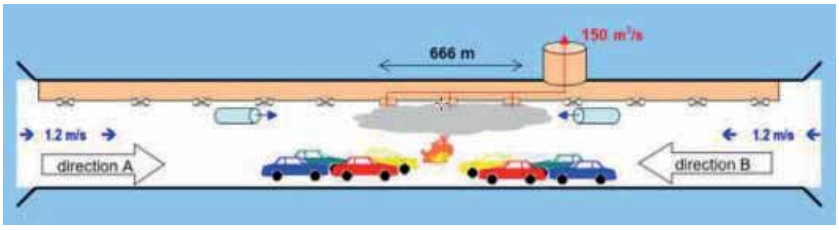


Figure 14- ventilation sketch

The consistency check includes:

- Data validation: restrictions to avoid unrealistic data and descriptions (number of lanes, number of time periods, traffic numbers and vehicle occupancies, tunnel geometry and drainage system, ventilation parameters, accident rates)
- Warning message for inconsistent ventilation parameters (see Figure 15)
- Error message for impossible file naming

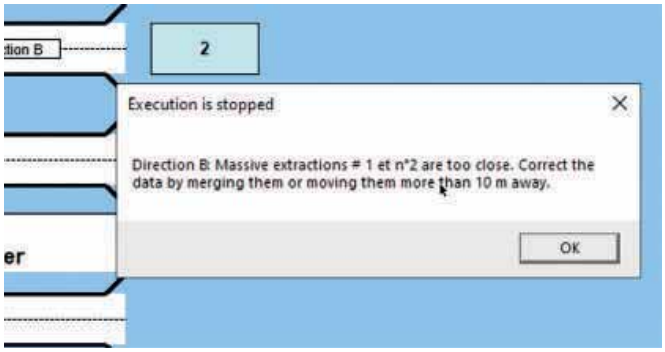


Figure 15 example of warning message for a ventilation inconsistency

ANÁLISIS DE RIESGO DE LOS TÚNELES URBANOS DE LA PLAZA DE LES GLÒRIES EN BARCELONA

Iván Perea Méndez
ESTEYCO S.A.

Debido a la imposibilidad de implementar todos los requisitos de seguridad establecidos en la normativa vigente se ha desarrollado un análisis de riesgo mediante la metodología MARTE, Método General, del Ministerio de Fomento, para determinar el grado de seguridad de los túneles viarios de Glòries, en Barcelona.

La metodología utilizada se ha adaptado a la Instrucción Técnica de Túneles Viarios Urbanos de la Ciudad de Barcelona, siendo ésta la normativa aplicable al diseño, construcción y explotación del túnel, y que recoge la idiosincrasia propia de los túneles urbanos.

En este análisis se realiza un estudio detallado de los riesgos asociados a la explotación del túnel y se concluye, con una evaluación cuantitativa, si estos son seguros. Este procedimiento se basa en la comparación del túnel objeto del estudio con un túnel virtual de referencia.

Al final del proceso, después de la comparación entre los niveles de aceptación marcados en la metodología, se determina si los equipamientos alternativos o complementarios propuestos para el túnel permiten obtener un nivel de seguridad adecuado para su explotación.

La metodología proporciona un índice de riesgo para cada túnel, puesto que se analizan los dos tubos de forma independiente. Si este índice se sitúa por debajo de 1,15 se considera que el túnel es seguro. En el caso de los túneles de Glòries ambos tubos han obtenido un índice inferior al 1,15 objetivo y por lo tanto podemos concluir que los túneles se pueden catalogar como túneles seguros.

RISK ANALYSIS OF THE URBAN TUNNELS OF PLAÇA DE LES GLÒRIES IN BARCELONA

Due to the impossibility of implementing all the safety requirements established in the current regulations, a risk analysis has been developed using the MARTE methodology, General Method, of the Ministerio de Fomento of the Spanish Government, to determine the level of safety of the Glòries road tunnels in Barcelona.

The methodology used has been adapted to the Technical Instruction on Urban Road Tunnels of the City of Barcelona, which is the regulation applicable to the design, construction, and operation of the tunnel, and which considers the idiosyncrasies of urban road tunnels.

This analysis makes a detailed study of the risks associated with the operation of the tunnels and concludes, with a quantitative assessment, whether they are safe. This procedure is based on the comparison of the tunnel under study with a virtual reference tunnel.

At the end of the process, after the comparison between the levels of acceptance marked in the methodology, it is determined whether the alternative or complementary equipment proposed for the tunnels allows to obtain an adequate level of safety for its operation.

The methodology provides a risk index for each tunnel, since the two tubes are analyzed independently. If this index is below 1.15, the tunnel is considered safe. In the case of the Glòries tunnels, both tubes have obtained an index lower than the target 1.15 and we can therefore conclude that the tunnels can be classified as safe tunnels.

ANALYSE DES RISQUES DES TUNNELS URBAINS DE LA PLAÇA DE LES GLÒRIES À BARCELONE

En raison de l'impossibilité de mettre en œuvre toutes les exigences de sécurité établies dans la réglementation actuelle, une analyse des risques a été réalisée à l'aide de la méthodologie MARTE, méthode générale, du ministère des travaux publics, afin de déterminer le degré de sécurité des tunnels routiers de Glòries à Barcelone.

La méthodologie utilisée a été adaptée à l'instruction technique sur les tunnels routiers urbains de la ville de Barcelone, qui est la réglementation applicable à la conception, la construction et l'exploitation du tunnel, et qui reflète les particularités des tunnels urbains.

Dans cette analyse, une étude détaillée des risques liés à l'exploitation du tunnel est réalisée et une évaluation quantitative est faite pour conclure si ces risques sont sûrs. Cette procédure est basée sur une comparaison du tunnel étudié avec un tunnel de référence virtuel.

Au terme du processus, après comparaison entre les niveaux d'acceptation définis dans la méthodologie, il est déterminé si l'équipement alternatif ou complémentaire proposé pour le tunnel permet d'obtenir un niveau de sécurité adéquat pour son exploitation.

La méthodologie fournit un indice de risque pour chaque tunnel, puisque les deux tubes sont analysés indépendamment. Si cet indice est inférieur à 1,15, le tunnel est considéré comme sûr. Dans le cas des tunnels de Glòries, les deux tubes ont obtenu un indice inférieur à l'objectif de 1,15 et nous pouvons donc conclure que les tunnels peuvent être classés comme des tunnels sûrs.

INTRODUCCIÓN: EL TÚNEL DE GLÒRIES

La Plaza de les Glòries se encuentra en la intersección de tres de las avenidas más importantes de la Ciudad de Barcelona: la Avenida Diagonal, la Avenida Meridiana y la Gran Vía de las Cortes Catalanas. El ámbito se caracterizaba por ordenar el tráfico mediante un nudo viario elevado que priorizaba el uso del espacio público para los vehículos.

Figura 1.- Trazado de los Túneles de Glòries

Con la construcción del túnel de Glorias se ha soterrado gran parte del tráfico que circulaba en superficie y se ha cambiado el uso del espacio público, priorizando el espacio para los peatones y permitiendo la construcción de un gran parque de 10 Ha. sobre el túnel. Las obras de construcción de los túneles se iniciaron en abril de 2015 y han supuesto una inversión total de 192 millones de euros. La puesta en servicio de los mismos se ha realizado en dos fases, entrando en servicio el túnel dirección salida de la ciudad en octubre de 2021 mientras que el túnel de entrada a la ciudad ha entrado en servicio en marzo de 2022.

Los túneles de Glòries están formados por dos galerías independientes de 958m. de longitud, con 3 carriles por sentido, pasando por debajo de 4 túneles ferroviarios existentes. En su punto bajo el túnel tiene una profundidad de 30m. situándose 15m. por debajo del nivel freático.

La sección tipo se resuelve con 3 carriles de circulación por tubo, de 3,05 metros de anchura los dos destinados al vehículo privado y de 3,25m. el carril reservado a autobuses y taxi. El gálibo vertical mínimo en el interior del túnel es de 5 metros. En el lado derecho se dispone una acera de 80cm. para evacuación en caso de emergencia. En el lado izquierdo el ancho de la acera es de 50cm.

La velocidad de proyecto es de Vp= 50km/h. La velocidad de circulación está limitada a 50 km/h y está controlada por un radar de tramo.

Se prevé que circulen diariamente 60.000 vehículos por el tubo mar (sentido salida) y 56.800 vehículos por el tubo montaña (sentido entrada a la ciudad).

Figura 2.- Imagen de la galería lado mar de los Túneles de Glòries

GEOMETRÍA Y TRAZADO DEL TÚNEL

Los túneles siguen la traza de la Gran Vía estando orientados en sentido NE-SW, pasando por debajo de 4 túneles ferroviarios existentes: la Línea 1 de metro, y las líneas de Cercanías R1 Maçanet - Massanes, R3 Manresa y R4 Puigcerdà que comparten túnel y la línea R2 Estación de Francia –Sants.

Los túneles están formados por dos tubos independientes, con circulación unidireccional. Los túneles tienen una longitud de 958m. y tienen sus bocas en la calle Castillejos y en la Rambla de Poblenou, pasando estas dos calles por encima de la cubierta del túnel.

El trazado en planta del túnel es muy rectilíneo y casi simétrico en ambos sentidos. Desde Gran Vía lado Castillejos tiene una sucesión de rectas y radios, en los que el radio mayor es de 2.000 y el menor de 1.500 y a partir de la calle Badajoz es completamente rectilíneo.

El tramo entre las calles Castillejos y Badajoz es el que realmente resuelve y condiciona la futura plaza de las Glòries. El túnel pasa por debajo de los túneles ferroviarios del enlace E. Francia – E. Sants y las líneas Manresa - Puigcerdà y Maçanet – Massanes, a partir de donde empieza a recuperar cota pasando bajo la L1 del Metro para situarse a 1,50m. por debajo de la superficie a la altura de la calle de Ciudad de Granada. A partir de este punto, hasta la Rambla de Poblenou se ha ajustado el trazado adaptándolo a la rasante de la Gran Vía en superficie y dejando un resguardo de 1,50m. aproximadamente, para posibilitar el paso de servicios y el ajardinamiento sobre la cubierta.

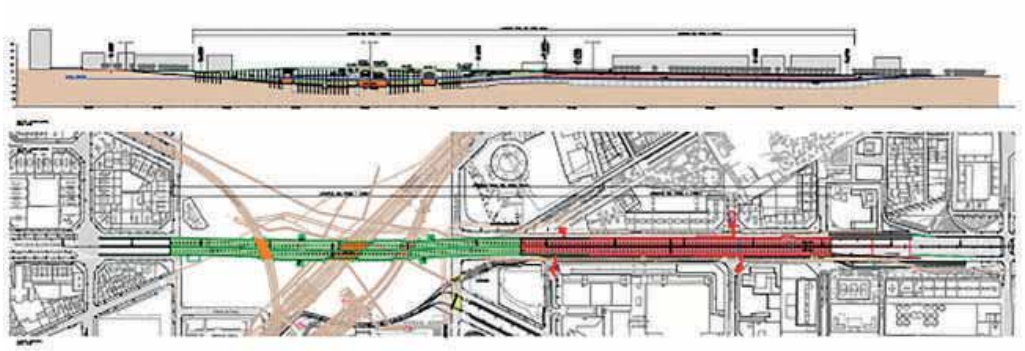


Figura 2b.- Planta y perfil longitudinal de los Túneles de Glòries.

La rasante del túnel conecta con la de la Gran Vía en la boca oeste con un acuerdo convexo de Kv=400 de unos 28m. de longitud. Continúa con una pendiente constante de -7,78% de 256m. que conecta con un acuerdo vertical cóncavo de Kv=1.300 de 204m. Éste sigue con una pendiente constante del 7,9% de 84,9 m que conecta con un acuerdo vertical convexo de Kv=900 de 80,1 m. Este acuerdo conecta con una pendiente constante del 0,99% de 370 metros de longitud que conecta con un acuerdo vertical cóncavo de Kv=900 y longitud de 71m. Desde este acuerdo se inicia la rampa de salida del túnel con una pendiente del 6,90% y 49m. de longitud que acaba con un acuerdo convexo de Kv=632,91 y 50m. de longitud. Este acuerdo conecta con la pendiente de la Gran Vía que en este punto es del -1%.

En el primer tramo del túnel se forma un punto bajo en el P.K.0+410 a una cota de -11,51m. bajo el nivel del mar. En este primer tramo también se crea un punto alto sobre el P.K.0+669 a una cota de 2,07 sobre el nivel del mar desde donde se empieza a bajar hacia el segundo tramo del túnel.

Este segundo tramo tiene su punto bajo en el P.K.1+056 a una cota de -1,67m bajo el nivel del mar. El punto alto se encuentra al P.K.1+219 a una cota de +5,35 sobre el nivel del mar, ya en la rampa de salida a la conexión con la Gran Vía.

En su punto de máxima excavación el túnel se sitúa a 15m. por debajo del nivel freático quedando su sección completamente sumergida en una gran parte del trazado.

Figura 3.- Vista aérea de las obras de construcción del túnel (mayo de 2019).

El túnel se resuelve con 3 tipos de secciones en función del ancho de la calzada y el procedimiento constructivo llevado a cabo:

- Sección tipo estándar: Sección ejecutada mediante el método "cut and cover". Una vez ejecutadas las pantallas y la cubierta del túnel se procede a la excavación bajo cubierta. La anchura entre las pantallas laterales del túnel (calzada más aceras) es de 11,85m.

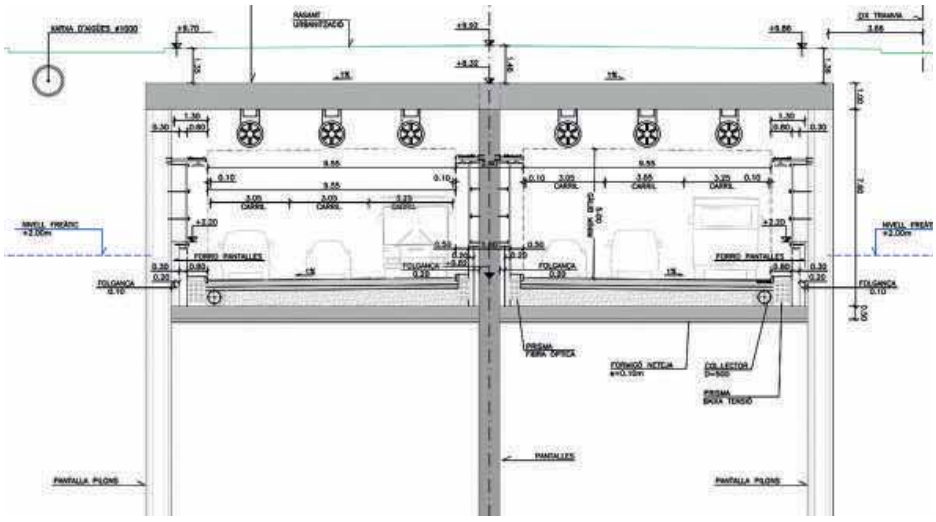


Figura 4. Sección tipo "cut and cover".

- Sección tipo con apartaderos en pozos de ataque: Sección construida entre pantallas en los pozos de ataque de los tramos en mina. Conforme se realiza la excavación desde superficie se construyen una serie de niveles de puntales que acodalan las pantallas. Posteriormente se ejecuta la cubierta con losas alveolares apoyadas en los puntales superiores. La anchura mínima entre las pantallas laterales del túnel es de 14,05m, con un apartadero de 2,20m. de ancho mínimo.

- Sección tipo en mina: Tiene una anchura entre muros laterales de 11,55m. Se construye en mina bajo un paraguas de tubos hincados de 1.100mm. de diámetro. Esta sección se encuentra en el paso bajo las infraestructuras ferroviarias.

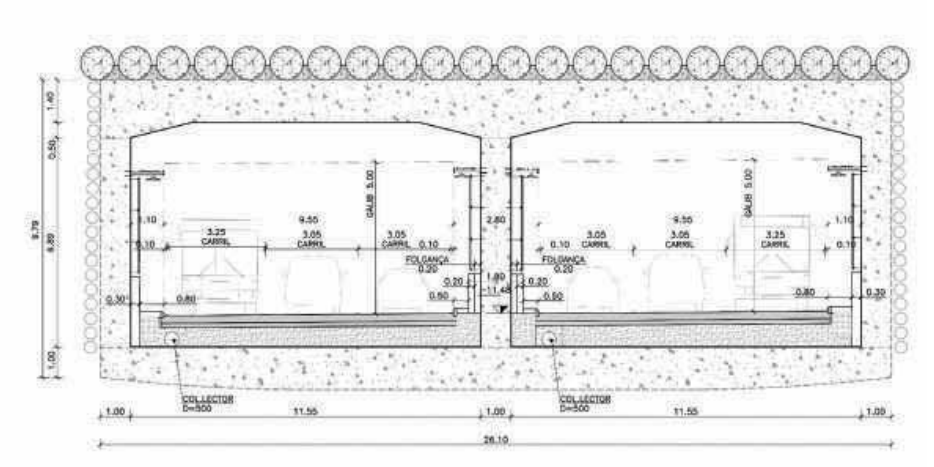


Figura 5.- Sección tipo en mina bajo las infraestructuras ferroviarias

La estructura principal del túnel, salidas de emergencia, salas técnicas y vestíbulos entre túneles y salidas de emergencia y entre túneles y salas técnicas se ha diseñado con una resistencia al fuego tipo HCN120 R240 según las curvas de fuego normalizadas en la Instrucción de Técnica de Túneles Viarios Urbanos de la ciudad de Barcelona, que es la normativa específica de referencia aplicable a los túneles urbanos en Barcelona.

INSTALACIONES DE TÚNEL

Las instalaciones de los túneles de Glorias se han diseñado siguiendo las prescripciones definidas en la Instrucción Técnica de Túneles Viarios Urbanos de la Ciudad de Barcelona. El túnel que se genera a raíz de la cobertura se clasifica como tipo C según la Instrucción Técnica de Túneles por su longitud comprendida entre los 500 y los 1.000 metros.

El túnel dispone de dos salas técnicas. Estas dependencias se componen de una sala de baja tensión, una sala de media tensión, una sala de telecomunicaciones, una sala de equipos PCI, un lavabo y una sala de reserva o almacén. El acceso se produce por un edículo desde la superficie.

Figura 6.- Edículo de acceso a la sala técnica del túnel.

Se equipa al túnel con las siguientes instalaciones y equipamientos para asegurar su correcta funcionalidad y alcanzar los niveles de seguridad requeridos en la normativa:

- Distribución eléctrica. Doble acometida en media tensión.
- Distribución en baja tensión y red de toma de tierra. Compensación de reactiva.
- Alumbrado de túnel. Alumbrado de seguridad y de emergencia. Tecnología LED.
- Suministro preferente con SAI con una autonomía mínima de 20 minutos.
- Climatización de las salas técnicas. Control de humedad y temperatura en salas de TC.
- Ventilación longitudinal del túnel mediante jet fans.
- Ventilación de salas técnicas.
- Protección contraincendios. Ventilación de sobrepresión en las escaleras de evacuación.
- Protección contraincendios en túnel. Detección con fibrolàser.
- Red agua para BIEs y sistema de agua nebulizada en salas técnicas.
- Red de agua potable sanitaria.
- Sistemas de señalización dinámica, semaforización, control de accesos y cierre de túnel.
- Sistema de videovigilancia de túnel, salidas de emergencia y salas técnicas.
- Sistema de control programable.
- Sistemas de comunicaciones.
- Radar de tramo.

SALIDAS DE EMERGENCIA

Para la evacuación de los usuarios se proyectan salidas de evacuación directas al exterior ubicadas en el lado derecho del sentido del tráfico. Estas salidas están distanciadas entre sí unos 200m.

En cada salida de emergencia se construye un vestíbulo estanco de una superficie mínima de 5m^2 que separa el recinto de escaleras del túnel para crear una zona segura. El recorrido de evacuación se encuentra sobre-presionado para evitar la entrada de humos desde el túnel.

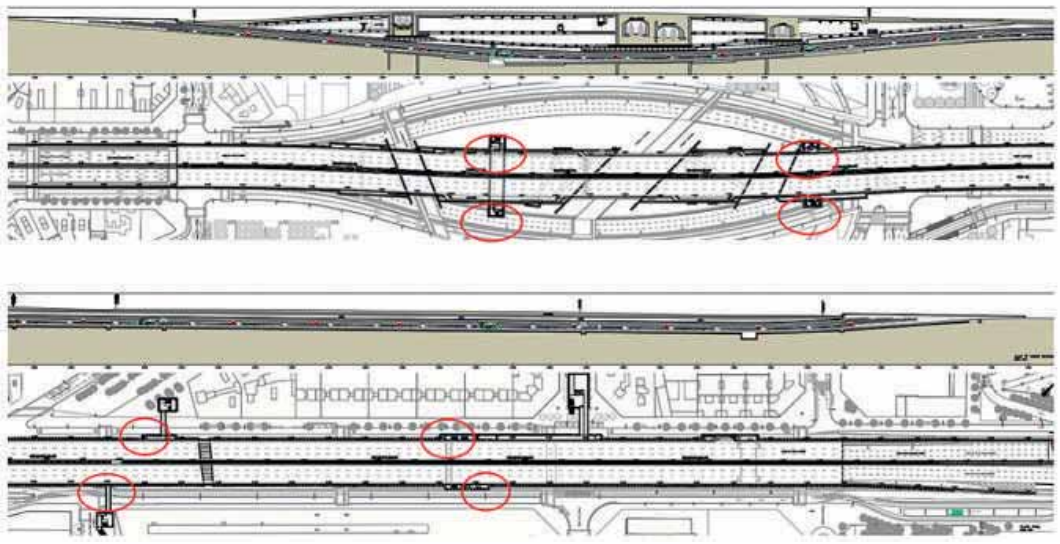


Figura 7.- Ubicación de las salidas de emergencia.

ANÁLISIS DE RIESGO

La Instrucción Técnica de Túneles Viarios Urbanos de la Ciudad de Barcelona, I.T.T. en adelante, expone en su artículo 2 lo siguiente: "En el caso en que no sea posible cumplir algunos de los requerimientos exigidos en esta instrucción técnica, o sólo se puedan cumplir con gastos desproporcionados, se tiene que argumentar adecuadamente cada una de las circunstancias y, además, se tiene que presentar un documento de análisis de riesgo, donde se tiene que indicar cada una de las medidas correctoras, como alternativa a las demandadas en esta instrucción técnica".

Para cada tipología de túnel, la I.T.T. prescribe unas características de diseño y equipamiento de seguridad mínimo en función de la longitud del mismo y de las consecuencias que provocaría un colapso estructural

Según la I.T.T, el túnel de Glòries se clasifica como tipo C – N3, correspondiente a túneles de entre 400m. y 1000m. de longitud, sumergidos o cuyo colapso parcial puede provocar daños graves en la superficie o en las edificaciones adyacentes.

En el caso del túnel de Glòries, los condicionantes geométricos en superficie hacían imposible subsanar las deficiencias de diseño respecto a los criterios establecidos en la normativa para un túnel de tipología C, concretamente referidos a los siguientes:

1. Carencia de carril de emergencia o en su defecto de apartaderos cada 200m.
2. Carencia de arcén de como mínimo 2m. de anchura.

Por lo tanto, resultaba necesario la realización de un análisis de riesgo para cumplir con las directrices establecidas en la I.T.T. y justificar que la carencia de estos elementos se compensa con otras medidas adicionales que permiten disminuir el riesgo y lograr un nivel de seguridad equivalente.

El análisis de riesgo de los túneles de Glòries se realizó mediante la aplicación de la metodología de análisis de riesgo en túneles de la red de carreteras del estado, denominada también metodología MARTE. Dentro de la metodología MARTE se aplica únicamente el Método General, descartando el Método de Mercancías Peligrosas ya que se prohíbe el paso de éstas por el interior del túnel.

El Método General se basa en la comparación del túnel objeto del estudio con un túnel virtual de referencia. El túnel virtual presenta unas características de diseño geométrico, que se consideran adecuadas o de referencia, definidas de acuerdo con lo dispuesto en la reglamentación aplicable al respecto. En el caso de los túneles de Glòries las características de referencia se establecieron según los criterios de diseño dispuestos en la I.T.T. Los factores de ponderación se consensuaron con el Gestor del Túnel y el Responsable de Seguridad del túnel.

El Método General se basa en la integración de 3 modelos que tratan de reproducir un determinado aspecto del riesgo del túnel, para llegar finalmente a cuantificar el riesgo del túnel analizado. Estos modelos son:

- Modelo de ventilación: simula el comportamiento de la ventilación ante un incendio para cada uno de los escenarios preestablecidos. En nuestro caso se ha usado el modelo unidimensional de ventilación.
- Modelo de comportamiento de los usuarios: permite determinar el número de vehículos afectados en cada escenario y reproducir el comportamiento de los usuarios durante la evacuación del túnel.
- Modelo de riesgo del túnel: reproduce el riesgo de accidente en función de un escenario de incendio dentro del túnel en función de las características de diseño, equipamiento y explotación.

A continuación, se profundiza en la metodología seguida para cada modelo particularizada para los túneles de Glòries.

1. MODELO DE VENTILACIÓN DEL TÚNEL DE GLÒRIES

Para modelizar el comportamiento de los humos producidos en un incendio en el interior del túnel, la MARTE define dos modelos de ventilación:

- Modelo tabulado de ventilación, para los túneles sin ventilación forzada.
- Modelo unidimensional de ventilación, para los túneles con ventilación forzada.

Dado que la Instrucción Técnica de Túneles Viarios Urbanos de Barcelona clasifica a los túneles de Glòries como tipo C, es necesario dotarlos de ventilación forzada. Al ser la longitud del túnel inferior a los 1000m. se ha equipado el túnel con ventilación longitudinal, aplicándose el modelo unidimensional.

El modelo unidimensional de ventilación permite ver la evolución de la propagación de la masa de humo proveniente del incendio a lo largo del túnel, en función del tiempo, lo que permite delimitar las zonas de riesgo para los usuarios desde el inicio del fuego hasta la resolución de la situación de cada escenario.

Los escenarios de incendio estudiados son los considerados en la Metodología MARTE:

Tabla 1.- Escenarios de incendio considerados.

ESCENARIO	HIPÓTESIS	POTENCIA DE FUEGO
E1	Incendio de uno o dos vehículos ligeros.	8 MW
E2	Incendio de un vehículo pesado y otro ligero.	30 MW
E3	Incendio de un vehículo ligero y un autocar.	15 MW
E4	Incendio de un vehículo pesado y un autocar.	30 MW
E5	Incendio de un vehículo capaz de provocar un incendio de gran magnitud y otro vehículo.	100 MW

Se contempla la situación más desfavorable para establecer el posicionamiento del incendio. Ésta se da cuando la posición del incendio se sitúa delante una salida de emergencia, bloqueando la evacuación de los usuarios por ésta y obligándolos a salir por la salida más próxima situada aguas arriba en el sentido del tráfico. Se supone que el túnel no está congestionado y por lo tanto los vehículos que quedan aguas abajo del incendio continúan su marcha sin verse afectados por éste.

Los dos tubos disponen de salidas de emergencia interiores distanciadas unos 200m. aproximadamente. En total encontramos 4 salidas en cada tubo. Al considerar que sólo se ven afectados los usuarios atrapados aguas arriba del incendio solo se estudia la evacuación en aquellos casos que se obtenga un retroceso de los humos en el modelo de ventilación. En el resto de casos, al no haber retroceso de humos, los usuarios pueden evacuar sin peligro sin límites temporales.

La construcción del modelo unidimensional de ventilación se realiza con el programa CAMATT 2.20 del Centre d´Études des Tunnels (CETU) del Gobierno de Francia. En el modelo se genera la geometría unidimensional, se emplaza y caracteriza el foco del incendio y los ventiladores de chorro y se imponen las condiciones de contorno. Todos los parámetros del comportamiento mecánico y térmico de los cerramientos, las características de producción de contaminantes, la eficiencia de los ventiladores necesarios para el cálculo de impulsión y las características aerodinámicas de los vehículos para la generación del efecto pistón se adoptan por defecto siguiendo las recomendaciones del programa.

En la modelización realizada con el programa CAMATT se ha usado un tiempo de respuesta de 2 minutos desde el inicio del incendio hasta la puesta en marcha de los ventiladores, tardándose 1 minuto más para tener

todos los ventiladores en marcha, dada la imposibilidad de encenderlos todos de forma simultánea. Por lo tanto se ha considerado un total de 3 minutos para tener todos los ventiladores en funcionamiento.

La ventilación del túnel lado mar (salida de la ciudad) se lleva a cabo con 1 agrupación de 2 jet fans más 6 agrupaciones de 3 Jets reversibles de 720 N de empuje nominal, resultando un total de 20 unidades a lo largo del trazado del túnel.

La ventilación del túnel lado montaña (entrada a la ciudad) incluye la instalación de 15 unidades de jets reversibles de 720 N de empuje nominal, instalados a razón de 5 grupos de 3 unidades.

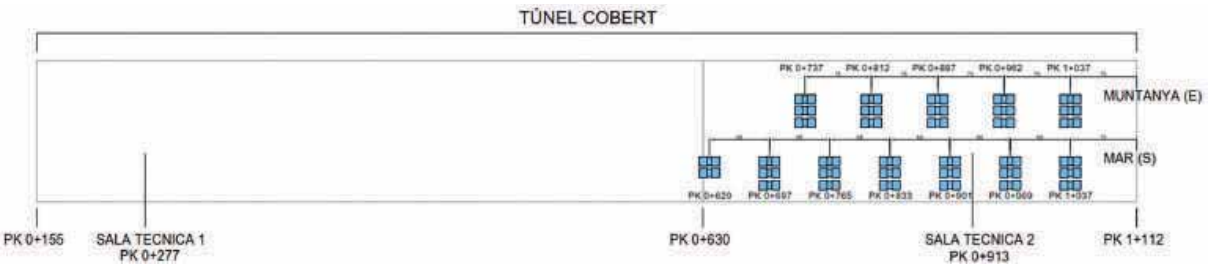


Figura 8. Esquema de distribución de los ventiladores en los túneles.

Para realizar la modelización se han situado los focos del incendio a la altura de las salidas de emergencia para cada uno de los 5 escenarios estudiados. Para cada caso se estudia el tramo comprendido entre las salidas anterior y posterior a ésta en el sentido de circulación en cada galería (o boca de galería en su caso).

De los resultados obtenidos se constata que el escenario 5, correspondiente a una potencia de fuego de 100MW, resulta el más desfavorable.

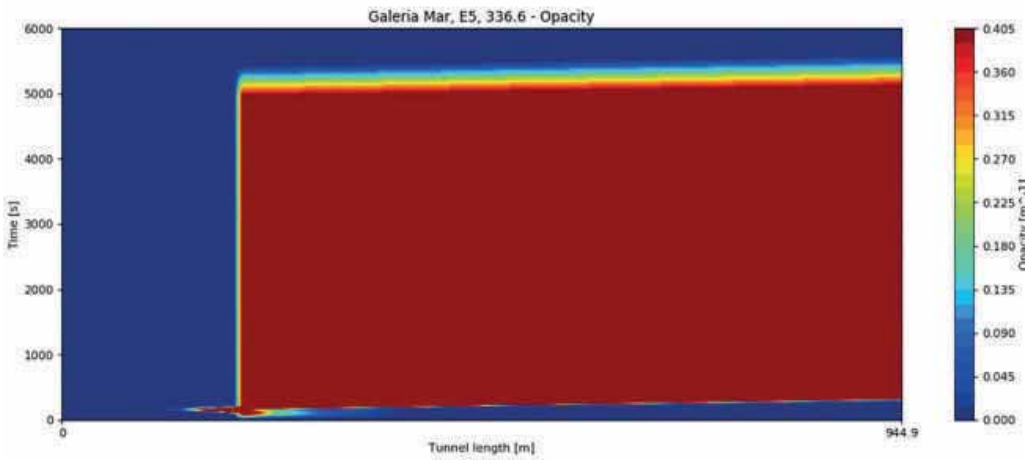


Figura 9. Ejemplo del resultado obtenido con la modelización. En los primeros instantes, antes de la puesta en marcha de la ventilación, se puede apreciar el retroceso de los humos aguas arriba del foco.

2. MODELO DE COMPORTAMIENTO DE LOS USUARIOS

La modelización del comportamiento humano ante situaciones de emergencia o extremas es un aspecto muy complejo de evaluar. La MARTE propone un modelo matemático regido por una formulación que define la trayectoria de los usuarios al evacuar el túnel.

Para simular el comportamiento de los usuarios en el análisis de riesgo de los túneles de Glòries se ha utilizado el programa EvacTunnel 3.0 creado por el Grupo de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Canta-

bria. El programa desarrolla un modelo de simulación computacional de evacuación específico para los túneles de carretera y aplicado a los requisitos de la MARTE.

El modelo utiliza las simulaciones por el Método Montecarlo generando muestras aleatorias de los parámetros de entrada. Para cada simulación, cada usuario presenta diferentes valores de los parámetros que lo caracterizan (tiempo de reacción, velocidad de desplazamiento y distancia hasta la salida). Después de realizar las simulaciones se obtienen muestras de los potenciales resultados sobre los escenarios considerados. Los resultados obtenidos por el programa son:

- Número de personas afectadas
- Tiempo total de evacuación
- Número de personas atrapadas a causa del incendio.

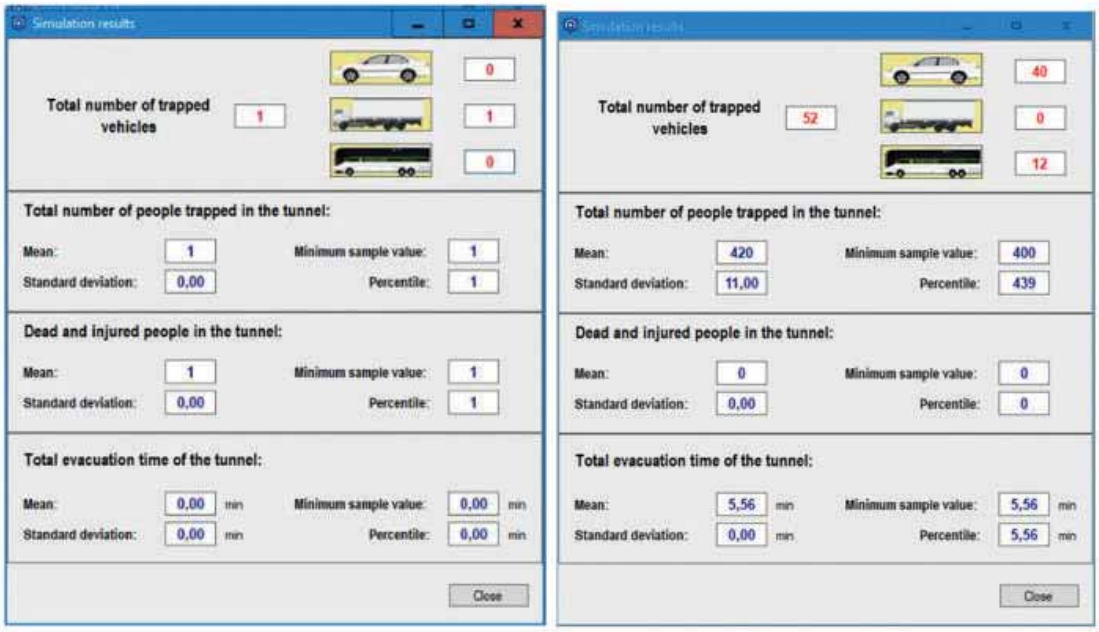


Figura 10. Resultados de la simulación obtenida con el programa EvacTunnel.

El primer paso para determinar el número de usuarios afectados por un incidente en el interior del túnel es establecer los siguientes parámetros:

- Número de vehículos afectados.
- Longitud de la cola vehículos.

El número de vehículos atrapados en el túnel y la longitud de la cola de los vehículos se ha calculado siguiendo las indicaciones del apartado 4.3.1 de la MARTE. Para este cálculo se han utilizado los datos de intensidad de tráfico proporcionadas por el Departamento de Movilidad del ayuntamiento correspondientes a 60.000 vehículos/día para el tubo mar (salida ciudad) y 56.800 vehículos/día para el tubo montaña (entrada ciudad).

En caso de incidente, se producirá una retención causada por los vehículos que llegan al lugar donde se ha producido el mismo encontrando obstaculizada su marcha. Esta cola de vehículos crecerá hasta que:

- El túnel está saturado de vehículos y la cola sobresalga por la boca de entrada.

- El humo del incendio producido en el interior empieza a salir por la boca de entrada.
- O existan semáforos o barreras que limiten el paso en el interior del túnel.

En el caso del túnel de Glòries se ha estimado que el cierre del túnel será efectivo en 120 segundos después de producirse el accidente, cuando se bajan las barreras de acceso.

El número de vehículos atrapados dentro del túnel se ha calculado para cada uno de los tubos de forma independiente ya las distancias entre la posición del incendio y las salidas de emergencia o la boca de entrada es diferente. A continuación se detalla el proceso para obtener cada una de las variables:

El tiempo de salida del humo por la boca de entrad se obtiene a partir de la modelización realizada con el programa CAMATT.

El tiempo de congestión se consigue a partir de las siguientes expresiones:

$$v_c = \frac{I}{\frac{1}{d_0} - \frac{I}{v}} \qquad t = \frac{L^*}{v_c}$$

Dónde vc es la velocidad de crecimiento de la congestión, I es la intensidad por carril de circulación, d0 es la interdistancia entre vehículos parados (en nuestro caso se ha considerado de 10m. como establece la MAR-TE), v es la velocidad de circulación (se ha considerado la velocidad de proyecto: 50km/h), L* es la longitud de cola que se ha creado desde el foco del incendio hasta que dejan de entrar vehículos en el túnel (en nuestro caso entre salidas de emergencia o entre la última salida de emergencia y la boca de entrada) y t es el tiempo en que se forma la congestión de vehículos.

Para todos los escenarios estudiados, focos de incendio situados en las salidas de emergencia y bocas de salida, se obtiene que la saturación de vehículos en el interior del túnel será lo primero en ocurrir. El tiempo de salida del humo por la boca de entrada o hasta la llegada a la salida más próxima y el cierre por bajada de las barreras son muy superiores al tiempo de formación de la congestión de cada tramo de túnel estudiado.

Por lo tanto, teniendo en cuenta las circunstancias de circulación y la alta IMD que presenta el túnel de Glòries, se considera necesario establecer la situación más desfavorable en ambos tubos, es decir, pensar que el túnel estará saturado de vehículos aguas arriba del incendio antes de la puesta en marcha de los ventiladores y del cierre de la boca de entrada al túnel, ambos procesos con un tiempo de ocurrencia de 2 minutos desde la detección del incendio.

Se ha obtenido para cada túnel el número de vehículos que quedan atrapados en fase de congestión. Para obtener el número de vehículos que quedan atrapados entre dos salidas de emergencia consecutivas se han establecido las siguientes hipótesis:

i) El túnel en situación de explotación normal no se encuentra congestionado y por tanto aguas abajo del incendio los coches continúan su marcha sin problemas. Aguas arriba del incidente los coches se paran y se genera una cola de vehículos que llega a la salida de emergencia más próxima o a la boca de entrada antes de que se pueda cerrar el túnel o se ponga en marcha la ventilación.

ii) El tiempo de formación de la cola es inferior al tiempo de cierre del túnel. Por lo tanto el túnel, o el tramo aguas arriba entre dos salidas de emergencia consecutivas, se encuentra saturado de vehículos.

iii) El caso más desfavorable es el que se produce cuando el incendio se sitúa enfrente de una salida de emergencia, quedando ésta bloqueada y obligando a los usuarios a evacuar por la salida situada aguas arriba.

iv) La configuración del túnel es la siguiente: 2 carriles para vehículos privados más 1 carril exclusivo para autobuses.

v) La interdistancia entre vehículos es de 10m. La interdistancia entre autobuses se considera 17m.

vi) Se considera que la cola se genera tanto en los dos carriles de vehículos como en el carril bus.

Los resultados obtenidos en relación con el número de vehículos atrapados entre dos salidas de emergencia consecutivas se muestran a las siguientes tablas:

Tabla 2.- Número de vehículos atrapados en cada tramo estudiado.

TÚNEL MAR				
Salida de emergencia	**PK**	**Distancia entre salidas**	**Núm. Vehículos (2 carriles)**	**Núm. Buses**
Inicio cobertura	155,05			
S1	336,73	181,68	38,00	11,00
S2	518,20	181,47	38,00	11,00
S3	713,61	195,41	40,00	12,00
S4	912,38	198,77	40,00	12,00
Final cobertura	1112,62	200,24	42,00	12,00
TÚNEL MONTAÑA				
Salida de emergencia	**PK**	**Distancia entre salidas**	**Núm. Vehículos (2 carriles)**	**Núm. Buses**
Inicio cobertura	155,05	186,93	38,00	11,00
S1	341,98	176,19	36,00	11,00
S2	518,17	216,01	44,00	13,00
S3	734,18	184,96	38,00	11,00
S4	919,14	193,48	40,00	12,00
Final cobertura	1112,62			

Para obtener el número de personas atrapadas en el túnel, se ha tenido en cuenta la ocupación de cada vehículo y el número de vehículos de aquel tipo según la composición del tráfico que circula por el túnel. Para calcular el número de personas presentes en el túnel por carril se adoptará el siguiente criterio:

Tabla 3.- Tasa de ocupación de los vehículos atrapados en el túnel.

TIPO DE VEHICULO	**TASA DE OCUPACIÓN (personas/vehículo)**
Vehículo ligero	1,5
Vehículo pesado	1
Autocar/autobús	30

La MARTE aplica una serie de criterios adicionales que permiten una reducción del número de personas atrapadas dentro del túnel o cambios en la velocidad de auto-evacuación si se cumplen unos requisitos:

- Iluminación de emergencia y de seguridad: tanto el túnel virtual como el real están dotados de esta tipología de alumbrado y, además, tienen SAI y suministro alternativo de electricidad en caso de emergencia, por lo tanto, la velocidad de auto-evacuación será:
  - En zonas sin humo desestratificado: 1 m/s.
  - En zonas con humo desestratificado: 0,5 m/s.
- Postes SOS dotados de BIE y extintores: están presentes tanto en el túnel virtual como en el real. Por lo tanto, se puede reducir el número de personas atrapadas en:
  - Para E1: reducción en un 10%.
  - Para E3: reducción en un 5%.
- Megafonía: reducción en 5 segundos en el tiempo de reacción de todos los usuarios tras los accidentados al disponer el túnel de Centro de Control con CCTV y DAI.
- La señalización de las salidas y de los equipamientos de emergencia previstos tanto en el túnel real como en el virtual permite, combinado con la presencia del SAI y suministro alternativo de electricidad, aumentar la velocidad de auto-evacuación en 0,1 m/s en zonas con humo desestratificado. Por lo tanto, se considera:

  En zonas sin humo desestratificado: 1 m/s.

  En zonas con humo desestratificado: 0,6 m/s.

Además, se establecen las siguientes suposiciones:

- El tiempo de reacción de los usuarios implicados en el accidente. Se empieza a evacuar el túnel en 90 segundos por los usuarios de los vehículos ligeros y pesados excepto los autobuses, que será de 300 segundos hasta que salga el último ocupante.
- El tiempo de reacción de los otros usuarios afectados desde que llegan a la cola de vehículos o ven a un usuario de otro vehículo evacuando es de 10 segundos para el túnel virtual y real.

La simulación de la evacuación se ha llevado a cabo de forma independiente para cada uno de los tubos. Para cada caso hay que realizar dos simulaciones:

1. Una simulación para los usuarios directamente implicados en el accidente.
2. Una simulación para el resto de los usuarios afectados que se encuentran en la cola de vehículos formada en el interior del túnel suponiendo que evacúan por la salida de emergencia más próxima, con un tiempo de reacción de 10 segundos y una velocidad de auto-evacuación de 0,6 m/s (humo desestratificado).

Introduciendo todos los datos explicados anteriormente y la tabla de resultados de las simulaciones de evacuación se obtiene, para cada uno de los escenarios, el número de afectados y el tiempo de evacuación de cada escenario.

3. MODELO DE RIESGO DEL TÚNEL

Para obtener el índice de riesgo del túnel se debe determinar el coeficiente de riesgo del túnel virtual (CRTV) y el coeficiente de riesgo del túnel real (CRTR).

El Coeficiente de Riesgo del túnel virtual (CRTV) se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$CR_{TV} = F_{TV} \times \sum (Nº\ afectados \times prob.\ ocurrencia\ del\ escenario\ E_i)$$

El Coeficiente de Riesgo del túnel real (CRTR) se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$CR_{TR} = F_{TR} \times \sum (Nº\ afectados \times prob.\ ocurrencia\ del\ escenario\ E_i)$$

El índice de riesgo del túnel viene determinado por la siguiente expresión:

$$IR = \frac{CR_{TR}}{CR_{TV}}$$

Si este índice (IR) se sitúa por debajo de 1,15 se considera que el túnel es seguro.

El número de usuarios afectados para cada escenario se ha calculado siguiendo el modelo de comportamiento de los usuarios según se ha explicado en el punto anterior.

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de los diferentes escenarios se utiliza la tabla propuesta en la metodología MARTE:

Tabla 4.- Probabilidades de ocurrencia de cada uno de los escenarios en función del % VP.

Porcentaje de vehículos pesados	5%	10%	15%	20%	30%	40%
Escenario	**Probabilidades de ocurrencia (en tanto per uno)**					
E1:	0,85	0,76	0,67	0,58	0,45	0,36
E2:	0,11	0,18	0,25	0,31	0,42	0,48
E3:	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
E4:	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04
E5:	0,01	0,03	0,05	0,07	0,08	0,1

En el caso de los túneles de Glòries, el porcentaje de vehículos pesados que circularan será inferior al 5%, estableciéndose la probabilidad de ocurrencia la correspondiente a ese porcentaje según establece la MARTE.

Es conocido que un incremento de la intensidad de tráfico lleva asociado un aumento del número de accidentes. Este hecho queda recogido con un factor corrector de la probabilidad de ocurrencia: FIMD, el cual quedará multiplicado por la probabilidad porcentual de cada escenario. Este factor viene dado por la siguiente expresión:

$$F_{IMD} = \left(\frac{IMD_C}{2.000}\right)^{a}$$

siendo

IMD_C: la intensidad media diaria por carril.

a: parámetro correspondiente al tipo de carretera. En nuestro caso, se toma a=0,9291 para carreteras con calzadas separadas.

Con los valores anteriores se obtienen los siguientes resultados tanto para el túnel virtual como el real:

F_{IMD} túnel mar: 8,494.

F_{IMD} túnel montaña: 8,072.

El factor corrector del coeficiente de riesgo (F_{TV} y F_{TR}) viene determinado por la siguiente expresión, tanto para el túnel virtual como para el túnel real:

$$F_{TV/TR} = Fg \; x \; Feq \; x \; Fex$$

Donde,

Fg es el factor corrector por criterios de diseño geométricos.

Feq es el factor corrector por criterios de equipamiento del túnel.

Fex es el factor corrector por criterios de explotación del túnel.

Para el cálculo de los diferentes factores correctores se ha tomado como referencia la Instrucción Técnica de Túneles Viarios Urbanos de la Ciudad de Barcelona, adaptando el valor numérico de los factores definidos en la MARTE a los requerimientos equivalentes requeridos por la I.T.T. Estos valores de referencia se han consensuado con el Gestor del Túnel y el Coordinador de Seguridad del Túnel.

A continuación, se determinan los valores de cada uno de los factores correctores tanto para el túnel real como para el virtual:

1- <u>Factor corrector por criterios de diseño geométricos</u>.

$$Fg = Fg_{CAR} \; X \; Fg_{ARC} \; X \; Fg_{APA} \; X \; Fg_{ACE} \; X \; Fg_{PAV} \; X \; Fg_{PTE} \; X \; Fg_{REV}$$

Donde,

Fg_{CAR} es el factor de anchura de carriles.

Fg_{ARC} es el factor de anchura del arcén derecho.

Fg_{APA} es el factor de apartaderos.

Fg_{ACE} es el factor de aceras.

Fg_{PAV} es el factor de tipo de pavimento.

Fg_{PTE} es el factor de la pendiente longitudinal

Fg_{REV} es el factor del revestimiento rígido.

Tabla 5.- Factores de ponderación geométrica adoptados para el túnel de Glòries

Factor de anchura de carriles. Fg_{CAR}			
Anchura de carril (m)	**Factor Fg_{CAR}**	**Túnel virtual**	**Túnel real**
>3,50	1,03		
3,00-3,50	1	X	X
2,90-3,00	1,03		
2,80-2,90	1,08		
<2,80	1,15		
Factor de anchura del arcén derecho. Fg_{ARC}			
Anchura de arcén (m)	**Fg_{ARC}**	**Túnel virtual**	**Túnel real**
>2,00	0,9		
1,00-2,00	1	X	
<1,00	1,05		X
Factor de apartaderos. Fg_{APA}			
Apartaderos	**Fg_{APA}**	**Túnel virtual**	**Túnel real**
Sí	1	X	
No	1,05		X
Factor de aceras. Fg_{ACE}			
Ancho de aceras (m)	**Fg_{ACE}**	**Túnel virtual**	**Túnel real**
>= 0,75	1	X	X
< 0,75	1,05		
Sin aceras	1,1		
Factor de tipo de pavimento. Fg_{PAV}			
Tipo de pavimento	**Fg_{PAV}**	**Túnel virtual**	**Túnel real**
Hormigón	1,0		X
Mezclas bituminosas	1,05	X	
Factor de la pendiente longitudinal Fg_{PTE}			
Pendiente long. (%)	**Fg_{PTE}**	**Túnel virtual**	**Túnel real**
0	0,88		
<5%	0,95+(0,010*pendiente (%))		
5%	1	X	
>5%	1+(0,02*exceso pendiente> 5%)		X
Factor del revestimiento rígido. Fg_{REV}			
Tipo	**Fg_{REV}**	**Túnel virtual**	**Túnel real**
Revestido	1	X	X
Sin revestir e instrumentado	1,03		
Sin revestir ni instrumentado	1,06		

2- Factor corrector por criterios de equipamiento del túnel. Viene dado por la siguiente expresión:

$$Feq = Feq_{SSEE} \text{ X } Feq_{CC} \text{ X } Feq_{OTR}$$

Donde,

Feq_{SSEE} es el factor de proximidad de los servicios de emergencia.

Feq_{CC} es el factor de existencia de un centro de control.

Feq_{OTR} es el factor que engloba otras mejoras en la dotación sobre las exigidas a la normativa.

Tabla 6.- Factores de ponderación por equipamiento adoptados para el túnel de Glòries

Factor de proximidad de los servicios de emergencia. Feq_{SSEE}			
Tiempo llegada SSEE	**Factor Feq_{SSEE}**	**Túnel virtual**	**Túnel real**
< 2min	0,75		
2-5 min	0,85		
5-10 min	1	X	X
10-15 min	1,15		
> 15 min	1,25		
Factor de centro de control permanente y vigilado con control de accesos. Feq_{CC}			
Tipo	**Factor Feq_{CC}**	**Túnel virtual**	**Túnel real**
SÍ	0,90	X	X
NO	1		
Otras mejoras en la dotación sobre las exigidas en la I.T.T. Feq_{OTR}			
Tipo	**Factor Feq_{OTR}**	**Túnel virtual**	**Túnel real**
SÍ	0,9		
NO	1	X	X

3- Factor corrector por criterios de explotación del túnel. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Fex = Fex_{AVP} \text{ x } Fex_{RAD}$$

Donde,

Fex_{AVP} es el factor de restricción de adelantamiento de vehículos pesados.

Fex_{RAD} es el factor de existencia de radares en los accesos o en el interior del túnel.

Tabla 7.- Factores de ponderación por explotación adoptados para el túnel de Glòries

Factor por restricción de adelantamiento de VP. Fex_{AVP}			
Adelantamiento de VP	**Factor Fex_{AVP}**	**Túnel virtual**	**Túnel real**
Sin restricción	1	X	X
Con restricción. VP < 5%	0,97		
Con restricción. VP < 10%	0,93		
Con restricción. VP < 15%	0,90		
Con restricción. VP ≥ 20%	0,87		
Existencia de radar en el túnel. Fex_{RAD}			
Tipo	**Factor Fex_{RAD}**	**Túnel virtual**	**Túnel real**
Sí	0,92		X
No	1,00	X	

Una vez obtenidos los tres factores anteriores calculamos el factor de ponderación F tanto del túnel virtual como del túnel real. Multiplicando este factor por el número de víctimas obtenido en el modelo de comportamiento de los usuarios obtenemos el coeficiente de riesgo de cada túnel. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8.- Coeficientes de riesgo de los túneles

TÚNEL MAR						
	Fg	Feq	Fex	**F**	Núm. víctimas	**CR**
Túnel virtual	1,05	0,90	1,00	**0,945**	2,72	**2,570**
Túnel real	1,166	0,90	0,92	**0,965**	2,72	**2,625**
TÚNEL MONTAÑA						
	Fg	Feq	Fex	**F**	Núm. víctimas	**CR**
Túnel virtual	1,05	0,90	1,00	**0,945**	1,70	**1,607**
Túnel real	1,166	0,90	0,92	**0,965**	1,70	**1,641**

El índice de riesgo de cada túnel se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$IR\ túnel\ mar = \frac{CR_{TR}}{CR_{TV}} = \frac{2{,}625}{2{,}570} = 1{,}021$$

$$IR\ túnel\ montaña = \frac{CR_{TR}}{CR_{TV}} = \frac{1{,}641}{1{,}607} = 1{,}021$$

En el caso de los túneles de Glòries ambos tubos han obtenido un índice de riesgo de 1,021, situándose por debajo del 1,15 objetivo y por tanto podemos concluir que los túneles se pueden catalogar como túneles seguros.

EURAM 3.0: 15 YEARS OF RISK ANALYSIS APPLICATION IN ROAD TUNNELS

Alessandro Focaracci
Prometeoengineering.it S.r.l.

The Italian Legislative Decree n.264/06 (D.lgs. n.264/06) "Implementation of the European Directive 2004/54/EC on tunnels safety in the Trans-European Road Network (TERN)" defines a set of minimum safety requirements for tunnels and it demands to carry out a quantitative risk analysis, according to the defined methodology.

In order to perform a risk analysis, according to the method defined by the Legislative Decree, which is probabilistic in the formulation and quantitative in the determinations, an appropriate methodology known as IRAM (Italian Risk Analysis Method) was then developed and defined.

The IRAM methodology incorporates the paradigms and the calculation techniques of the deterministic methods for scenarios and consequences analyses, and it applies the probabilistic techniques for the representation of the possible critical scenarios (Event Tree Analysis - ETA) and the statistical techniques for each tree branch at the beginning of each simulation and evacuation process (Monte Carlo Technique) for calculating the risk.

The software EURAM, based on IRAM methodology, has been developed since 2005 and it allows to evaluate the road tunnels safety level according to the hazard flow evolution inside the tunnel, based on the characteristics and the effectiveness of all the established safety measures. EURAM allows absolute and comparative risk analysis execution and risk analysis for tunnels with special characteristics.

Moreover, the software EURAM has already been used for the safety documentation of more than 300 tunnels, over 70% of the tunnels approved by the Permanent Commission for Tunnels (Commissione Permanente per le Gallerie – CPG), according to the Legislative Decree n.264/06 requirements.

This paper presents the main features and the applications of EURAM 3.0.

EURAM 3.0: 15 AÑOS DE APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE RIESGOS EN TÚNELES DE CARRETERA

El Decreto Legislativo italiano n.264/06 (D.lgs. n.264/06) "Aplicación de la Directiva Europea 2004/54/CE sobre la seguridad de los túneles en la red transeuropea de carreteras (TERN)" define un conjunto de requisitos mínimos de seguridad para los túneles y exige la realización de un análisis cuantitativo de riesgos, de acuerdo con la metodología definida.

Para realizar un análisis de riesgos, según el método definido por el Decreto Legislativo, que es probabilístico en la formulación y cuantitativo en las determinaciones, se desarrolló y definió entonces una metodología adecuada conocida como IRAM (Método de Análisis de Riesgos Italiano).

La metodología IRAM incorpora los paradigmas y las técnicas de cálculo de los métodos deterministas para el análisis de escenarios y consecuencias, y aplica las técnicas probabilísticas para la representación de los posibles escenarios críticos (Event Tree Analysis - ETA) y las técnicas estadísticas para cada rama del árbol al inicio de cada proceso de simulación y evacuación (Técnica Monte Carlo) para el cálculo del riesgo.

El software EURAM, basado en la metodología IRAM, ha sido desarrollado desde 2005 y permite evaluar el nivel de seguridad de los túneles de carretera en función de la evolución del flujo de peligros en el interior del túnel, basándose en las características y la eficacia de todas las medidas de seguridad establecidas. EURAM permite la ejecución de análisis de riesgo absolutos y comparativos y el análisis de riesgo para túneles con características especiales.

Además, el software EURAM ya se ha utilizado para la documentación de seguridad de más de 300 túneles, más del 70% de los túneles aprobados por la Comisión Permanente para los Túneles (Commissione Permanente per le Gallerie - CPG), según los requisitos del Decreto Legislativo nº 264/06.

Este documento presenta las principales características y las aplicaciones de EURAM 3.0.

EURAM 3.0 : 15 ANS D'APPLICATION DE L'ANALYSE DES RISQUES DANS LES TUNNELS ROUTIERS

Le décret législatif italien n° 264/06 (D.lgs. n.264/06) "Mise en œuvre de la directive européenne 2004/54/CE concernant la sécurité des tunnels du réseau routier transeuropéen (RTE)" définit un ensemble d'exigences minimales de sécurité pour les tunnels et exige la réalisation d'une analyse quantitative des risques, conformément à la méthodologie définie.

Afin d'effectuer une analyse de risque, selon la méthode définie par le décret législatif, qui est probabiliste dans la formulation et quantitative dans les déterminations, une méthodologie appropriée connue sous le nom de IRAM (Italian Risk Analysis Method) a ensuite été développée et définie.

La méthodologie IRAM intègre les paradigmes et les techniques de calcul des méthodes déterministes pour les analyses de scénarios et de conséquences, et elle applique les techniques probabilistes pour la représentation des scénarios critiques possibles (Event Tree Analysis - ETA) et les techniques statistiques pour chaque branche de l'arbre au début de chaque simulation et processus d'évacuation (technique de Monte Carlo) pour le calcul du risque.

Le logiciel EURAM, basé sur la méthodologie IRAM, a été développé depuis 2005 et permet d'évaluer le niveau de sécurité des tunnels routiers en fonction de l'évolution du flux de danger à l'intérieur du tunnel, sur la base des caractéristiques et de l'efficacité de toutes les mesures de sécurité établies. EURAM permet l'exécution d'analyses de risque absolues et comparatives et l'analyse de risque pour les tunnels ayant des caractéristiques particulières.

En outre, le logiciel EURAM a déjà été utilisé pour la documentation de sécurité de plus de 300 tunnels, soit plus de 70 % des tunnels approuvés par la Commission permanente des tunnels (CPG), conformément aux exigences du décret législatif n° 264/06.

Ce document présente les principales caractéristiques et les applications d'EURAM 3.0.

INTRODUCTION

EURAM is the main Italian software for tunnels risk analysis (now in version 3.0) and it was developed according to the prescriptions contained in the Italian Legislative Decree n.264/06.

This software allows the tunnels managers to continuously evaluate the tunnels safety level, taking into account all the available safety measures (vehicles, infrastructure, systems and operation).

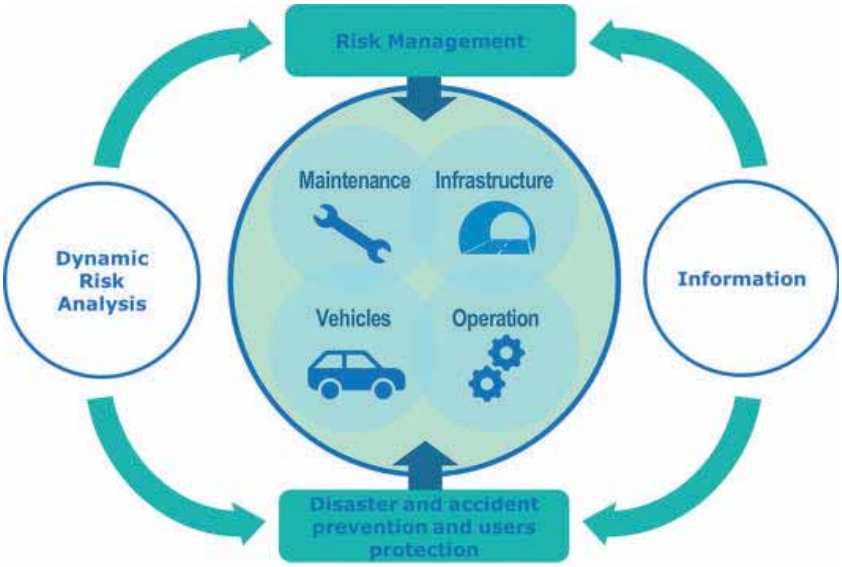


Figure 1 – Tunnel risk management

Consequently, EURAM complies with the Legislative Decree n.264/06 according to the Annex 3 reported in attachment 3 (Art. 13, paragraph 3) and for the descriptions present in Glossary in Annex 1 (Art. 1, paragraph 2), as it was developed specifically on the methodology indicated by the decree itself.

In order to perform a risk analysis, according to the method defined by the Legislative Decree, which is probabilistic in the formulation and quantitative in the determinations, an appropriate methodology known as IRAM (Italian Risk Analysis Method) was then developed and defined.

The IRAM methodology incorporates the paradigms and the calculation techniques of the deterministic methods for scenarios and consequences analyses, and it applies the probabilistic techniques for the representation of the possible critical scenarios (Event Tree Analysis - ETA) and the statistical techniques for each tree branch at the beginning of each simulation and evacuation process (Monte Carlo Technique) for calculating the risk.

1. THE ITALIAN RISK ANALYSIS METHOD (IRAM)

The Italian Risk Analysis Method (IRAM) is a risk calculation methodology, which complies with the Legislative Decree n.264/06, according to Annex 3 (provided for by article 13, paragraph 3) and the Glossary of Annex 1 (envisaged by art.1, paragraph 2).

In compliance with the Glossary (Annex 1 – D.lgs. n.264/06), for IRAM is defined that "[...] Risk assessment is a process that involves identifying the sources of danger and determining the exposure of the population to danger and includes estimating the uncertainties. connected. [...]" and the risk is an "Analytical link between

the occurrence probability of an event and the consequences extent coming from it, including the uncertainties related to the definition quantities estimation".

Furthermore, it is necessary to highlight the methods for defining the uncertainties estimation, the statistics sources for the occurrence probability definition of the critical event and the distribution functions used in the determination of the population exposed to the hazard.

In compliance with the Glossary (Annex 1 – D.lgs. n.264/06), an incidental scenario is defined as "A sequence of events that describes, starting from a given initiator event, the modalities conditioned by the safety measures adopted, which induces certain consequences". Then, it is required to describe the modalities in which the planned or installed safety measures have been considered for the risk computation procedure.

According to paragraph 3 (Annex 3 – D.lgs. n.264/06), IRAM requires that "the number of users involved in the evacuation process" is "determined by the formulation and solution of queue development models in the analysed gallery", underlying the queue and evacuation development models adopted.

As specified in paragraph 3 (Attachment 3 – D.lgs. n.264/06), "The risk connected to a tunnel" is "defined as the expected damage value or as probability distribution of exceeding predetermined damage thresholds (cumulative distributions, reported on the F - N plan)".

In particular, the risk analysis method concerns the incidental events considered as critical in the specific and constricted road tunnels environment (Fire, collisions with consequent fire, flammable material, toxic and hazardous substances discharge, explosion).

For events connected to road accidents as such, related to the infrastructure's geometric characteristics, not induced by the tunnel specific environment, and that do not involve additional risks to those related to road traffic, in order to ensure their prevention, those need to be considered and tackled within the road traffic rules and road design. Additionally, the victims of this type of accident have to be computed as road casualties.

IRAM is carried out according to the classic Bayes' method, using the uncertainty analysis. Therefore, it is the correct analytical method identified and acknowledged as appropriate to define the risk level specific to the new and existing road and railway Italian tunnels, as stated in the recommendations by the European Directive 2004/54/EC and the Italian Ministerial Decree 28/10/05. Thanks to the systemic approach employed, it is possible to:

- Define the users' survival rate in possible escape scenarios, considered as critical and consequent to accidents within the tunnel specific environment;
- Quantify the risk related to the individual tunnel over a set timeframe.

The safety design procedure for road and railway tunnels requires a previous analysis of the infrastructure vulnerability, which establishes a univocal relation between homogeneous groups of minimum safety requirements, as set by the norms, and the threshold safety parameters, as defined by the statistical analysis of the historical incidents data.

The vulnerability analysis allows to identify the anomalies in the safety parameters or the lack of some minimum requirements, as set by the norms, and to identify the tunnels in which it is needed to execute a risk analysis.

For road tunnels, the risk analysis must be carried out for every tunnel that does not comply with the minimum requirements, and thus involves the adoption of alternative safety measures in order to demonstrate that those can guarantee an equivalent or higher safety level.

The safety minimum requirements are mainly set to specifically provide:

- Tunnel protection and mitigation for overall hazards caused by critical events (such as reduction of safety systems' intervention time, fire temperature reduction, fumes dispersion control);

- Facilitation of self-rescue escape operations (such as emergency exits, visibility improvement, and new communication tools);
- Facilitation of emergency rescue operations (such as available road accesses, communication tools improvement, and accessible water supply).

Some of the requirements mentioned above also hold a preventive role during the standard operating conditions.

The risk analysis must demonstrate that the overall measures (preventive, protection, and mitigation) can ensure that the risk level remains below the acceptable risk level and cannot be further improved, other than with unrealistic works or at an unnecessary cost (cost-safety analysis).

The risk analysis major points are summarised in the following diagram.

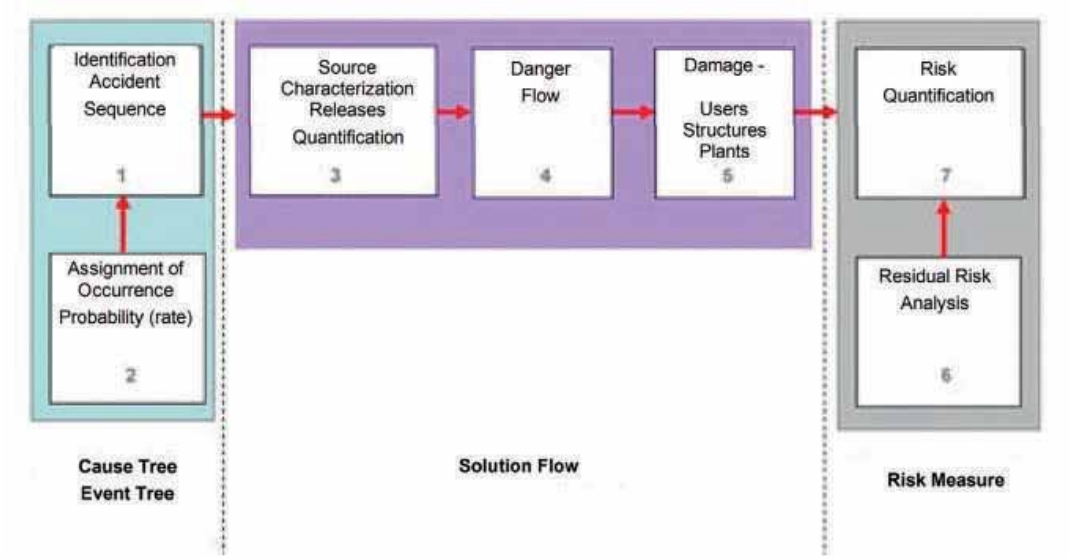


Figure 2 – Risk analysis flow diagram

2. EURAM 3.0: TUNNELS' RISK ANALYSIS SOFTWARE

For the last 15 years, EURAM has been developed on IRAM methodology (Italian Risk Analysis Method), consequently it complies with the Legislative Decree n.264/06, according to the Annex 3 reported in attachment 3 (Art. 13, paragraph 3), and for the descriptions present in Glossary in Annex 1 (Art. 1, paragraph 2).

The methodology implemented in EURAM 3.0 uses as risk analyses input data:

- Geometric tunnel data: tubes length, entrances height, longitudinal slopes, cross-sectional area and axis height, platform organization, inter distance between emergency exits;
- Operating tunnel data: traffic regime, average daily traffic on an annual basis (AADT), traffic composition (light vehicles, heavy vehicles, dangerous goods vehicles), hourly traffic distribution, vehicle speeds;
- Expected accidents and fires frequencies expressed, as an event rate:
  - The accident rate;
  - The fires rate.

- Specific statistical environmental data of the single tunnel relating to environmental conditions (useful for defining the boundary conditions of thermo-fluid dynamics simulations);
- Specific dimensional data of the individual safety systems;
- Normal and emergency lighting (input data of accident models, fire and escape simulations to calculate the visibility during the evacuation);
- Type of drainage system, open surface of drainage wells and the inter distance (useful for defining the drainage system performance in a hazardous liquid spill event);
- Fire detection systems present in the tunnel: thermo-sensitive cable, fibro laser, CCTV, Opacimeters, etc. (useful for evaluating the pre-movement time of the users);
- Monitoring and communication systems such as traffic lights, SOS, VMPs (useful for defining the closing time and the pre-movement time of users in the exit and queue formation models);
- Ordinary and emergency power systems (useful for defining the availability of each safety system in case of emergency);
- Ventilation systems: number, spatial distribution, power, diameter and flow rate of the individual jet fans (for defining the air speed and the system effectiveness in a fire event).

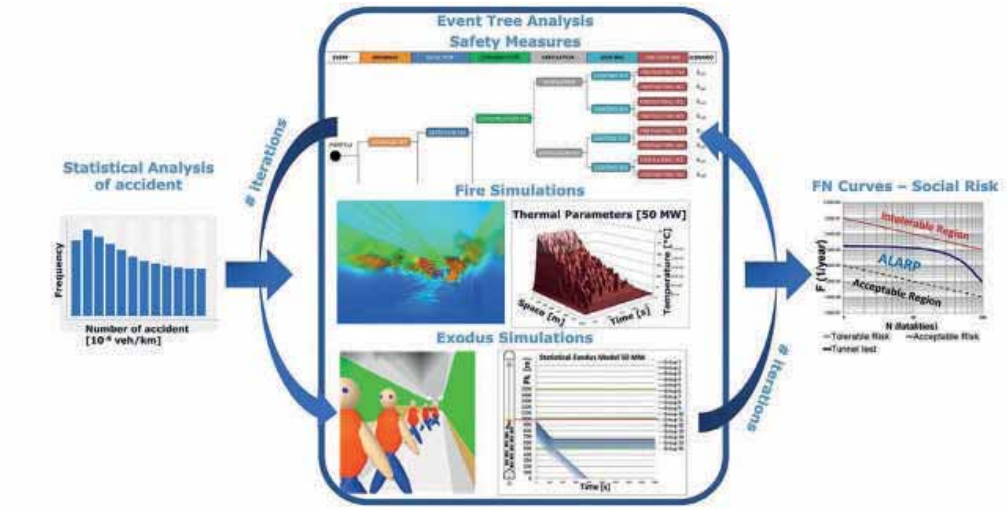


Figure 3 – EUropean Risk Analysis Method (EURAM)

3. THE INCIDENTAL SCENARIOS

According to paragraph 3 (Annex 3 – D.lgs. n.264/06), it is required that the "incidental scenarios and their evolution in tunnel, in terms of hazard", are "represented by models including the faults tree, the critical event initiator and the events tree [...] The events tree analysis (ETA) is characterized in terms of occurrence probability for critical initiator events and conditioned probabilities for the evolution along the individual branches, as an expression of installed or planned safety measures' reliability and efficiency".

As highlighted above, only EURAM was developed specifically in accordance with the specific Italian case allows to comply with the requirements of the Decree.

Unlike other software, that only allow a very simplified tunnel safety equipment representation, EURAM is the only software that allows to completely model all the safety measures, described in terms of integrity, efficiency and effectiveness, where:

- Integrity = Reliability x Availability x Maintainability;
- Efficiency = (Provided Performance / Requested Performance) , is the probability of obtaining the expected benefit during the use conditions and context, including the models' uncertainties and boundary conditions.

As required by the Decree and in accordance with the IRAM risk analysis methodology, the fire study in the tunnel is analysed by EURAM by using the events tree technique. The probabilities associated with the path that is determined along the events tree are a performance, reliability and effectiveness function of the safety systems that implement the prevention and mitigation measures.

Figure 4 shows the application of the events tree technique used by EURAM 3.0.

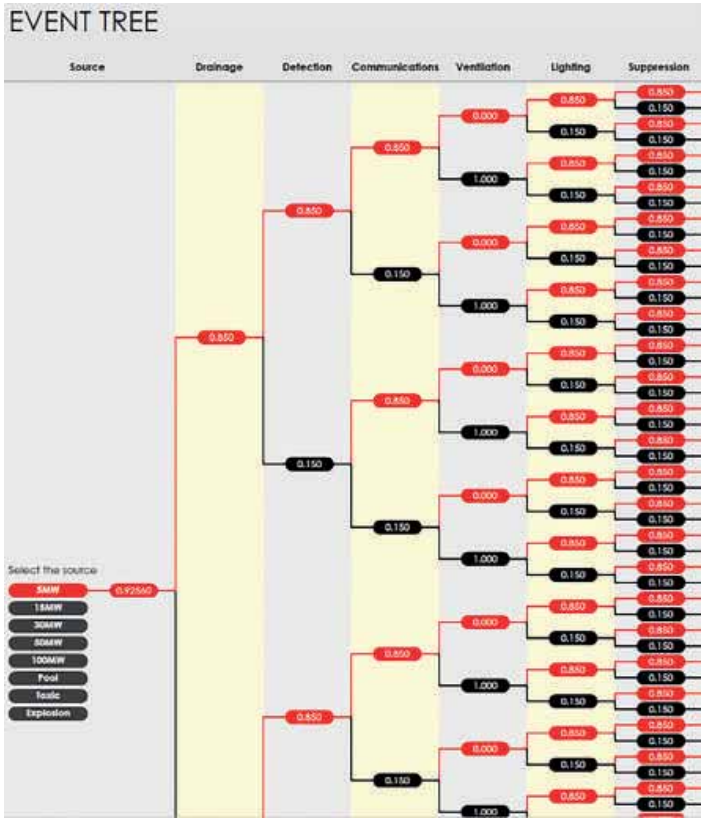


Figure 4 – Events Tree Analysis

4. THE MONTE CARLO METHOD

Paragraph 1 (Annex 3 – D.lgs. n.264/06) prescribes that "the detail level of the Quantitative Risk Analysis (QRA) methodology must allow the users' salvability definition for scenarios caused by critical events", and the simulations number, carried out to determine the consequences caused by the initiating events, allows to analyse in detail the totality of the considered critical events.

In compliance with paragraph 3 (Annex 3 – D.lgs. n.264/06), it is stated that "the users' salvability in a specific tunnel is determined by quantifying the hazard flow within the structure. The hazard flow modelling is implemented with different levels of detail, depending on the specific needs and using the best and available techniques. The hazard flow modelling results are the input data for the evacuation process simulation of the users from the structure", showing the adopted thermodynamic models for the hazard flow modelling and how the results establish the inputs of the evacuation models.

The Monte Carlo method is applied for each tree branch, at the beginning of each simulation and evacuation process, by changing the input parameters (Fire location and intensity, type and number of exposed populations, environmental conditions, etc.), in order to obtain a distribution function as a result of the performed analyses for each individual branch.

Each scenario is identified by the events tree technique, therefore, iteratively simulated at least 100 times by using a probabilistic approach and Monte Carlo techniques. This approach, associated with the use of specific distribution functions, allows to examine the systems' safety in all possible conditions, evaluating the interaction of the tunnel system components upon a fire event occurrence with the possible surrounding conditions range (traffic, environment, etc.).

On the other hand, the deterministic approaches don't permit a correct assessment of the risk level, since, if only a few scenarios are analysed, those neglect the contribution of all cases in which the parameters differ from the reference ones. Indeed, these cases are neither the most frequent incidental sequences nor those associated with the greatest fatalities, but those can significantly affect the risk level due to their high occurrence frequency.

The software does not use random values among the most probable ones, but rather it considers values belonging to the distribution functions that model the operating conditions of the tunnel safety measures, given the specific fire scenario being simulated.

4.1. Scenarios simulation

The simulations are performed using the solution of one-dimensional (1D) thermo-fluid dynamic models, with a sub-model with two mixing zones between two air layers for determining the zone occupied by the fumes in the back layering event or in the ventilation absence.

As indicated in paragraph 3 (Annex 3 – D.lgs. n.264/06), "the number of users involved in the evacuation process" in the simulations' context performed by EURAM is "determined through the formulation and solution of suitable queuing models in the analysed tunnel".

In compliance with paragraph 3, it is specified that "the methodology refers exclusively to the critical events analysis in the specific confined environment of the tunnels: fires, collisions with fire, spills of flammable substances, releases of toxic and noxious substances", the method (unlike other software that mostly perform simplified analyses with lethality functions associated to different scenarios) performs the risk analyses taking into consideration all the tunnel peculiarities.

These analyses are associated with evacuation simulations to evaluate the users' behaviour on the basis of the actual number of evacuating users (determined by solving queue formation models) and the actual conditions of visibility, liveability and speed of the users, related to the fumes' diffusion in the tunnel and the interaction with the specific safety equipment present and the surrounding conditions (ventilation, emergency lighting, atmospheric conditions at the portals, etc.).

Therefore, EURAM constitutes a tool capable of complying with the prescriptions mentioned in Annex 1, where the risk is defined as the "analytical link between the probability of the event occurrence and the consequences caused by it, including the uncertainties related to the quantities evaluation".

Thanks to the distribution functions use, EURAM allows to broaden the analysis field and it includes the evaluation uncertainties, unlike other methodologies performing a risk analysis by evaluating deterministically predetermined scenarios.

4.2. Traffic characterization and escape simulated scenarios

In case of an accident, the time required to close the tunnel must be compared with the time required by the traveling vehicles' queue to cross the tunnel. Figure 5 shows a possible diagram of queue formation process.

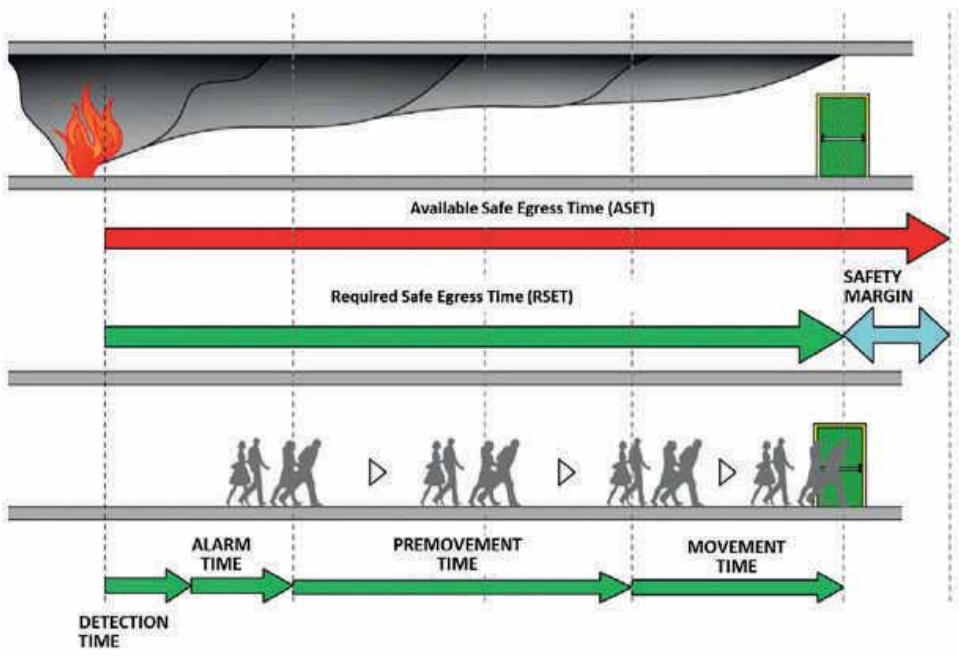


Figure 5 - Time of evacuation

The users' escape from a tunnel is a flow of actions, carried out by groups of individuals with specific behaviours, moving along rough terrain and in a hostile environment.

The elements used to execute a simplified simulation method for escaping scenarios are:

- Geometric parameters: for defining the emergency exits and the obstacles present during the evacuation path (the users' spatial distribution in the event initial stage);
- Distribution functions: for defining the time phases during the evacuation procedure (Perception time, reaction/response time, evacuation time);
- Chemical-physical parameters: for defining the hostile environment of the escape procedure (the variables representing the risk flow).

The evacuation process simulation can be designed by developing models of increasing complexity, in function of the escape path size, taken as representative of the approach used in the formulation of the adopted solution techniques.

Among the models that can be applied (mono-dimensional, bi-dimensional, Lagrange or Euler models, deterministic or statistic techniques), the one that can apparently offer the best outcome is the Lagrange method. Indeed, it allows to define the movements of each person involved in the event and it can include the interaction among individuals, by using appropriate interaction prospective.

The Monte Carlo method generates a statistically significant sample of people involved in an escape. In Figure 6, it is represented the users' distance from the nearest emergency exits and the evacuation time. The green lines show the emergency exits and the blue lines are the users escaping from the fire. As shown in the graph, two of the three emergency exits are not available due to the fire, therefore the users are obliged to

evacuate through one exit. Only the groups from the 8th to 16th can manage to evacuate the tunnel, meanwhile, the victims are represented by the asymptotically horizontal curves, due to the emergency exits distance and the incompatible environmental conditions with survival.

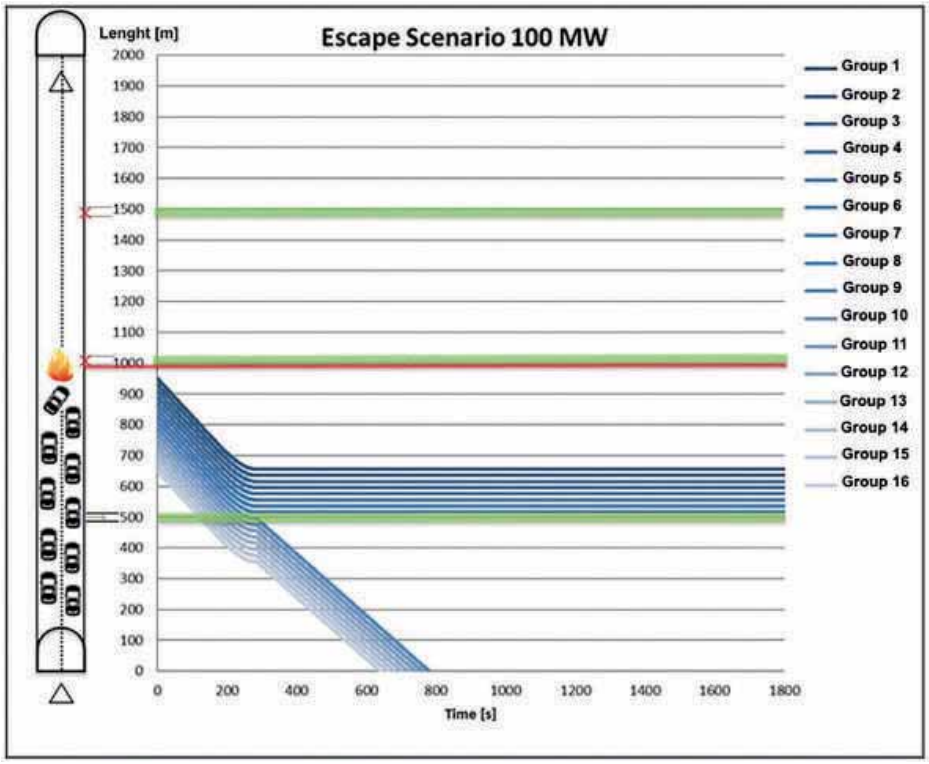


Figure 6 - Escape scenario simulation

5. EURAM RESULTS

The risk quantification results are expressed through the indicators established by the Legislative Decree n.264/2006:

- The Social Risk is represented as Complementary Cumulated Curve (C.C.C.), reported on the F - N plan;
- The Expected Value of Damage (EVD) is determined as the subtended area to the Complementary Cumulative Curve.

The variable taken as representative, when defining the risk magnitude of a tunnel, is the number of victims consequent to a critical accident event.

Social risk is normally calculated assessing the event frequency (f) over a year and the number of victims (N) related to each individual event identified and possible consequences. Each "f-N" combination can be represented by a dot on a graph, consequently generating histograms known as "f-N-curves".

The area between the Reasonable Risk curve and the Acceptable Risk curve defines the area of application of the ALARP principle (As Low As Reasonably Practicable). This principle, taken as the guiding criteria for the costs-safety analysis, establishes that the decreasing of the risk level in a specific tunnel must be compatible with the intrinsic, technical and financial structural project's restrictions.

The optimal design solution is obtained by the combination between the preventive and the protective safety measures considered appropriate to ensure an acceptable risk level for the analysed tunnel.

The intrinsic risk level of a generic tunnel is defined by the Complementary Cumulative Curve (C.C.C.) of the F-N plan, which allows to represent the risk as a complete distribution of potential loss, highlighting the uncertainty effect related to a malfunction or to the inadequacy of the safety systems adopted.

The area subtended by a Complementary Cumulative Curve (C.C.C.) originates a global risk indicator, suitable to define the equivalence conditions among various design solutions for a tunnel system, since it sets beforehand the appropriate comparison criteria which take into account the uncertainties related to the system.

In case of a road tunnel, the curves F-N (Figure 7) represent - on a logarithmic scale - the function:

$$1 - F_N(x) = P(N > x) = \int_x^{\infty} f_N(x)dx$$

Where:

- $F_{N(}x)$ is the probability distribution function of victims' number per year;
- $f_N(x)$ is the probability density function of victims' number per year.

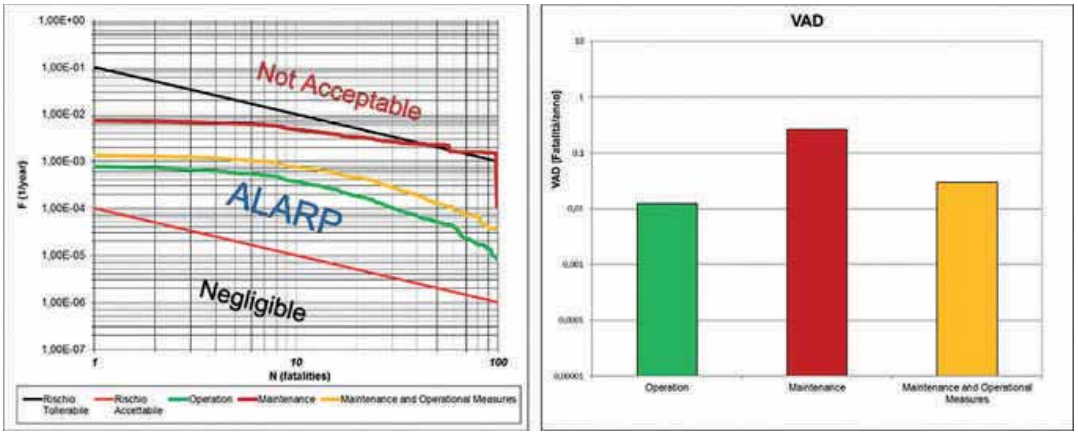


Figure 7 - The Road Tunnel F-N Diagram

The probabilistic approach and the Monte Carlo method consent to represent the risk level by a continuous curve.

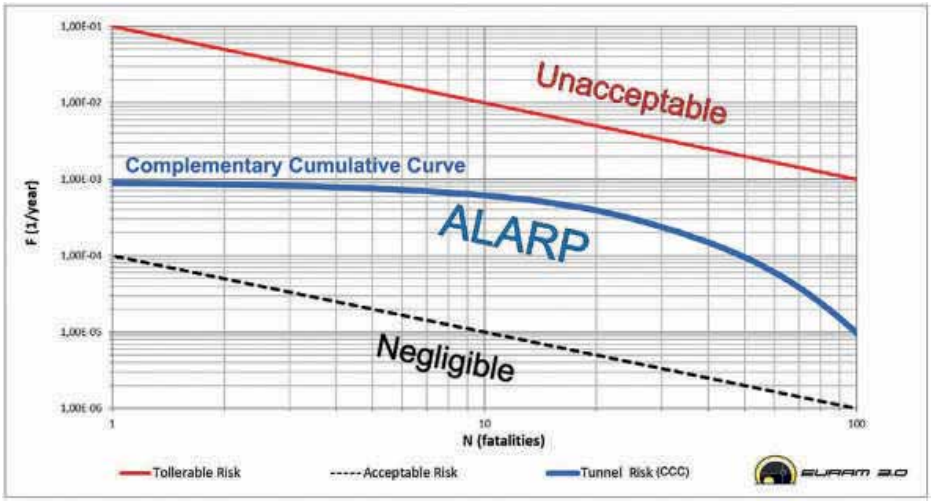


Figure 8 – EURAM output

The risk analysis results are also explained in terms of temperature, visibility and CO concentration for the main fire simulations of the basic hazard scenarios (previously mentioned).

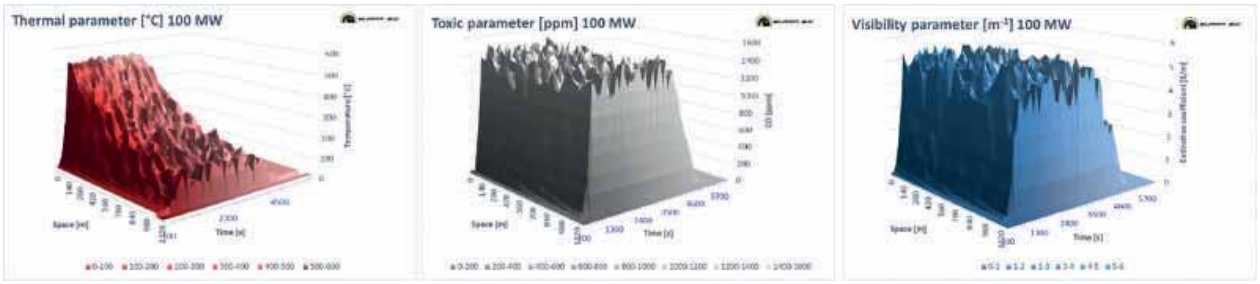


Figure 9 – Thermo-fluid dynamic analysis results

The following table shows the reference list for safety analyses carried out by EURAM 3.0.

Table 1a - Safety analyses carried out by EURAM 3.0

N. of tunnels	N. of tubes	Lenght [m]	Tunnel manager	Highway/ road	Direction
13	23	16.664	Autostrade per l'Italia	A1	Milano-Napoli
15	18	12.657	Autostrade per l'Italia	A10	Genova-Ventimiglia
18	36	38.779	Autostrada dei Fiori S.p.A.	A10	Savona-Ventimiglia-Confine Francese
17	34	40.759	Autostrade per l'Italia	A12	Genova-Roma
12	24	20.692	Salt SpA	A12	Sestri Levante-Livorno
1	2	3.342	Autostrade per l'Italia	A12	Genova-Sestri Levante
1	2	1.844	Soc. Autostrada Tirrenica p.a.	A12	Livorno-Civitavecchia
22	41	18248	Autostrade per l'Italia	A14	Bologna-Taranto
4	8	9.817	Autocamionale della Cisa SpA	A15	Parma-La Spezia
1	2	1.708	Salt SpA	A15	Parma-La Spezia
2	4	3.414	Autostrade per l'Italia	A16	Napoli-Canosa
1	2	3.122	Consorzio Autostrade Siciliane	A18	Messina-Catania
7	12	36.328	Autostrade per l'Italia	A1Var	Milano-Napoli
6	12	22.719	Consorzio Autostrade Siciliane	A20	Messina-Palermo
5	8	6.513	Autostrada del Brennero SpA	A22	Autostrada del Brennero
14	26	40.132	Autostrade per l'Italia	A23	Palmanova-Tarvisio
19	36	36.506	Autostrade per l'Italia	A26	GE-Voltri-SS 33 semp.-Gravell. Toce
4	8	15.065	Autostrade per l'Italia	A27	Venezia-Belluno
59	113	101.286	A.N.A.S. SpA.	A3	Salerno-Reggio Calabria

Table 1b - Safety analyses carried out by EURAM 3.0

N. of tunnels	N. of tubes	Lenght [m]	Tunnel manager	Highway/ road	Direction
3	6	4.378	Autostrade per l'Italia	A30	Caserta-Salerno
1	2	1.604	AutostradaAsti-Cuneo S.p.A.	A33	Asti-Cuneo
10	20	48.699	RAV Raccordo Autostradale Valle d'Aosta	A5	Aosta Traforo Monte Bianco
5	8	11.747	Società Autostrade Valdostane S.p.A.	A5	Raccordo A5- S27 del Gran San Bernardo
7	7	7.144	Autostrada dei Fiori S.p.A.	A6	Torino-Savona
10	11	9.858	Autostrade per l'Italia	A7	Milano-Genova
3	4	2.309	Autostrade per l'Italia	A8/A26	Diramazione Gallarate-Gattico
2	4	2.573	Autostrade per l'Italia	A9	Lainate-Como Chiasso
4	8	6.655	A.N.A.S. SpA.	A90 GRA	Grande Raccordo Anulare
3	6	9.845	A.N.A.S. SpA.	AU 19	Autostrada Palermo Catania
1	2	3.240	A.N.A.S. SpA.	AU 29-D1	Autostrada Palermo Trapani
1	1	5.975	A.N.A.S. SpA.	EG78	Grosseto-Fano
5	10	15.564	A.N.A.S. SpA.	NSA339	Catania-Siracusa
3	6	4.740	A.N.A.S. SpA.	RA06	Bettolle-Perugia
6	11	15.063	A.N.A.S. SpA.	SS 106	SS 106 Jonica
1	2	1.038	A.N.A.S. SpA.	SS 115	SS 115 Sud Occidentale Sicula
6	12	11.839	A.N.A.S. SpA.	SS 131	SS 131 Carlo Felice
8	8	7.759	A.N.A.S. SpA.	SS1 var	SS1 var
4	8	6.950	A.N.A.S. SpA.	SS106	SS106 Jonica
2	4	3.107	A.N.A.S. SpA.	SS145	SS145 Sorrentina
2	2	1.972	A.N.A.S. SpA.	SS20	SS20 del Colle di Tenda e di Valle Roja
1	1	1.560	A.N.A.S. SpA.	SS223	SS 223 di Paganico
3	6	5.271	A.N.A.S. SpA.	SS318var	Perugia-Ancona
2	4	9.462	A.N.A.S. SpA.	SS640	SS640 di Porto Empedocle
1	2	1.317	A.N.A.S. SpA.	SS76	Roma-Ancona
6	12	21.383	A.N.A.S. SpA.	SS77var	Foligno-Civitanova Marche
1	1	750	A.N.A.S. SpA.	SS96	SS 96 Barese
322	579	651.396	-	-	-

Total n. of tunnels	322
Total n. of tubes	579
Total amount of km	651

6. SCADRA SYSTEM (SUPERVISORY CONTROL ACQUISITION AND DYNAMIC RISK ANALYSIS)

The method validity and accuracy and the widespread use have permitted EURAM 3.0 to be used for the Dynamic Risk Analysis (DRA) and the real-time risk assessment in tunnels thanks to the SCADRA system (Supervisory Control Acquisition and Dynamic Risk Analysis).

The SCADRA system is a technological innovation that can have a great impact on the road tunnels field. In the last 3 years, the system has already been successfully installed in many road tunnels and it carried out over 50.000 simulations. The acquired data show consistency within the road tunnel environment and the calculated risk levels are perfectly consistent with the input parameters' trend, allowing to evaluate the change of each value that could influence the tunnel safety level.

The SCADRA configuration sets alongside the traditional SCADA, a system of acquisition of all the parameters, that can influence the tunnel management. The system acquires information on the operating status of the safety systems, on the environmental conditions and on the state of traffic within the tunnel, necessary for the subsequent dynamic risk analysis.

Through the elaboration and analysis of all parameters acquired from sensors and system, a continuous monitoring of the safety level of the tunnel is carried out, performing the Dynamic Risk Analysis at regular preestablished intervals, under normal operating conditions and in case of sudden changes in the traffic conditions, environmental conditions or the level of systems functioning for an immediate re-evaluation of safety conditions.

The Smart Tunnel and the SCADRA system allow controlling the systems in the tunnel and improving the effectiveness of the operational and integrative measures increasing the safety of the users and producing also other advantages like energy savings and the improved scheduling of maintenance.

Figure 10 - Smart Tunnel with SCADRA

The equipment installed elaborates an analysis on a series of external input data. These external input data are divided into 2 macro categories:

- Fixed inputs: are the input data related to the tunnel structure, which are not variable over time, unless the structure characteristics or the tunnel systems change;
- Variable inputs: are the input data that may vary over time, such as the weather conditions, the vehicular flow and the actual tunnel systems efficiency (lighting, ventilation, etc.).

The SCADRA subsystem acquires, as dynamic inputs, the input data and the parameters necessary for its processing directly from the SCADA system. The information provided by the sensors and the historical data recorded are processed by the SCADRA through a specific software in order to execute a risk assessment in real time and to determine if the risk is tolerable or if it is necessary to implement further safety measures.

Figure 11 shows the SCADRA system layout.

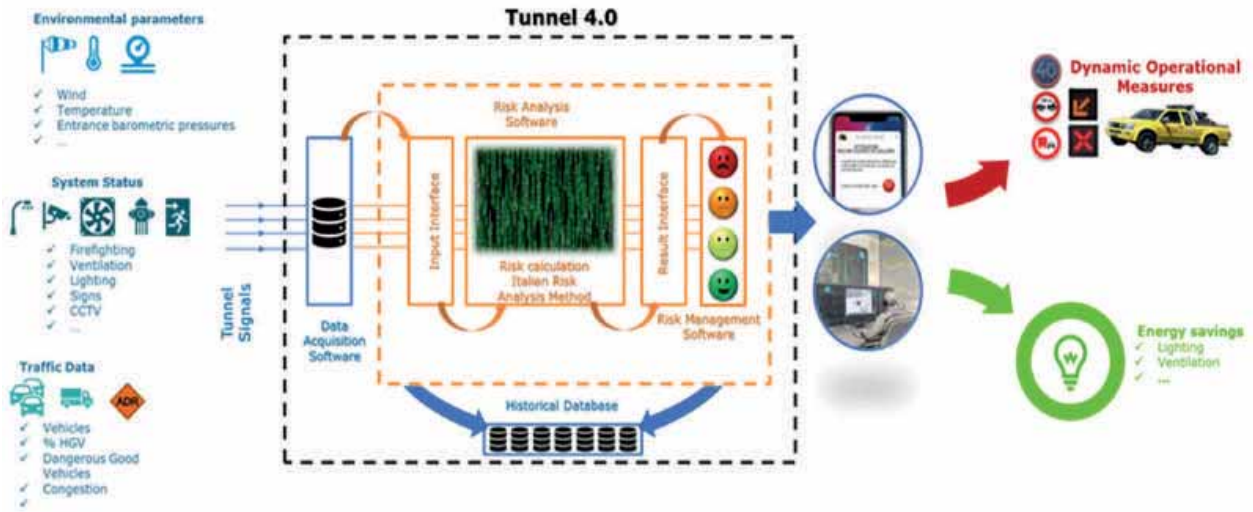


Figure 11 – SCADRA System Layout

All these inputs are used to perform a dynamic risk analysis with SCADRA, which allows to quickly alert the competent authorities in an emergency event, to apply operational measures in order to guarantee the expected risk level or to activate the energy saving mode in case of optimal safety conditions. According to the expected level of risk, SCADRA provides a safety management that can be used for planning preventive measures or executing protective measures.

6.1. The Dynamic Risk Analysis (DRA)

SCADRA is based on the Dynamic Risk Analysis (DRA), where the data are acquired by technical systems and specific sensors. Afterwards, a processor installed in the server performs the DRA and manages the residual risk. The DRA results are processed in order to classify the value of the risk according to pre-established levels that allow to undertake the appropriate actions associated with them and envisaged in the risk management plan.

The Dynamic Risk Analysis is implemented normally every 10 to 15 minutes, during the operation period, and in case of sudden changes of traffic or environmental conditions and operating level of safety systems. The risk value is obtained by executing the quantitative probabilistic analysis, according to the method defined by the Italian Law (Italian Risk Analysis Method - IRAM), and the results are represented by the Expected Value of Damage (EVD) and the F-N Curve, which defines the social risk.

The tolerability and acceptability criteria are settled by evaluating the risk level in real time (Live Expected Value of Damage - LEVD) and by comparing it with the reference value, assessed during the tunnel design and approved by the Administrative Authority.

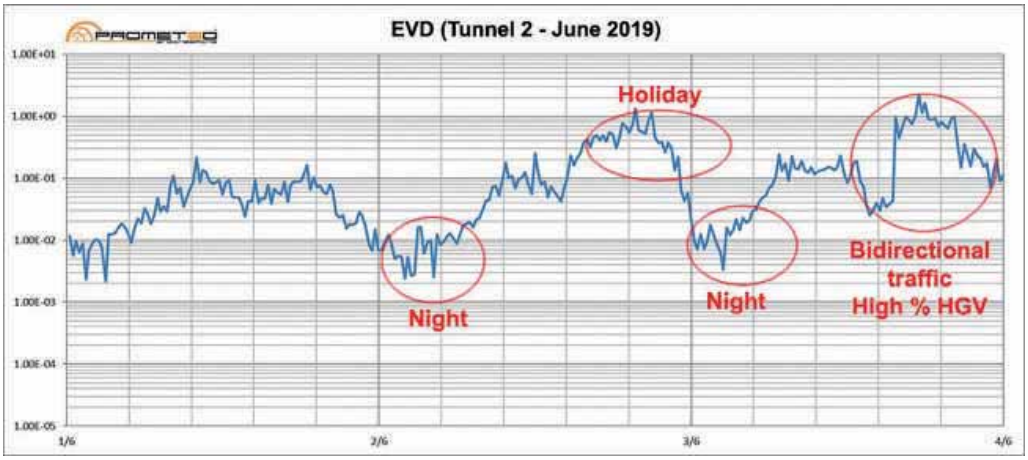


Figure 12 - LEVD calculated by SCADRA system

If the real time risk becomes relevant, SCADRA starts to manage the technical systems and to introduce effective safety operational measures that can reduce it.

The risk level, calculated as Expected Value of Damage (EVD), has been classified according to 4 categories of instantaneous risk:

- Level 1: Low risk level (EVD continuously below the reference value), which corresponds to optimal safety conditions, where the energy saving mode can also be permitted;
- Level 2: Normal risk level (EVD close to reference value), which corresponds to standard safety conditions;
- Level 3: Pre - alert level (EVD is equal to the reference value);
- Level 4: Alert level (EVD exceeds the acceptable risk level).

The risk levels are represented by a graphical interface, which shows different coloured emoticons according to the real time risk level.

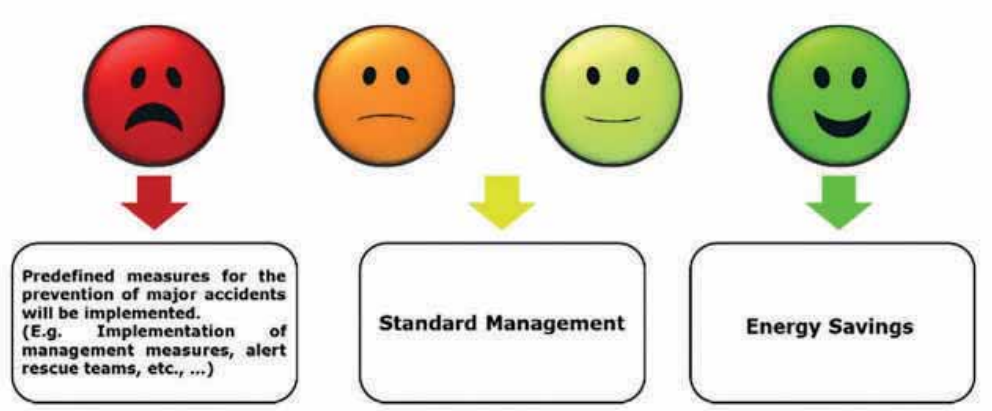


Figure 13 - Dynamic Risk Analysis results

REFERENCES

[1] A. FOCARACCI – "Italian Risk Analysis Method (IRAM)", International Conference Underground Construction Prague 2010 'Transport and City Tunnels', Prague, June 2010

[2] A. FOCARACCI - "The Italian Risk Analysis Method (IRAM)", The First Arabian Tunnelling Conference & Exhibition, Dubai, 10-11 December 2013

[3] A. FOCARACCI - "The Smart Tunnel in the safety design", Magazine Strade&Autostrade – May 2017

[4] A. FOCARACCI, G. GRECO - "Smart Tunnel and Risk Analysis", World Tunnel Congress WTC DUBAI, Dubai, April 2018

[5] A. FOCARACCI, G. GRECO - "The methodology of quantitative risk analysis in the application of the Legislative Decree n.264/06", World Tunnel Congress WTC NAPOLI, Naples, May 2019

[6] A. FOCARACCI - "Smart Tunnel and Dynamic Risk Analysis", 26th World Road Congress Abu Dhabi, 6-10 October 2019

[7] A. FOCARACCI - "SCADRA: Innovation for Tunnel", IRF Global R2T Conference Las Vegas, NV, 19-22 November 2019

[8] A. FOCARACCI - "Energy Savings in Road Tunnels. A Risk-Based approach", World Tunnel Congress WTC Copenhagen, 22-28 April 2022

SMOKE CONTROL IN NATURALLY VENTILATED TUNNELS

António Galhardo[1]
João Carlos Viegas[1]
Pedro Coelho[2]
Elio Ortega[3]
Ulisses Fernandes[1]

[1]National Laboratory for Civil Engineering, Portugal
[2]Instituto Superior Técnico, Portugal
[3]Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Vehicle fires are a relevant emergency in tunnels. In such an event, the most dangerous hazards to tunnel passengers are the inhalation of toxic combustion products (namely, carbon monoxide - CO) and the loss of visibility due to soot, which are generated in the fire. This paper studies the flow of combustion products during fires in naturally ventilated tunnels, comparing the situations without and with wind action. Natural ventilation may be an effective way of guaranteeing the safety of passengers, especially in short tunnels. If the lower layer of the tunnel remains relatively uncontaminated while the combustion products flow in a buoyancy-driven ceiling jet, passengers can escape the tunnel. However, wind opposing to the ceiling jet may reduce its velocity and disturb it, causing the contamination of the lower layer closer to the fire, when compared with the no wind condition.

There is a lack of research to predict in detail under which conditions the contamination of the lower layer with combustion products occurs, when affected by the wind action. An open-source Computational Fluid Dynamics (CFD) code, fireFOAM, was used to conduct Large Eddy Simulations (LES) of naturally ventilated tunnel fires. The numerical model was validated by simulating a pool fire from the Memorial Tunnel Fire Test Program and comparing with experimental results, showing reasonable agreement. Several other scenarios were simulated, considering different values of the external wind velocity, heat release rate (HRR) and tunnel slopes. The contamination of the lower region of the tunnel with soot was analysed as a function of the distance to the fire. The influence of outside wind was also analysed by comparing the fields of soot mass fractions in simulations with and without wind. The consequences of the smoke flow to the tunnel user's safety were examined.

CONTROL DEL HUMO EN TÚNELES CON VENTILACIÓN NATURAL

Los incendios de vehículos son una emergencia relevante en los túneles. En dichos eventos, los mayores peligros para los pasajeros del túnel son la inhalación de productos de combustión tóxicos generados en el incendio (por nombrarlo, el monóxido de carbono - CO) y la pérdida de visibilidad debido al hollín. Este documento estudia el flujo de productos de combustión durante incendios en túneles con ventilación natural, comparando las situaciones sin y con acción del viento. La ventilación natural puede ser una forma eficaz de garantizar la seguridad de los pasajeros, especialmente en túneles cortos. Si la capa inferior del túnel permanece relativamente sin contaminar mientras los productos de la combustión fluyen en un chorro de techo impulsado por flotabilidad, los pasajeros pueden escapar del túnel. Sin embargo, el viento opuesto al chorro del techo puede reducir su velocidad y perturbarlo, provocando la contaminación de la capa inferior más cercana al fuego, en comparación con la condición sin viento.

Existe una carencia de investigaciones que permitan predecir con detalle en qué condiciones se produce la contaminación de la capa inferior con productos de la combustión como se ve afectada por la acción del viento. Se utilizó un código de dinámica de fluidos computacional (CFD) de código abierto, fireFOAM, para realizar simulaciones de remolinos grandes (LES) de incendios en túneles con ventilación natural. El modelo numérico se validó simulando un incendio en una tina del Memorial Tunnel Fire Test Program y comparándolo con los resultados experimentales, mostrando una concordancia razonable. Se simularon varios otros escenarios, considerando diferentes valores de la velocidad del viento externo, la tasa de liberación de calor (HRR) y las pendientes del túnel. Se analizó la contaminación de hollín de la capa inferior del túnel en función de la distancia respecto al fuego. También se analizó la influencia del viento exterior comparando los campos de fracciones de masa de hollín en simulaciones con y sin viento. Se examinaron las consecuencias del flujo de humo para la seguridad del usuario del túnel.

CONTRÔLE DES FUMÉES DANS LES TUNNELS À VENTILATION NATURELLE

Les incendies de véhicules sont une urgence pertinente dans les tunnels. Dans un tel cas, les dangers les plus dangereux pour les passagers du tunnel sont l'inhalation de produits de combustion toxiques (à savoir, le monoxyde de carbone - CO) et la perte de visibilité due à la suie générée par l'incendie. Cet article étudie l'écoulement des produits de combustion lors d'incendies dans des tunnels ventilés naturellement, en comparant les situations sans et avec action du vent. La ventilation naturelle peut être un moyen efficace de garantir la sécurité des passagers, en particulier dans les tunnels courts. Si la couche inférieure du tunnel reste relativement non contaminée pendant que les produits de combustion s'écoulent dans un jet de plafond à flottabilité, les passagers peuvent s'échapper du tunnel. Cependant, le vent opposé au jet de plafond peut réduire sa vitesse et le perturber, provoquant la contamination de la couche inférieure plus proche du feu, par rapport à la condition sans vent.

Il y a un manque de recherche pour prédire en détail dans quelles conditions la contamination de la couche inférieure par les produits de combustion se produit, lorsqu'elle est affectée par l'action du vent. Un code open source de dynamique des fluides computationnelle (CFD), fireFOAM, a été utilisé pour effectuer des simulations aux grandes échelles (LES) d'incendies de tunnels à ventilation naturelle. Le modèle numérique a été validé en simulant un feu de nappe du Memorial Tunnel Fire Test Program et en comparant avec les résultats expérimentaux, montrant un accord raisonnable. Plusieurs autres scénarios ont été simulés, en considérant différentes valeurs de la vitesse du vent externe, du taux de dégagement de chaleur (HRR) et des pentes du tunnel. La contamination de la partie inférieure du tunnel par les suies a été analysée en fonction de la distance au feu. L'influence du vent extérieur a également été analysée en comparant les champs de fractions massiques de suie dans les simulations avec et sans vent. Les conséquences du flux de fumée sur la sécurité des usagers du tunnel ont été examinées.

1 - INTRODUCTION

The road tunnels, by the nature of the traffic and of the goods transported through them, are places where fires may occur. The confinement of the fire and the release of smoke, makes the consequences of this type of accidents particularly serious. Statistics from 1949 to 2010 show that 55 large fire accidents occurred in road tunnels, causing 178 injuries and killing 383 people (most of them killed by the smoke) (Maevski, 2011).

The smoke control is used to keep the environmental conditions compatible with the occupants' safety, during the egress period of a fire, and, later maintain the environmental conditions favourable for the firefighting. In this way, the smoke control may contribute to the success of the firefighting and thus prevent catastrophic consequences on the availability of infrastructure.

The longest tunnels require mechanical ventilation to control the smoke. In this way, the "Road tunnels" Directive 2004/54/EC requires mechanical ventilation for tunnels longer than 1000 m only. But, on the other hand, it is internationally accepted that tunnels longer than 240 m/300 m may need mechanical ventilation (NFPA 502:2014; Instruction technique annexée à la circulaire 2000-63, 2000). When mechanical ventilation is not used and smoke control relies on natural ventilation, the thermal stratification during a fire tends to keep the smoke near the ceiling and a lower layer of fresh air. It is in the lower fresh layer where occupants and firemen stay or move. The key issue in such a case is to avoid strong contamination of smoke into the lower layer while the thermal radiation emitted by the hot layer is not too high. This contamination has been observed to occur rather abruptly when, at a distance x_c from the fire source, the smoke begins to be transported from the upper layer (with velocity pointing away from the fire) to the lower layer (with velocity pointing towards the fire). This is sketched in figure 1.

Figure 1 – Lower layer contamination with smoke in a horizontal tunnel (adapted from Ingason, Li and Lonnermark; 2014)

Natural ventilation avoids the significant costs of mechanical ventilation. However, it can only be relied on as a smoke control strategy if the lower layer contamination does not happen (i.e. if the smoke remains above the occupants' height). Hence, an accurate understanding of this phenomenon under several different scenarios is important.

The problem of the contamination of the cold layer with smoke must be analysed under three different conditions: (i) when the tunnel is completely horizontal, (ii) when the tunnel has a slope (in general, the slope do not exceed 10%) and (iii) when the wind generates a flow inside the tunnel in opposition to the smoke flow. A theory is available only in the first case (although with significant gaps) (Hinkley, 1970; Chan, Zukowski and Kubota, 1992). However, most of the tunnels have a slope that, even being small, will significantly change the smoke flow and it is always necessary to consider that unfavourable wind may occur during the fire event.

This research aims to analyse the contamination of the lower layer with smoke in tunnels with opposing wind and varying slope.

2 – LITERATURE REVIEW

The fire safety of tunnels with natural ventilation depends on the smoke flow pattern. The fire plume entrains fresh air from the lower cold layer up to the base of the hot layer. The mass flow rate of the smoke is related to the fire HRR and the height of the plume (NFPA 92; CEN/TR 12101-5; Cafaro and Bertola, 2010). The fresh air is

flowing from tunnel portals through the cold layer. The smoke flow forms a ceiling jet, confined by the tunnel walls, flowing to the portals. As the smoke is flowing along the tunnel, it is losing heat to the ceiling and walls and is cooling down. As the smoke velocity is due to the density difference between the hot and the cold layers, the smoke velocity is decreasing. Three processes, as referred to in the literature, may cause the contamination of the cold layer with smoke: (i) the difference of temperature between the hot and cold layers is too small and the opposing velocities of both layers may cause the loss of thermal stratification; (ii) due to the decrease of the smoke velocity in the hot layer, the smoke at the smoke front is not able to flow, and as a consequence some smoke will be recirculated through the cold layer (Figure 1); (iii) the smoke front is mixing with cold air, its thickness is increasing and may be a source of cold layer contamination.

The first process is well known and is expected to occur only when the Richardson Number Ri is lower than 0.8 only (Hinkley, 1970; Yang et al., 2010), but in general this does not seem to be the critical process leading to cold layer contamination. However, Yang et al. (2010) found that the stratification pattern for a buoyant flow in a horizontal channel falls into one of three regimes depending on Ri and on Fr (Froude number), but did not distinguish different flow regions. Further attention shall be paid to stratification loss.

The second process, which lies in the class of gravity currents with variable density, is not fully known even for horizontal tunnels. Hinkley (1970) developed its theory for horizontal corridors. He predicted the heat losses from the smoke along the corridor, the smoke flow velocity, and the critical velocity (the velocity that avoids back-layering), but he assumed that maximum thickness of the smoke flow corresponds to half height of the corridor and that far from the fire source the density of the smoke will reach the density of the fresh air, which is not accurate. In a more recent work Hu, Huo and Chow (2008) presented experimental results showing that the smoke flow thickness was in the range of 19%-37% of the height of the tunnel, in contrast with Hinkley's (1970) hypothesis. However, the aim of the work of Hu, Huo and Chow's (2008) was finding the backlayering length and the thickness of the smoke may be still far from the start of cold layer contamination conditions. Using this background information, Viegas (2016) showed that it can be expected that natural ventilation is not suitable for tunnels longer than 400 m, but this value is strongly dependent on the heat transfer to the tunnel walls and ceiling.

Hu, Huo and Chow (2008) also proposed a law for the temperature near the fire source and the temperature variation along the tunnel, as well as for the smoke flow velocity, but the cold flow velocity adopted in their research is close to the critical velocity, and it is expected that the wind velocity is quite lower. As a result, these phenomena were studied close to the fire source and for our research it is very relevant to adopt lower temperatures, which occur far from the fire source, increasing the possibility of loss of stratification, as well as lower velocities. Further information on the smoke temperature is reported in Hu et al. (2007), Cafaro and Bertola (2010), CETU (2003) and Bailey at al. (2002. Heat transfer is reduced while the ceiling and the walls are heating, as expected. Therefore, the heat transfer coefficients need to be adapted for the specific problem to be studied.

The third process is insufficiently known for tunnel conditions with opposing flow due to wind. Most of the research work that was developed on this subject is related to the critical velocity (Brahim et al., 2013; Koslowski and Motevalli , 1994; Oka and Atkinson, 1995; Wu and Bakar, 2000; Kunsch, 2002). Therefore little information is fully addressable to the problem envisaged to this research. Atkinson and Wu (1996) studied the problem of back-layering in sloped tunnels, but their results are relevant only for the prediction of the critical velocity.

One of the largest sources of experimental data from fires in a single tunnel is the Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (MTFVTP) (Bechtel and Brinckerhoff, 1995). This consisted of a series of fires with varying HRR and ventilation conditions in an 853-m long tunnel with a 3.2% slope in West Virginia, USA. Natural ventilation was tested for fires with nominal HRR of 20 MW and 50 MW.

CFD simulations have become an increasingly common tool for the study of tunnel fires. Caliendo et. al (2021) analysed the impact of HRR variation from 8 MW to 100 MW on the flow of smoke in a road tunnel. Kong et al. (2022) investigated the effect of tunnel slope on hot gas movement and smoke distribution in a tunnel fire. They carried out a set of fire simulations, using the Fire Dynamics Simulator (FDS) software, varying the slope from 0 to 10%.

3 - METHODS

3.1 – CFD model

Tunnel fires were simulated using the LES solver fireFoam, which is based on the open-source CFD software OpenFOAM. This code solves the Favre-filtered, three-dimensional Navier-Stokes equations using the finite volume technique and employing the PISO algorithm. The governing equations for mass, momentum, energy and species mass fractions are solved.

The relevant physical phenomena of the flow were modelled using the Smagorinsky model for turbulence, the Eddy Dissipation Model for combustion, and the Finite Volume/Discrete Ordinates Method for radiation. These models were briefly described in Galhardo, Viegas and Coelho (2022).

3.2 – CFD implementation

The CFD model was employed to perform a series of simulations of tunnel fires. The necessity of predicting the three-dimensional flow of smoke in regions spanning several hundred meters in length resulted in large computational domains. To limit the computational cost, the size of the computational domains under study was decreased by taking advantage of the symmetry of the mean flow: in all simulations, only one half of the tunnel width was simulated. On the other hand, the entire length of the tunnels under analysis was simulated, as well as two 50 m-long extensions outside the portals (except for the simulation of a horizontal tunnel without wind, where only half of the length was simulated due to symmetry).

The CFD simulations were performed using an unstructured mesh. The control volumes of this are finest near the fire and coarser away from it, to ensure an accurate simulation of the complex flow in the vicinity of the fire source while avoiding excessively long computational times. The characteristic dimension of the control volumes, $\Delta=V^{(1/3)}$ (where V is the cell volume), was equal to 8 cm in the fire source, 16 cm in a transition region, and 32 cm in the rest of the computational domain. Figure 2 shows the mesh in the vertical symmetry plane for simulations B-F (Table 1).

The fire source was simulated as a horizontal rectangular surface and treated as a source of dodecane at boiling temperature with a vertical velocity calculated based on the desired HRR. At the walls, a no-slip condition with wall functions was used for velocity, while a zero-gradient condition was used for mass fractions of chemical species. An energy balance boundary condition was implemented to calculate the wall surface temperature. The gradient of all variables was set to 0 at the symmetry planes.

At the open borders, the ambient values of temperature and species mass fractions were prescribed for the case of inflow and a zero gradient boundary condition was set for the case of outflow. The variable p', which represents the pressure deviation from the hydrostatic field, had different values for outflow and inflow, according to the following equation:

$$p' = \begin{cases} p_0 - \frac{1}{2}\rho|\mathbf{u}|^2 & flow\ into\ the\ domain \\ p_0 & flow\ out\ of\ the\ domain \end{cases} \quad (1)$$

where ρ, u and p_o stand for the density, velocity vector and free stream pressure, respectively. The values of p_o at the two ends of the computational domain can be adjusted to create a pressure difference between the two portals, which simulates longitudinal wind flow. In the simulations the win is acting from right to left.

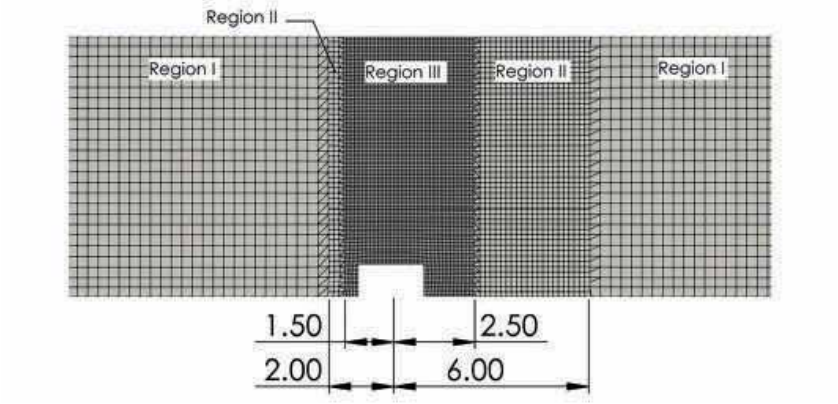


Figure 2 – Mesh refinement near the fire source in simulations B to F (dimensions in m)

3.3 – CFD validation

The CFD model was validated by simulating the tests 501 and 502 of the Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (MTFVTP); details about the tunnel geometry and the test conditions may be found in Bechtel and Brinckerhoff (1995). The tests were carried out for a naturally ventilated tunnel. In both cases, the fire source was a pool fire of Fuel Oil No.2 (modelled as dodecane). In test 501, the time average HRR was 13.5 MW, and the nominal heat release rate ($HRR_{nominal}$) was 20 MW. In test 502, the $HRR_{nominal}$ was 50 MW.

Figures 3 and 4 show the validation cases for the two different HRR (temperatures in Fahrenheit). The velocity and temperature fields for $HRR_{nominal}$=20 MW show a fairly good agreement between tests and simulations. The predicted temperature field for $HRR_{nominal}$=50 MW is slightly colder in comparison with the experimental data.

The grid independence of the CFD predictions was assessed by performing a mesh refinement study, which proved that the current mesh yields results that are approximately independent of the mesh resolution. Furthermore, a study was performed to compare the results from a simulation with the symmetry plane at z=0 with another one that includes the entire width of the tunnel in the computational domain. This was necessary because, although the mean flow is symmetric in relation to this plane, the instantaneous fluctuations due to turbulence are not, which may influence the results when performing large eddy simulations. It was found that using the symmetry plane had a negligible impact on the results reported here, while significantly decreasing the computational cost.

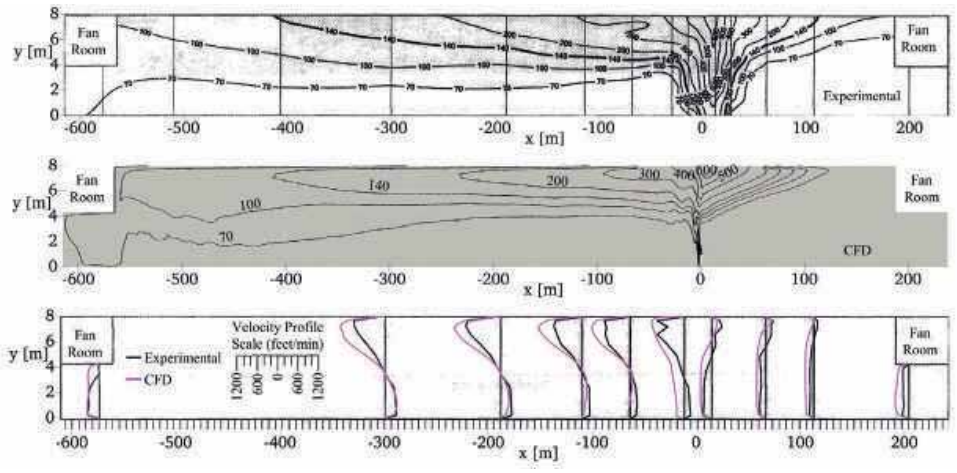


Figure 3 – Comparison of the temperature and velocity measurements obtained for the MTFVTP test 501 with the CFD predictions (natural ventilation, $HRR_{nominal}$=20 MW, t=5 min)

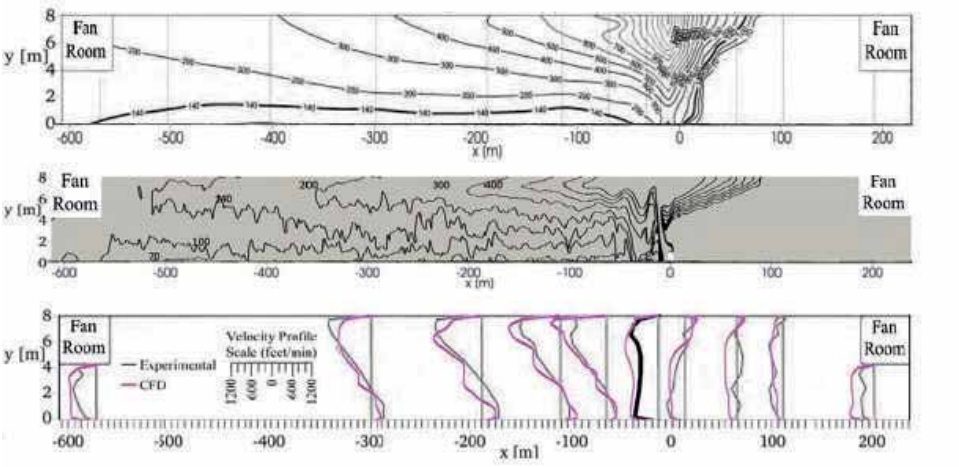


Figure 4 – Comparison of the temperature and velocity measurements obtained for the MTFVTP test 502 with the CFD predictions (natural ventilation, $HRR_{nominal}$=50 MW, t=10 min)

3.4 – Simulation programme

The purpose of this research is to better understand the processes of contamination of the tunnel lower cold layer with the smoke coming from the hot upper layer, considering different conditions of HRR, slope and velocity of the external wind, as well as tunnel cross section area in a future work. This research, which is still in progress, comprises the following steps:

1. The validation of the CFD simulations was carried out by comparing their results with experimental data obtained in full size tunnels. Due to the limited number of full-size tests available, the MTFVT Program (Bechtel and Brinckerhoff; 1995) was chosen. Two different fire sizes were used, allowing the validation for the $HRR_{nominal}$ of 20 MW and 50 MW, as reported in section 2.3 (see Figures 3 and 4).

2. A horizontal tunnel was simulated, keeping the smallest fire size ($HRR_{nominal}$=20 MW) and maintaining the tunnel cross section (Table 1, simulation A). Note that in the Memorial Tunnel two fan rooms shorten the area of the cross-section at both portals. However, a uniform cross-section was maintained in simulation A because most tunnels have the same section all along the tunnel (except some short enlargements for safety use) and it was intended to avoid geometric influences in the cold layer contamination process. This geometric uniformity required the mesh of the CFD model to be changed. The changes were minimised to keep the validation still valid. To be sure that the lower layer contamination process would occur far from the influence of the portal, a longer tunnel was simulated (1800 m total length, where just 900 m were simulated; the value L_{fp} in Table 1 represents the tunnel length between the fire source and the right portal).

3. Using the same horizontal tunnel, the effect of external wind on the lower layer contamination was studied (Table 1, simulations B to G). Considering that the wind action tends to reduce the distance between the fire source and the location of the lower layer contamination, it was possible to reduce the full tunnel length to 1200 m (although just 600 m are shown in the figures). The external wind action (velocity *V*) was considered for the location of Lisbon (Portugal) and was determined from the percentage of time during which the velocity *V* is exceeded (P). External wind velocities corresponding to P ranging from P=5% to P=70% were calculated (the condition of no wind corresponds to a velocity that is exceeded 100% of the time). The corresponding velocities (*v*) of the wind driven flow inside the tunnel ranged from 2.12 m/s to 0.12 m/s.

4. Using the simulation results, a one-dimensional model was developed to predict the lower layer contamination (Galhardo, Viegas and Coelho 2022). This model is not addressed in the present manuscript.

5. A varying slope was introduced in the CFD tunnel model (from 1% to 5%), without the effect of the wind action. Firstly, the slope of 5% was considered, because it is the maximum slope allowed by the "Road tunnels" Directive 2004/54/EC (Table 1, simulation H).
6. For every slope, the wind driven flow velocities inside the tunnel in the range from 2.12 m/s to 0.12 m/s will be considered.
7. Using the simulation results from the steps 5 and 6, the one-dimensional model developed in step 4 will be improved to consider the tunnel slope effect.
8. A varying fire size was introduced in the CFD horizontal tunnel model. A power of $HRR_{nominal}$=50 MW has already been considered, without the effect of the wind action. Other fire sizes will be investigated in future work.
9. Using the same horizontal tunnel, the effect of the external wind on the lower layer contamination will be studied. The value v =0.77 m/s has already been considered (Table 1, simulation I) and further simulations will be carried out for velocities in the range mentioned in step 3.
10. In this step, simulations combining the relevant slopes referred to in step 5 along with wind driven flow velocities inside the tunnel in the range mentioned in step 3 will be carried out.
11. In this step, using the simulation results from the steps 8 to 10, the one-dimensional model developed in step 7 will be improved to consider the fire size effect.
12. In the final step, the effect of different tunnel cross section areas will be assessed.

Due to the large number of possible combinations, the design of experiment methodology will be used to reduce the number of CFD simulations.

Table 1 - Simulation parameters and results

Simulation	L_{fp} [m]	P [%]	V [m/s]	v [m/s]	x_c [m]	$HRR_{nominal}$ [MW]	Slope [%]
A	900	100	0	0	464	20	0
B	600	70.0	0.342	0.122	429	20	0
C	600	50.0	1.26	0.469	360	20	0
D	600	35.0	2.04	0.771	278	20	0
E	600	20.0	3.13	1.19	138	20	0
F	600	10.0	4.37	1.67	-	20	0
G	600	5.00	5.56	2.12	-	20	0
H	600	100	0	0	305	20	5
I	600	35.0	2.04	0.771	173	50	0

4 - SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

Figure 5 presents the longitudinal profiles for the temperature ¯Tdecay (see equation2, where UL stands for upper layer, T_∞ is the ambient temperature, ρ is the density, u is the velocity, $\bar{}(C_p)$ is the specific heat at constant pressure, $\acute{}m$ is the mass flowrate and A is the cross section area) and Richardson Number (Ri) along the horizontal tunnel (from fire to the portal) for simulation A ($HRR_{nominal}$= 20 MW, *v*=0 m/s, slope=0%). The Ri is defined in the equation 3, where h_u represents the upper layer thickness and $\Delta\rho$ the difference between layer densities.

$$\overline{T} = T_\infty + \frac{\int_{UL} \rho u \overline{c_p}(T - T_\infty) dA}{\dot{m}\overline{c_p}} \quad (2)$$

$$Ri = \frac{\Delta \rho g h_u}{\rho \left(|u_u| + |u_l|\right)^2} \quad (3)$$

Figure 6 presents the profiles of the same quantities for variable wind driven velocity (simulations B to F) and Figure 7 shows the profiles for the 5% sloped tunnel (simulation H). While for the horizontal tunnel approximately 35 min are required to reach steady flow, in the case of the sloped tunnel the steady flow is reached at approximately at 10 min.

For the horizontal tunnel, the temperature decays exponentially from the fire source to the exit portal (Figures 5 and 6). Under the effect of the wind driven flow opposing to the ceiling jet, the temperature in the region 50 m < x < 450 m is slightly higher for higher wind velocities, except for P=5% (Figure 6). When the tunnel slope is 5%, the temperature decay is less intense (Figure 7). This behaviour was also found by Kong et al. (2022), who showed that a fast decay of the temperature occurs near the fire source (in the first 25 m), followed by a smooth decay far from the fire source, for slopes higher than 1%.

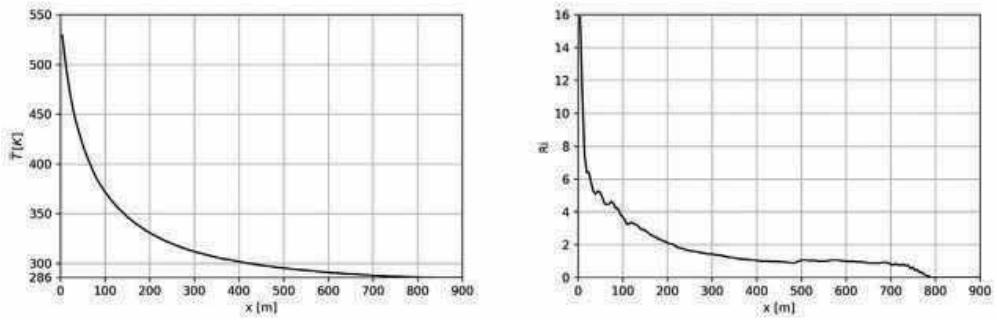


Figure 5 – Temperature and Richardson Number profiles without wind at t = 30 min ($HRR_{nominal}$=20 MW and 0% slope)

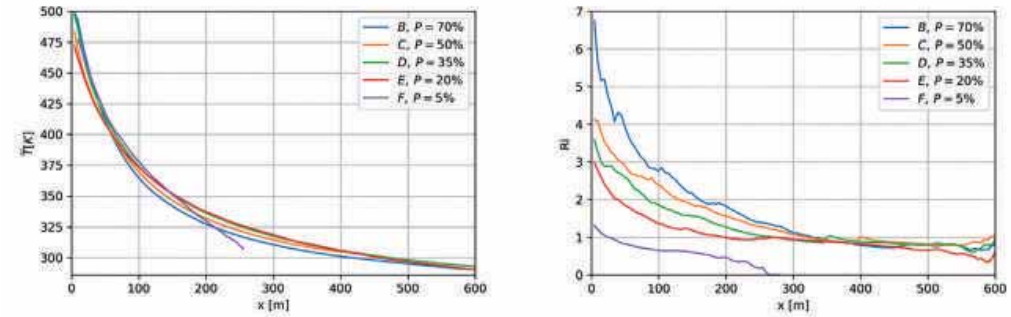


Figure 6 – Temperature and Richardson Number profiles with wind at t = 30 min ($HRR_{nominal}$=20 MW and 0% slope)

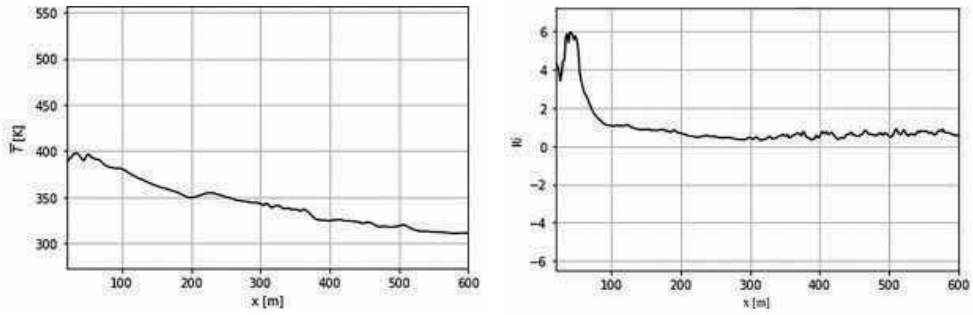


Figure 7 – Temperature and Richardson Number profiles without wind at t = 10 min ($HRR_{nominal}$=20 MW and 5% slope)

In the horizontal tunnel, the Richardson number also decays from the fire source (where the buoyancy term dominates) to the tunnel portal (where the flow shear term becomes more important) (Figures 5 and 6). However, a fast initial decay occurs near the fire, followed by a very smooth decay, approaching the value *Ri*≈1. This change in the behaviour occurs at x ≈ 500 m for a horizontal tunnel without wind (Figure 5), and at a shorter distance from the fire source when the wind driven velocity increases (Figure 6). When the slope of the tunnel is 5% (Figure 7), the Richardson Number decays faster with the distance from the fire source than in the case of a horizontal tunnel and reaches a value Ri<1.0 for a smaller distance from the fire source (x≈120 m).

Figure 8 compares the steady-state vertical temperature and velocity profiles in the tunnel symmetry plane for the cases of horizontal and 5% sloped tunnels (without wind). It shows that, although the velocities in the upper layer are higher for the 5% slopped tunnel than for the horizontal one, the temperature profiles are more uniform for the sloped tunnel case.

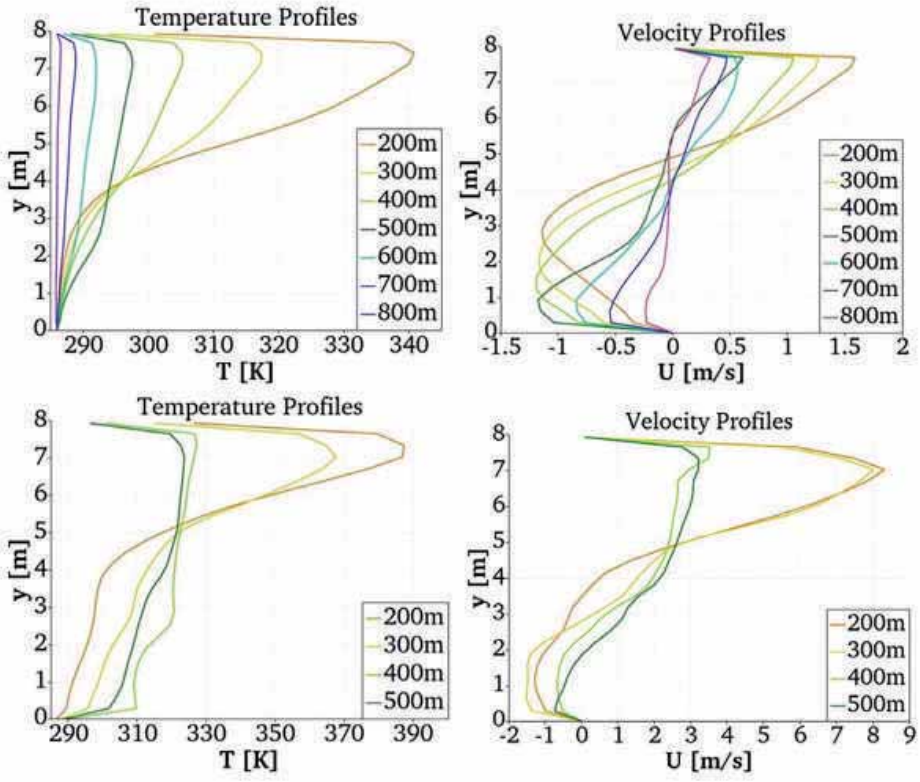


Figure 8 – Temperature and velocity vertical profiles at the symmetry plane for steady-state conditions, no wind and HRRnominal=20 MW (top: horizontal tunnel; bottom: 5% sloped tunnel)

Figure 9 presents the contours of soot concentration in the vertical symmetry plane for a horizontal tunnel without wind action and with wind driven velocity of v =0,47 m/s (Galhardo et al., 2022). The red line corresponds to the zero velocity; thus, it represents the boundary between the upper layer outflow and the lower layer inflow. The white lines represent soot concentration of 80 mg/m^3 and 300 mg/m^3, corresponding to visibility distances for reflecting signs of 5.0 m and 1.3 m, respectively. In both cases, contamination of the inflow with smoke occurs at t = 15 min. This contamination is increasing with time and the smoke is transported by the inflow to locations near to the fire source.

Figure 10 presents the soot concentration in the vertical symmetry plane for a horizontal tunnel with wind velocity of v =0.77 m/s for two different fire source sizes. The development of the smoke contamination is similar but is much more intense for the higher HRR. Moreover, the comparison between Figures 9 and 10 shows that the contamination of the lower inflow layer with smoke increases with v.

Figure 11 compares the soot concentration for different slopes. The soot transport process is similar for the 5% sloped tunnel when compared with the horizontal case but is much faster. The velocity is higher in the 5% sloped tunnel because the slope increases the stack effect and the heat is mostly convected to the portal at the upper side of the tunnel (right side of the fire source in Figure 11), while it is equally convected to both sides in the horizontal tunnel. The irregularities of the zero-velocity line far from the fire source correspond to eddies that increase the mixing process between layers. Due to the slope, the zero-velocity line almost touches the pavement for x>400 m. In accordance, Figure 8 shows that the lower layer is thin, and its velocity is close to zero. This behaviour is different from that observed for the horizontal tunnel (simulation A), where there is always inflow at the lower layer.

The safety of the occupants of a tunnel is in danger when the smoke propagates to a height lower than that of the occupants. This happens when the smoke free height, defined as the value of y (height) at which soot concentration reaches 20% of its maximum value (NFPA 92), becomes smaller than about 2 m. Figure 12 (left) shows the time variation of the smoke free height for HRRnominal=20 MW, 0% slope and without wind (simulation A). It reveals that the smoke firstly reaches a height of 2 m at x ≈ 450 m (x_c=464 m for simulation A, as shown in Table 1). Later, the contamination reaches x=100 m, due to the lower layer soot transport process.

The influence of the wind is illustrated in Figure 12 (right), which shows the time variation of the smoke free height for simulations A to E at location x_c, where the contamination of the lower layer firstly occurs. The increment of the wind velocity reduces the time available for the egress of the users in simulations B and C (where the wind velocity is lowest). In the case of simulations D and E (where the wind velocity is higher), although the time for the smoke flow to reach section x_c decreases when the wind velocity increases, the time for the smoke free height to become smaller than 2 m is longer, because the higher velocity in the lower layer reduces the concentration of smoke. This is a transition for the results obtained in simulations F and G, where the wind velocity is still higher, and the smoke does not contaminate the lower layer, as discussed in Galhardo et al. (2022).

Figure 13 show results similar to those presented in Figure 12 (left), but for a 5% slope tunnel. The smoke flow may reach x_c, which in this case is related to the maximum flow rate in the upper layer (because the velocity of the upper layer towards the portal is always higher than the velocity of the lower layer towards the fire source), approximately 5 minutes after the ignition (see Figure 11, right) and the turbulent eddies are strongly contaminating the lower layer 8 minutes after the ignition. The thickness of the smoke layer is about 2 m at 3 minutes after the ignition. Hence, the contamination of the lower layer occurs earlier and closer to the fire source in comparison with the previous case of a horizontal tunnel, greatly increasing the risk of smoke inhalation by the occupants.

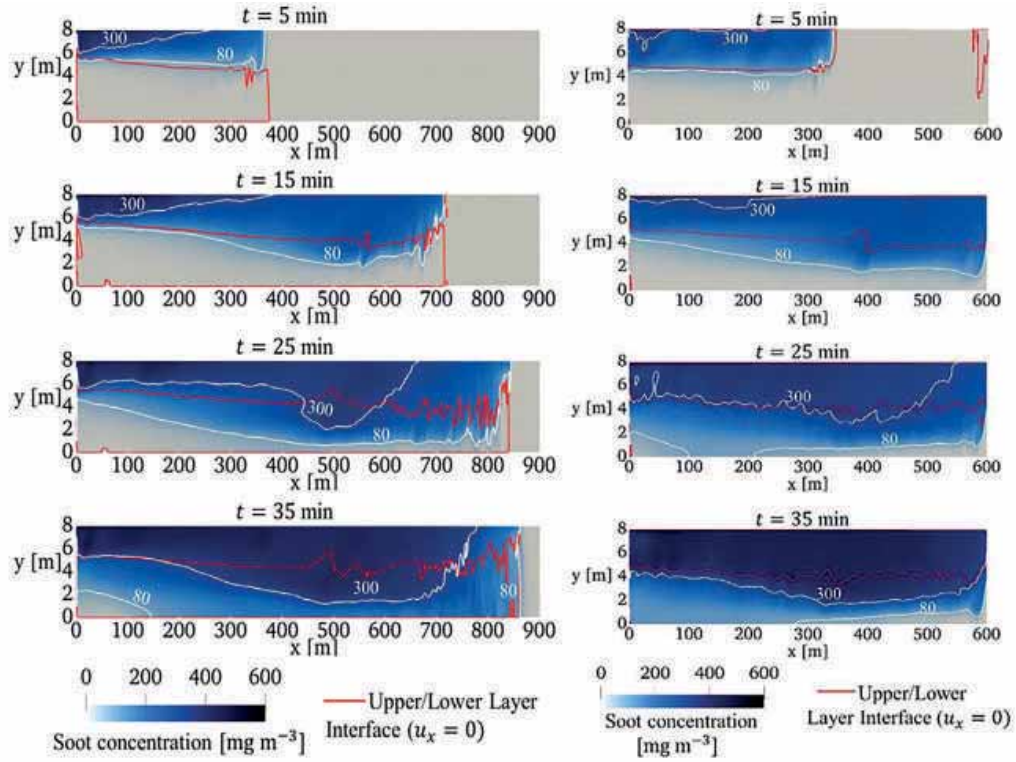


Figure 9 – Comparison of the soot concentration without wind (simulation A – left) and with wind, v =0.47 m/s (simulation C – right), for a fire with $HRR_{nominal}$=20 MW in a horizontal tunnel.

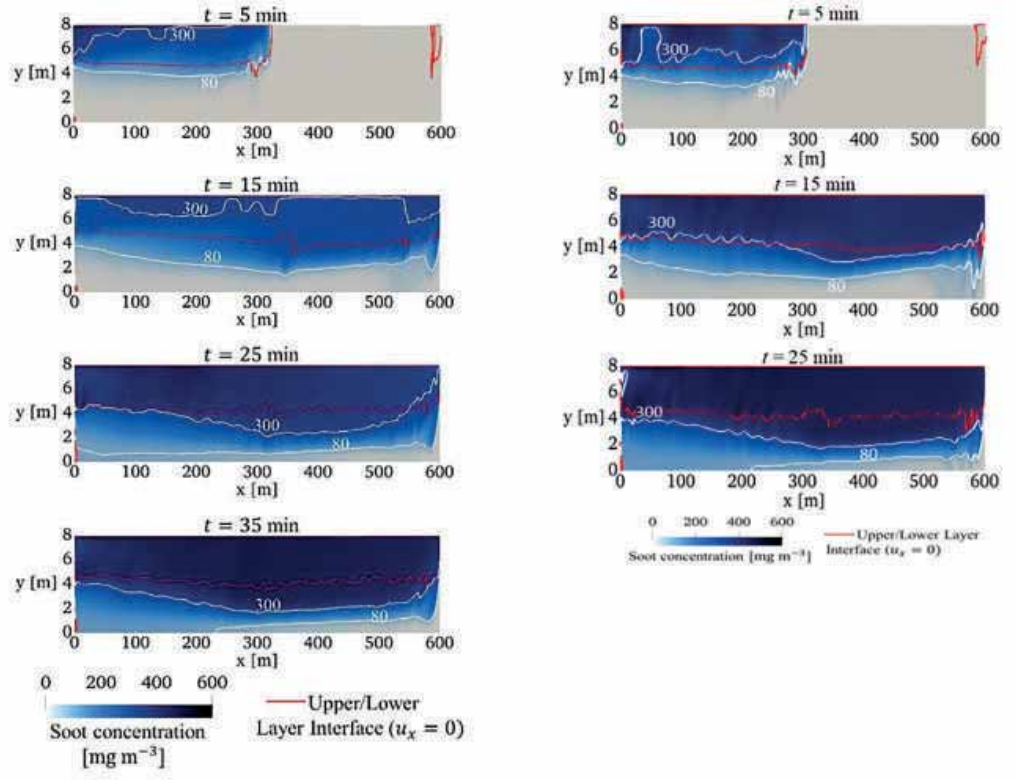


Figure 10 – Comparison of the soot concentration for HRRnominal=20 MW (simulation D – left) and $HRR_{nominal}$=50 MW (simulation I – right) in a horizontal tunnel and with external wind, v =0.77 m/s.

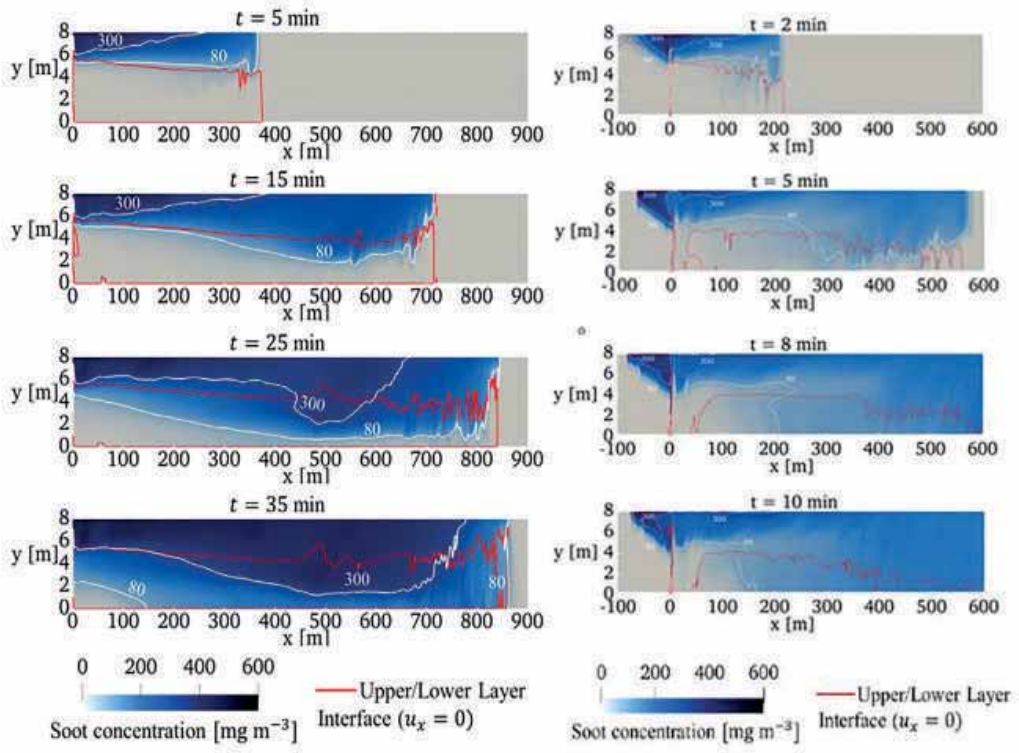


Figure 11 – Comparison of the soot concentration in tunnels with 0% (simulation A – left) and 5% slope (simulation H – right) for a fire with $HRR_{nominal}$=20 MW and without wind.

Clearly, the users will not have time to egress avoiding the exposure to the smoke. Considering that there will be no influence of the lower portal (left portal) on the fire source flow if the fire source is more than 100 m far from the lower portal (this is longer than the backlayering on the left side of the fire source, as illustrated for simulation H in Figure 11), and that the distance to the right portal is 600 m in the simulation, it is clear that the problem of people being trapped by the smoke may arise for tunnels less than 1000 m long. This problem may be solved if mechanical smoke control is applied, and it is an example of a case where it is necessary to use mechanical smoke control means, even for tunnels shorter than 1000 m.

Figures 14 and 15 show the mass flow rate in the upper outflow layer, $\dot{m}$, and the difference between the velocity magnitudes in the upper and lower layers, Δu, at steady state for 0% and 5% slope, respectively. When the outflow (higher layer) velocity magnitude is higher (Δu >0), the mass entrainment from the lower to the higher layer dominates, thus increasing the upper layer mass flow rate (left side of the figure). The process is reversed when the lower layer velocity magnitude is higher, thus decreasing the upper layer mass flow rate. The distance from the location where the velocity magnitude of the two layers is equal (Δu=0) to the fire source increases with the wind velocity. However, when the lower layer velocity magnitude is always higher than the upper layer velocity magnitude, namely in simulations F and G, the smoke flow is stopped and the backlayering length decreases when the inflow velocity increases.

In the case of a sloped tunnel (see Figure 15), the difference between the velocity magnitudes is positive (Δu >0), which indicates that the upper layer outlet flow dominates along the tunnel for x>0. The mass flow rate in the upper layer slightly increases with the distance from the fire, reaching a peak at x≈300 m, followed by a sudden decrease, and then remains almost constant (at $\dot{m}$≈100 kg/s). The slight mass increase for 0 < x < 300 m corresponds to the zone where the inflow velocity in the lower layer is significant (see Figure 8), and the approximately constant mass flow rate observed for x > 320 m indicates that the velocity in the lower layer is small.

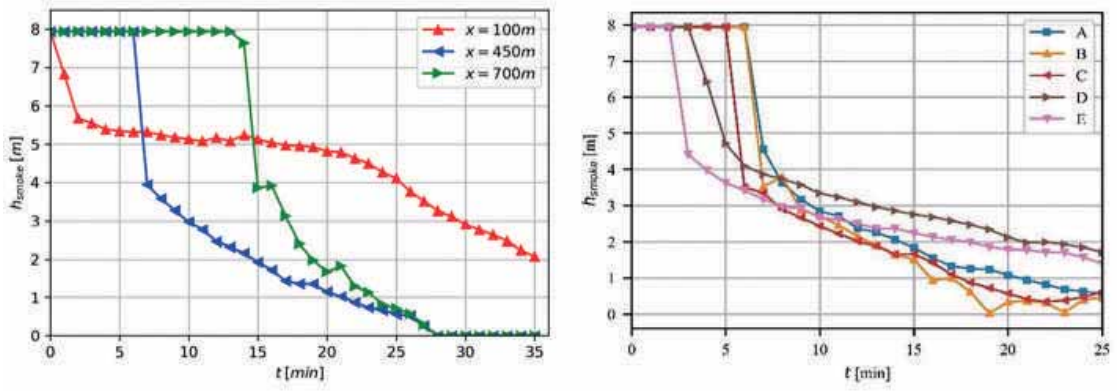


Figure 12 – Smoke free height without wind (left) and for various wind velocities at x_c (right) ($HRR_{nominal}$=20 MW and 0% slope)

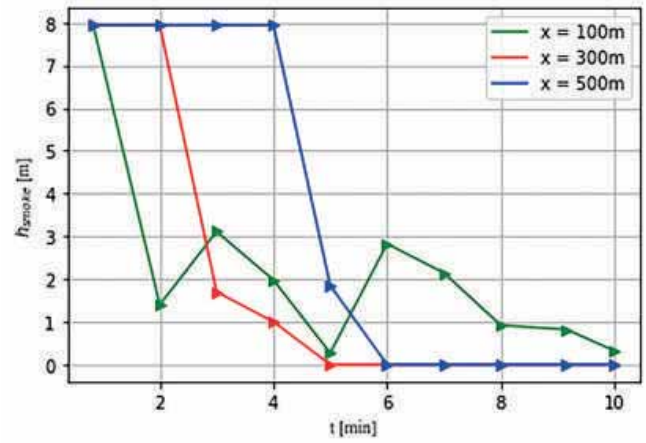


Figure 13 – Smoke free height without wind (left) ($HRR_{nominal}$=20) MW and 5% slope)

This analysis shows that the key issue that generates relevant soot mass transfer from the upper layer to the lower one, thereby contaminating the lower layer, is related to the difference between the velocity magnitude in the two layers. In the simulations F and G, the upper smoke layer stopped inside the tunnel, i.e., ·*m* reached zero (see Figure 14). In these two simulations, the lower layer velocity magnitude is always greater than the upper layer velocity magnitude(Δu<0) and there is no significant contamination of the lower layer (Galhardo et al., 2022). In the other simulations, the upper layer velocity magnitude near the fire source is greater than the lower layer velocity magnitude and relevant lower layer contamination is observed when the lower layer velocity magnitude is higher than that of the upper layer near the portal. Therefore, the location where both velocity magnitudes are equal plays a relevant role for the safety, because the lower layer will be contaminated with smoke for large distances from the fire source, and will transport the smoke back to the fire source. In this process, after some time, the lower layer may present an untenable environment for the survival of tunnel users.

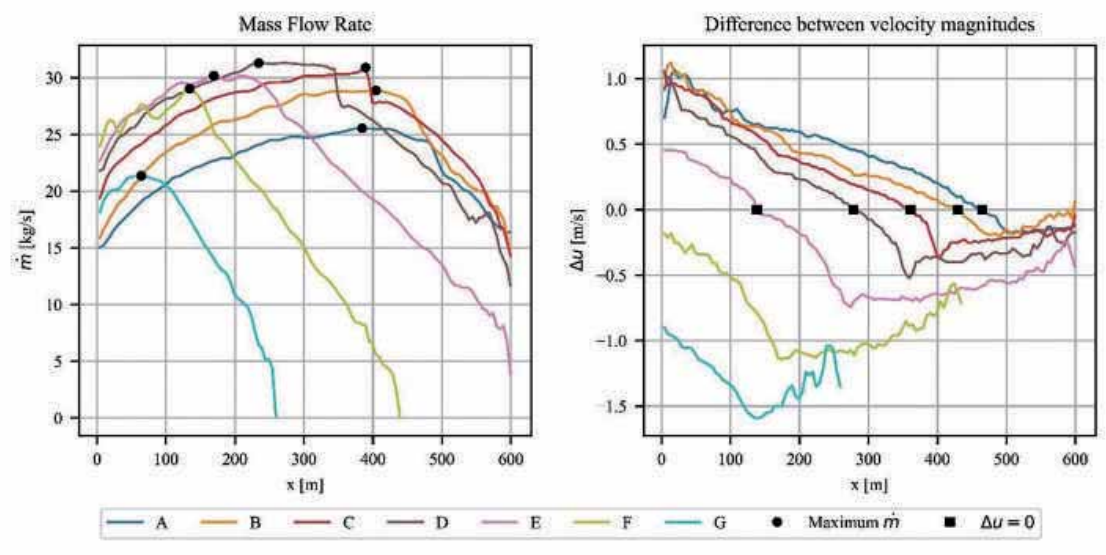


Figure 14 – Mass flow rate in the upper outflow layer, ·m, and difference between velocity magnitudes in the upper and lower layers,Δu, at t = 30 min (HRRnominal=20 MW and 0% slope)

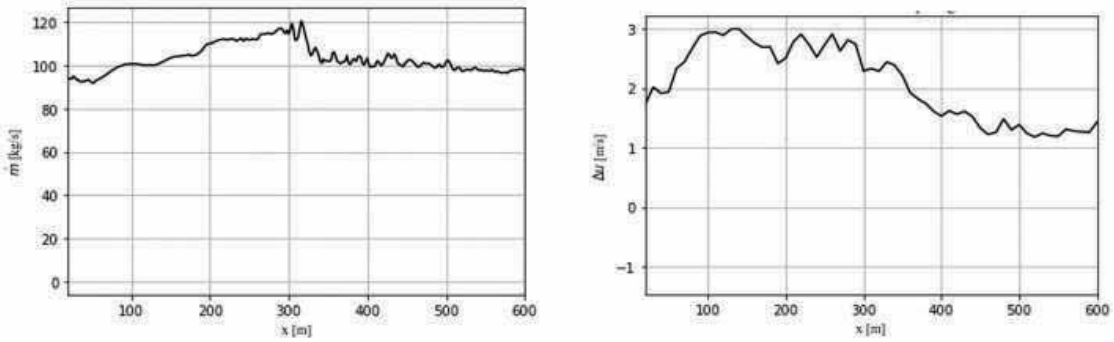


Figure 15 – Mass flow rate in the upper outflow layer, ·m , and difference between velocity magnitudes in the upper and lower layers,Δu, at t = 10 min (HRRnominal=20 MW and 5% slope)

The longest distance between the fire source and the location where Δu=0 is about 460 m for the set of simulations carried out and occurs in the case of a horizontal tunnel with a nominal fire source of 20 MW and without wind (see Table 1). If the tunnel is short and Δu≠0 all along its length, then it is expected that conditions that may lead to the lower layer contamination with smoke will not occur inside the tunnel. Therefore, considering the results of this work, the lower layer will present low contamination for the steady flow, so the users will have good conditions for the egress and will not be conditioned by the time. Otherwise, for longer tunnels, the progressive contamination of the lower layer with smoke will impair the egress of the users after some time has passed since the outbreak of the fire. It is very relevant to see that the external wind (for wind velocities with a high probability of occurrence) may reduce the safety distance up to ≈150 m from the fire source (horizontal tunnel with a nominal fire source of 20 MW and v=1.19 m/s – simulation E). It is unpredictable whether such wind induced velocity will occur or not during the fire.

The Directive 2004/54/EC states that "where emergency exits are provided, the distance between two emergency exits shall not exceed 500 m". This means that the distance xc between the fire source and the tunnel section where the lower layer contamination starts (less than or equal to 464 m in the cases analysed here – see Table 1) is shorter than the maximum distance between two consecutive emergency exits. The worst case occurs when an emergency exit is on the left side of the fire source (in Figures 9 to 11) and the next one is in a tunnel section where $x>x_c$ (from this section to the right, the contamination of the lower layer becomes more

significant). If users staying at the right side of the fire source are not able to cross safely the fire source section and leave the tunnel through the left portal, they will be trapped by the smoke some time after the smoke has reached section x_c.

In simulation A, corresponding to the case with the greatest value of xc (≈450 m), the smoke reaches x_c in 6 minutes after the ignition and the thickness of the smoke free lower layer becomes smaller than 2 m at about 15 minutes after the ignition, as illustrated in Figure 12. The evacuation velocity for people depends on various factors but is not higher than 1 m/s (the NFPA 130 considers 0.63 m/s). This velocity does not consider factors such as the slope, the time necessary to take the decision of evacuation or the time necessary to assess the situation and to find the best egress path. This means that the time necessary to escape from the fire source to a safe zone is clearly higher than 7.5 minutes, which is the time required to travel 450 m at a speed of 1 m/s. This example shows that the tunnel users staying on the right side of the tunnel have a very limited time to take the evacuation decision before being trapped by the smoke.

The simulation I, where $HRR_{nominal}$=50 MW, x_c=173 m (Table 1) and the smoke layer reaches x_c approx. 2 minutes after the ignition, being the time shorter than for the corresponding simulation with $HRR_{nominal}$=20 MW (simulation D; see Figure 12, right), where the smoke layer reaches x_c approx. 3 minutes after the ignition.

5 - CONCLUSIONS

This communication presents a set of simulations that show the process of smoke contamination of the lower layer of a tunnel with a fire source. For this set of simulations, in the case of a horizontal tunnel without wind, the magnitude of the upper layer average velocity is greater than that of the lower layer near the fire source, and smaller far from the fire source. The process of full contamination of the lower layer starts when the magnitude of the upper layer average velocity becomes smaller that of the lower layer. This contamination may impair the egress along the tunnel of users 15 min after the ignition. The atmospheric wind action, when acting against the upper layer velocity, reduces the time available for users to evacuate along the tunnel, for low wind velocities, but may help to keep the lower layer clean for higher velocities. In the case of a higher heat release rate, the process is similar, but the contamination is stronger. This process is much faster for a tunnel with 5% of slope and may occur in less than 10 min and in tunnels as short as 700 m. These results show that it may be necessary to implement mechanical ventilation for tunnels shorter than 1000 m to guarantee the users' safety.

REFERENCES

Atkinson, G.T., Wu, Y. - Smoke Control in Sloping Tunnels. Fire Safety Journal 27 (1996) 335-341.

Bailey, J.L., Forney, G.P., Tatem, P.A., Jones, W.W. – Development and validation of corridor flow submodel for CFAST. Journal of Fire Protection Engineering, 12 (2002).

Bechtel, Brinckerhoff - Memorial tunnel fire ventilation test program. Test report, Massachusetts Highway Department, 1995.

Brahim, K., Mourad, B., Afif, E. C., Ali, B.- Control of Smoke Flow in a Tunnel. Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 6, No. 1, pp. 49-60, 2013.

Cafaro, E., Bertola, V. - Fires in Tunnels: Experiments and Modelling. The Open Thermodynamics Journal, 2010, 4, 156-166.

Caliendo, C., Genovese, G., Russo, I. - Risk analysis of road tunnels: A computational fluid dynamic model for assessing the effects of natural ventilation. Applied Sciences, 11(1):32, 2021.

CEN/TR 12101-5:2005 - Smoke and heat control systems - Part 5: Guidelines on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems. European Committee of Standardization, Brussels.

Centre d'Études des Tunnels – Les dossiers pilotes du CETU. Ventilation. Bron: 2003.

Chan, W.R., Zukowski, E.E., Kubota, T.– Experimental and numerical studies on two-dimensional gravity currents in a horizontal channel. Pasadena: California Institute of technology (1992). Report NIST-GCR-93-630.

Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network.

Galhardo, A., Viegas, J., Coelho, P. J. - The influence of wind on smoke propagation to the lower layer in naturally ventilated tunnels. Submitted to the Tunnelling and Underground Space Technology Journal, 2022.

Hinkley P. L. - The flow of hot gases along an enclosed shopping mal. A tentative theory. Fire Research Note No. 807, Fire Research Station, 1970.

Hu, L.H., Huo, R., Chow, W.K. - Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires. Experimental Thermal and Fluid Science 32 (2008) 1468–1483.

Hu, L.H., Huo, R., Wang, H.B., Li, Y.Z., Yang, R.X. - Experimental studies on fire-induced buoyant smoke temperature distribution along tunnel ceiling. Building and Environment 42 (2007) 3905–3915.

Ingason, H., Li, Y. Z., Lonnermark, A. – Tunnel fire dynamics. Springer, New York, 2014.

Koslowski, C, Motevalli, V. - Behavior of a 2-dimensional ceiling jet flow: a beamed ceiling configuration. In: Kashiwagi T, editor. Proceedings of the Fourth international Symposium on fire safety science. Bethesda, MD: International Association of Fire Safety Science; 1994. p. 469.

Kong, J., You, W., Xu, Z., Liu, H., Li, H. - A Numerical Study on Smoke Behaviors in Inclined Tunnel Fires under Natural Ventilation, Journal of Safety Science and Resilience (2022)

Kunsch, J.P. - Critical velocity and range of a fire-gas plume in a ventilated tunnel. Atmospheric Environment, 33, 1999, pp. 13–24.

Maevsky, Igor – Design fires in road tunnels. A synthesis of highway practice. Washington: Transportation Research Board, 2011.

Ministère de l'équipement, des transports et du logement. Instruction technique annexée à la circulaire 2000-63, 2000. ISBN 0984-7138

NFPA 92: Standard for Smoke Control Systems. National Fire Protection Association, Quincy (USA), 2021.

NFPA 130: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems. National Fire Protection Association, Quincy (USA), 2020.

NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways. National Fire Protection Association, Quincy (USA), 2014.

Oka, Y. and Atkinson, G.T. - Control of smoke flow in tunnel fire. Fire Safety Journal, 25, 1995, pp. 305-322.

VIEGAS, João Carlos - Controlo de fumo por meios passivos em túneis. 5as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos, 1-2 junho de 2016, Lisboa, Portugal.

Wu, Y., Bakar, M.Z.A. - Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems—a study of the critical velocity. Fire Safety Journal, 35, 2000, pp. 363–390.

Yang, D., Hu, L.H., Huo, R., Jiang, Y.Q., Liu, S., Tang, F. - Experimental study on buoyant flow stratification induced by a fire in a horizontal channel. Applied Thermal Engineering 30 (2010) 872–878.

AARR CUANTITATIVOS: HERRAMIENTA EN FASE DE PROYECTO PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO DEL TÚNEL GARANTIZANDO LA SEGURIDAD

Ion Berganza
Cristina Medina
SENER

La redacción de un AARR mediante metodología MARTE es una herramienta que habitualmente se emplea como un trámite administrativo, principalmente en los siguientes casos:

- En fase de diseño: Como parte del proceso de aprobación de un proyecto.
- En fase de explotación: Como verificación del nivel de seguridad por incumplimientos normativos o para analizar la circulación de vehículos de mercancías peligrosas.

En esta comunicación se expondrán casos concretos en los cuales se han desarrollado AARR mediante la metodología MARTE en fase temprana de diseño para facilitar la toma de decisiones con relación a la infraestructura y equipamiento. Esos casos corresponden tanto para túneles de forma individual como para tramos de carretera que incluyen uno o varios túneles, a nivel nacional e internacional.

Durante la fase de diseño, sobre todo con relación a la infraestructura, muchos túneles presentan singularidades que provocan incumplimientos normativos y / o circunstancias particulares que pueden generar incertidumbre con relación a la seguridad. Es por ello por lo que el desarrollo de un AARR mediante el Método General del Escenario Base, complementado con un estudio de evaluación e influencia que analiza la eficacia de distintas medidas, supone una herramienta fundamental y objetiva en la toma de decisiones por parte de la Autoridad Administrativa.

Si bien los requisitos normativos de diseño de un túnel deben considerarse la base del diseño, los resultados obtenidos mediante los AARR facilitan la toma de decisiones ante posibles incumplimientos y / o la garantía de la seguridad de la infraestructura. Los AARR permiten una optimización del diseño con relación al coste / beneficio de la infraestructura, las instalaciones e incluso las medidas de explotación, garantizando en todo caso la seguridad.

QUANTITATIVE RISK ANALYSIS: TOOL TO OPTIMIZE THE DESIGN AND ENSURE TUNNEL SAFETY DURING THE PROJECT PHASE

A risk analysis based in the MARTE methodology is a design tool that usually takes place as an administrative requirement, mainly in two cases:

- In design phase: As a part of the approval process of a project.
- In operational phase: As a necessity to warranty the level of security when not all security requirements are fulfilled or study the movement of dangerous goods vehicles.

This communication presents specific cases in which MARTE risk analysis have been developed in the early design phase to facilitate decision-making in relation to infrastructure and equipment. These cases correspond both to tunnels individually and to road sections that include one or several tunnels, at a national and international levels.

During the design phase and especially in relation to the infrastructure design, many tunnels present non-compliance singularities and / or circumstances that can generate uncertainty in relation to safety. In this phase, a risk analysis of the Base Scenario by General Method with a specific study that analyzes the effectiveness of different improvement measures, is a strong and objective tool that helps the decision-making to Authority and therefore Designers.

Although the standards and codes are in any case the design basis of a tunnel, the results and conclusions obtained from a risk analysis can facilitate decision-making in the event of possible non-compliance and / or to guarantee the infrastructure´s safety. The risk analysis allows a design optimization of tunnel in terms of cost / benefit of the infrastructure, systems or even the operational measures, guaranteeing in all cases safety.

ANALYSE QUANTITATIVE DES RISQUES: OUTIL POUR OPTIMISER LA CONCEPTION ET ASSURER LA SÉCURITÉ DU TUNNEL PENDANT LA PHASE DE PROJET

La préparation d'une analyse des risques à l'aide de la méthodologie MARTE est un outil qui est généralement utilisé comme procédure administrative, principalement dans les cas suivants:

- Dans la phase de conception: Dans le cadre du processus d'approbation d'un projet.
- Dans la phase d'exploitation: Comme une vérification du niveau de sécurité pour les infractions réglementaires ou pour analyser la circulation des véhicules de marchandises dangereuses.

Cette communication, présentera des cas spécifiques dans lesquels l'analyse des risques a été développée à l'aide de la méthodologie MARTE au début de la phase de conception, pour faciliter la prise de décision en ce qui concerne l'infrastructure et l'équipement. Ces cas correspondent à la fois pour des tunnels individuels et pour des tronçons de route qui comprennent un ou plusieurs tunnels, au niveau national et international.

Au cours de la phase de conception, en particulier en ce qui concerne l'infrastructure, de nombreux tunnels présentent des singularités qui provoquent des violations de la réglementation et/ou des circonstances particulières pouvant générer une incertitude en matière de sécurité. Dans cette phase, l'élaboration d'une analyse des risques à l'aide de la méthode générale du scénario de base, complétée par une étude d'évaluation et d'influence qui analyse l'efficacité de différentes mesures d'amélioration, est un outil fondamental et objectif dans la prise de décision par l'Autorité de Gestion.

Alors que les exigences réglementaires de la conception des tunnels devraient être considérées comme la base de la conception, les résultats obtenus grâce à l'analyse des risques facilitent la prise de décision en cas d'éventuelles violations et/ou la garantie de la sécurité des infrastructures. L'analyse des risques permet une optimisation de la conception par rapport au coût / bénéfice de l'infrastructure, des installations et même des mesures d'exploitation, garantissant toujours la sécurité.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La publicación en el año 2012 de la METODOLOGIA DE ANALISIS DE RIESGO EN TUNELES DE LA RED DE CARRETERAS DEL ESTADO, comúnmente denominada MARTE, supuso la primera (y hasta ahora única) metodología para la redacción de análisis de riesgos publicada a nivel nacional.

La trasposición de la Directiva Europea 2004/54/CE, en adelante DE 2004/54, al ordenamiento nacional el año 20006 mediante el Real Decreto 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad de túneles, en adelante RD 635, incluía los siguientes requisitos y especificaciones principales relacionados a los análisis de riesgos - AARR:

- la necesidad de que sean realizados por organismos funcionalmente independientes al gestor del túnel, (*)
- la de necesidad remitir los análisis a la autoridad administrativa (*) y
- que sean incluidos en el manual de explotación del túnel.
- procedimientos de solicitud de excepción justificado o comprobado mediante un AARR,
- casos específicos de necesidad de redacción (*), como carril inferior a 3,50 m o pendiente superior al 3%,
- la obligatoriedad de seguir una metodología detallada y definida,

En el listado anterior se indican con asterisco (*) aspectos traspuestos literalmente de la DE 2004/54 al RD 6335. Con relación a este último punto que obliga a seguir una metodología detallada y definida, indicar que la DE 2004/54 especificaba la necesidad de adoptar un método armonizado de análisis del riesgo.

Solamente la aprobación de la MARTE en el año 2012 completó la necesidad de disponer de la mencionada metodología detallada y definida. La publicación de la metodología permitió disponer de una herramienta de análisis de riesgo que aporta homogeneidad y coherencia a los análisis en el conjunto de la Red de Carreteras del Estado, totalmente necesario ya que cuenta con un total de 349 túneles y longitud total estimada de 296.158 km, en una red total de más de 26 millones de km de carreteras, datos del año 2019.

La MARTE cuenta con la definición de dos métodos cuantitativos de análisis de riesgo, los cuales tienen como objetivos estudiar por un lado la influencia de incumplimientos de requisitos mínimos y por otro el paso de mercancías peligrosas.

- El primer método consiste en comparar el túnel en cuestión, denominado túnel real, con un túnel tipo que cumple con todos los requisitos normativos para un túnel de sus características, denominado túnel virtual, y se denomina Método General.
- El segundo método, está basado en el empleo del software DG QRAM desarrollado por la OECD/OCDE y la PIARC/AIPCR, al cual se le establecen ciertos valores homogéneos y unos valores de aceptación. Se denomina Método de Mercancías Peligrosas.

Habiendo cumplido recientemente una década desde su aprobación, la metodología representa una herramienta totalmente consolidada para la redacción de análisis de riesgo cuantitativos, siendo las situaciones más habituales en casos de túneles de la Red de Carreteras del Estado en las que se redactan las siguientes:

1. En túneles existentes:
   a) Como parte de las tareas del Responsable de Seguridad de Túneles - RST.
   b) En Proyectos de Adecuación a la normativa de seguridad.
2. En túneles de nueva construcción, previo a su apertura, como parte de la documentación necesaria de aprobación del proyecto.

Desde un punto de vista de requerimiento de AARR como alcance en los pliegos de licitaciones de administraciones públicas (MITMA y competencias de Gobiernos de Comunidades Autónomas), tanto en los contratos de Responsable de Seguridad de Túneles como en los proyectos de Adecuación a la normativa de seguridad de túneles existentes están totalmente consolidado.

Por otro lado, en los casos de proyectos de túneles de nueva construcción si bien se redactan los análisis de riesgos pertinentes como parte del trámite administrativo, se puede indicar que de forma generalizada los pliegos de licitaciones no resaltan o especifican su necesidad o conveniencia. En estos casos, aunque los requisitos normativos son siempre la base del diseño del túnel es muy frecuente que se presenten singularidades que provocan incumplimientos normativos y / o circunstancias particulares que pueden generar incertidumbre con relación a la seguridad. En estas circunstancias, además de formar parte del proceso de aprobación del proyecto, los AARR en fase temprana del proyecto van a permitir como mínimo consolidar el diseño de túnel y en caso necesario representar una herramienta excelente en la toma de decisiones.

Existen casos en los que las administraciones si han ido un paso más allá y han requerido trabajos de análisis de riesgos más detallados y extensos que los habituales o estrictamente normativos, poniendo en valor su utilidad y eficacia durante el proceso de diseño o adecuación del túnel. En este sentido, resaltar el ejemplo de la Diputación Foral de Bizkaia en los pliegos[1] de asistencia técnica para la redacción del "Proyecto Adecuación del túnel de La Avanzada en la BI-637", del año 2020, donde en el criterio de ponderación se valoraba con 10 puntos sobre el total de 100 (suma de técnica y administrativa) los trabajos correspondientes a los análisis de riesgos, describiéndolos de manera somera de la siguiente forma:

> *1. Se realizará un análisis crítico de la metodología propuesta para el análisis de riesgos planteado en el pliego, que diferencia entre:*
>
> *a. Análisis de riesgos cualitativo y análisis de riesgos cuantitativo.*
>
> *b. Análisis preliminar de riesgos y análisis de riesgos.*

Al igual que en el caso del territorio de Bizkaia, hay casos de proyectos en los que por competencias administrativas o geografías no se dispone una metodología de análisis vigente o incluso normativa de referencia o requisitos de diseño de la infraestructura e instalaciones de un túnel. En estas circunstancias, los análisis de riesgos en fase temprana de diseño representan sin lugar a dudas una herramienta de enorme utilidad.

Los resultados obtenidos mediante los AARR nos permiten disponer de una herramienta objetiva que evalúa la influencia de distintas características o sistemas respecto a la seguridad global del túnel, siendo por lo tanto de enorme ayuda en la toma de decisiones, tanto al consultor como a la Autoridad Administrativa, permitiendo disponer una evaluación del coste / beneficio y comprobando la influencia en la seguridad de la infraestructura. Recordad en este punto que la MARTE analiza la influencia de la infraestructura y su geometría, las instalaciones e incluso algunas medidas en fase explotación (operadores 24/7 o tiempo de llegada de los servicios de emergencia).

En este contexto, desde la aprobación de la MARTE y con el hábito del empleo de la metodología establecido, SENER comenzó a emplear las dos tipologías de análisis de riesgo definidas como herramienta de ayuda y apoyo en fases tempranas del diseño de numerosos túneles. Los últimos años SENER ha desarrollado numerosos análisis de riesgos mediante la MARTE en fase temprana de diseño, de forma que han facilitado la toma de decisiones con relación a la infraestructura y equipamiento proyectado. Estos casos corresponden tanto a túneles existentes como a nuevos, casos en los que se analiza el túnel de forma individual o tramos de carretera, a nivel nacional e internacional, siendo el principal objetivo de esta presentación compartir algunos de estos casos y reflejar su gran utilidad.

En el siguiente apartado 2 se realiza un análisis general de los requerimientos normativos en cuanto a la necesidad y circunstancias que requieren la redacción de un análisis de riesgos. En el apartado 3, se comparte la metodología para la aplicación de los análisis de riesgo y casos de éxito de SENER.

[1] Asistencia técnica para la redacción del proyecto constructivo de adecuación del túnel de la Avanzada en la BI- 637. - Gobierno Vasco (euskadi.eus)

2. ANÁLISIS DE LA NORMATIVA

A continuación, se realiza el análisis de la normativa de aplicación en los túneles de la RCE de forma cronológica, resaltando los casos o circunstancias en las que es perceptivo la redacción un análisis de riesgo y de que tipología.

2.1. Directiva Europea 2004/54/CE

Con relación a los casos de aplicación o circunstancias en las que se debe redactar un AARR en un túnel de cualquier estado miembro, la DE 2004/54 indica:

> *En los casos en que determinados requisitos estructurales establecidos en el Anexo I sólo puedan satisfacerse recurriendo a soluciones técnicas que o bien no puedan cumplirse o que sólo puedan cumplirse con un coste desproporcionado, la autoridad administrativa a que se refiere el artículo 4 podrá aceptar que, como alternativa a dichos requisitos, se apliquen medidas de reducción del riesgo, siempre y cuando las medidas alternativas den lugar a una protección equivalente o mayor. La eficacia de dichas medidas deberá demostrarse mediante un análisis del riesgo, de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 13.*
>
> *(…) Un análisis del riesgo de un determinado túnel tiene en cuenta todos los factores de proyecto y todas las condiciones del tráfico que afectan a la seguridad, en particular las características del tráfico, la longitud del túnel, el tipo de tráfico y la geometría del túnel, así como el número previsto de camiones por día.*
>
> *1.1.3 Cuando un túnel tenga características especiales en lo que se refiere a los parámetros antedichos, deberá llevarse a cabo un análisis del riesgo de conformidad con el artículo 13 para establecer si son necesarias medidas adicionales de seguridad o equipamiento complementario para garantizar un alto nivel de seguridad del túnel. Dicho análisis del riesgo tomará en consideración los posibles accidentes que afecten claramente a la seguridad de los usuarios de los túneles y que puedan ocurrir durante la fase de funcionamiento, así como la naturaleza y magnitud de sus posibles consecuencias.*
>
> *3.7 Transporte de mercancías peligrosas*
>
> - *realizar un análisis del riesgo de conformidad con el artículo 13 antes de definir o modificar la reglamentación y los requisitos relativos al transporte de mercancías peligrosas a través de un túnel;*
> - *estudiar medidas específicas de funcionamiento destinadas a reducir los riesgos relativas a todos o alguno de los vehículos que transportan mercancías peligrosas a través de túneles, como una declaración antes de entrar en los mismos o la formación de convoyes con vehículos de escolta, teniendo en cuenta cada caso particular, además del mencionado análisis del riesgo.*

2.2. Real Decreto 635/20006

La trasposición de la Directiva a la normativa española, además de lo indicado en el apartado anterior, completa las situaciones en las que debe llevarse a cabo un análisis de riesgo incluyendo lo siguiente:

> *Se tendrán en cuenta los parámetros siguientes:*
>
> - *longitud del túnel,*
> - *número de tubos,*

- *número de carriles*
- *geometría de la sección transversal,*
- *planta y alzado (especialmente la pendiente),*
- *tipo de construcción,*
- *tráfico unidireccional o bidireccional,*
- *volumen de tráfico por tubo (incluida su distribución temporal),*
- *riesgo de congestión (diaria o de temporada),*
- *tiempo de acceso de los servicios de emergencia,*
- *presencia y porcentaje de vehículos pesados,*
- *presencia, porcentaje y tipo de tráfico de mercancías peligrosas,*
- *características de las vías de acceso,*
- *velocidad máxima autorizada,*
- *medio geográfico y climatología.*

1.1.3 Cuando un túnel tenga características especiales con relación a los parámetros antedichos, deberá llevarse a cabo un análisis de riesgo de conformidad con el artículo 11 para establecer si son necesarias medidas adicionales de seguridad o equipamiento complementario para garantizar un adecuado nivel de seguridad del túnel. Dicho análisis de riesgo tomará en consideración los posibles accidentes que puedan afectar claramente a la seguridad de los usuarios del túnel, así como la naturaleza y magnitud de sus posibles consecuencias

En lo referente al transporte de mercancías peligrosas por el interior de un túnel, en el punto 3.7 de su anexo I indica:

Transporte de mercancías peligrosas. Con excepción de aquellos túneles incluidos dentro de los itinerarios recomendados para el transporte de mercancías peligrosas, no se permitirá el transporte de éstas por los túneles incluidos en el ámbito de esta disposición, salvo que se demuestre que no hay alternativa más favorable mediante un análisis de riesgo tal como se expone en el artículo 11.

2.3. MARTE

Como es perceptivo, la MARTE traspone el criterio principal por el que la Directiva Europea 2004/54/CE requiere la redacción de un análisis de riesgo:

"Cuando un túnel tenga características especiales con relación a los parámetros antedichos, deberá llevarse a cabo un análisis de riesgo para establecer si son necesarias medidas adicionales de seguridad o equipamiento complementario para garantizar un adecuado nivel de seguridad del túnel".

Posteriormente, la metodología describe una serie de casos específicos, concretamente doce, por los cuales es necesario la redacción de un análisis de riesgo. Los casos son:

1. *Incumplimiento de requisitos estructurales*
2. *Excepcionalidad por técnicas innovadoras*
3. *Características especiales con relación a los parámetros de seguridad*
4. *Desviación con respecto a los requisitos mínimos*

5. *Pendientes superiores al 3%*
6. *Anchura de carril derecho inferior a 3,50 metros*
7. *Ventilación insuficiente y demás medidas de seguridad insuficientes además de la necesidad de habilitar salidas de emergencia.*
8. *Existencia de ventilación longitudinal en túneles bidireccionales o unidireccionales congestionados, si no se toman medidas específicas, tales como una apropiada gestión del tráfico, una reducción de la distancia entre salidas de emergencia y la colocación de extractores de humo a intervalos adecuados*
9. *Evaluación de viabilidad de apartaderos para túneles sin carril de emergencia*
10. *Evaluación de la necesidad de situar equipos de emergencia en el centro de control para el caso de túneles bidireccionales importantes con un gran volumen de tráfico*
11. *Viabilidad del transporte de mercancías peligrosas sin drenaje separativo de longitud de más de 500 metros*
12. *Posibilidad de autorizar el adelantamiento de camiones en túneles con más de un carril por sentido*

Una vez establecidos los casos de aplicación o necesidad de disposición de un AARR, la MARTE detalla la tipología y método de aplicación:

2.3.1. Tipologia de AARR

Ninguna de las dos normativas de seguridad de aplicación hace mención o referencia específica a la tipología de análisis a desarrollar, la cual MARTE encuadra en dos tipos en función del procedimiento y resultados:

- Análisis de riesgo cualitativo
- Análisis de riesgo cuantitativo

La MARTE, en esta elección es muy específica indicando los siguiente:

> *Salvo razones excepcionales debidamente justificadas que aconsejen la utilización de métodos cualitativos, el análisis de riesgo a elaborar para los túneles de carreteras del Ministerio de Fomento se llevará a cabo mediante métodos cuantitativos como los expuestos en la presente metodología. En los casos en que se considere necesario realizar un análisis de riesgo de tipo cualitativo, corresponderá a la autoridad administrativa autorizar el empleo de este método de análisis de riesgo y la posterior aprobación del análisis de riesgo así realizado.*

2.3.2. Método a emplear

Una vez establecida que la tipología de AARR deben ser cuantitativos (salvo excepciones justificadas) y las causas por las que es necesario la redacción de un análisis de riesgo, la MARTE determina cual de los dos métodos de análisis de riesgo cuantitativo se debe emplear en funcion de las causas:

> **Método General:** *Análisis de riesgo por causas debidas al incumplimiento de alguno de los parámetros de diseño geométrico del túnel o por la diferencia de dotación o equipamiento del túnel respecto a lo considerado en la reglamentación en vigor.*
>
> **Método de MMPP***: Análisis de riesgo con objeto de evaluar el paso de mercancías peligrosas a través del túnel. El estudio vendrá motivado por las posibles circunstancias:*
>
> - *Paso de los vehículos de mercancías peligrosas a través del túnel o por una ruta alternativa exterior al mismo.*

- *Circulación de mercancías peligrosas en túneles que no presenten drenaje separativo y cuya longitud supere los 500 metros.*
- *Posible introducción de limitaciones horarias o formación de convoyes para regular el paso de transportes de mercancías peligrosas por túneles que por presentar una elevada IMD en determinadas franjas horarias del día provoquen un incremento de riesgo elevado en su explotación.*

2.3.3. Objetivos

Por último, con objeto de profundizar en el contenido de esta metodología MARTE se quiere resaltar lo que ésta indica en el apartado objetivos:

> **Método General**: *Los objetivos principales a determinar por este método son:*
>
> *1. Determinación del riesgo base del túnel.*
>
> *2. Determinación del riesgo comparado entre distintos niveles de equipamiento o prestaciones del túnel en los siguientes aspectos:*
>
> - *Diseño de la infraestructura y de sus parámetros característicos*
> - *Análisis de alternativas entre distintas instalaciones a disponer*
>
> *Al final del proceso, tras la comparación con los niveles de aceptación marcados en la metodología, se permite determinar si el equipamiento alternativo o complementario propuesto para un túnel confiere al mismo un nivel de seguridad adecuado para su explotación.*
>
> **Método de Mercancías Peligrosas**: *El principal objetivo de la aplicación de este método para el análisis de riesgo del paso de mercancías peligrosas a través de un túnel se basa en la evaluación del riesgo social que provoca el paso de dichos transportes por el túnel y la comparación con los niveles de riesgo aceptados como asumibles.*
>
> *El método permite asimismo establecer la comparación entre distintos equipamientos del túnel objeto de análisis, así como de distintos diseños del mismo.*
>
> *Otra particularidad del método es la de poder evaluar el riesgo comparado entre el paso por el interior del túnel de los vehículos de mercancías peligrosas y el correspondiente al paso por el itinerario alternativo que se considere.*

Se quiere resaltar en este punto el contenido de este apartado de la MARTE, donde específicamente se indica que uno de los principales objetivos de la metodología es disponer de una herramienta que permite determinar el riesgo base y compararlo con distintos diseños de infraestructura o instalaciones, siendo esta descripción totalmente de aplicación al objeto de esta presentación.

3. CASOS DE ÉXITO APLICANDO LA METODOLOGÍA EN FASE DE DISEÑO

Desde la entrada en vigor de la MARTE, las experiencias y casos de empleo de los análisis de riesgo tanto Método General como Método de Mercancías Peligrosas de manera exitosa en proyectos en los que SENER participa son muchos, habiendo pasado ya casi una década desde que se emplearon por primera vez.

Con el transcurso de los años y una vez comprobadas las posibilidades y oportunidades que ofrecían los análisis de riesgos, en cualquier proyecto carretero de SENER que incluya túneles se realiza una evaluación de la necesidad y/o beneficios que pudieran aportar el desarrollo de un análisis de riesgo mediante MARTE al túnel o túneles objeto. En el caso en el que se determina necesario y/o recomendable desarrollar análisis de riesgos en el proceso de estudio y optimización del diseño del túnel, el primer paso es establecer el denominado Es-

cenario Base, el cual representará el punto de partida con su riesgo asociado. A partir de aquí, en función de los resultados obtenidos y los objetivos preestablecidos comienza el desarrollo de uno de los siguientes estudios:

1. Estudio e influencia de Medidas de Mejora: Cuando los resultados obtenidos no garantizan la seguridad en el túnel y para garantizar la misma es necesario redefinir el diseño. Se analizan distintas opciones o posibles optimizaciones específicas para el túnel.
2. Estudio de Sensibilidad: Cuando los resultados son suficientemente buenos como para no requerir medidas adicionales, pero se quiere estudiar la robustez o seguridad de la solución adoptada.

En este sentido, es necesario añadir que en muchas situaciones es necesario complementar los análisis de riesgos con otros estudios complementarios, que permitan complementar o reforzar las conclusiones y resultados obtenidos en los análisis. En este apartado, se comparten distintos casos específicos en los que de manera muy exitosa la aplicación de la MARTE y el desarrollo de los análisis de riesgo facilitaron la obtención de conclusiones y consecuentemente la toma de decisiones.

Con relación a la redacción de análisis de riesgos en geografías distintas a la española, hay que destacar la gran cantidad de trabajos que sea han realizado y la gran ayuda que han supuesto los AARR mediante metodología MARTE. En estos casos, previo a establecer el Escenario Base es necesario acotar y establecer la normativa o criterios de aplicación a aplicar en los análisis de riesgos porque en muchos casos no existe normativa de seguridad de túneles o requisitos de diseños claramente establecidos. Este trabajo inicial consiste en adaptar los criterios de aplicación de la MARTE e intrínsicamente el RD 635/2006 a las condicionantes locales, lo cual en algunos casos requiere "retorcer" la metodología para poder aplicarla. Casos específicos son por ejemplo establecer para el Método General las características del túnel virtual o en el caso del Método de Mercancías Peligrosas las tasas de accidentalidad y los umbrales de calificación del riesgo. Como criterio general, los casos en lo que no existe normativa de seguridad detallada o los requisitos de diseños o los pliegos de aplicación son más ambiguos, el punto de partida como normativa de referencia suele ser la DE 2004/54.

Con estos condicionantes de partida, cualquier trabajo de análisis de riesgo a realizar a nivel internacional requiere un estudio especifico de la normativa y criterios de aplicación al túnel o túneles objeto del trabajo para consecuentemente aplicar en la metodología MARTE.

A continuación, se comparten una serie ejemplos de trabajos desarrollados en los que la solución final se han apoyado o incluso basado en análisis de riesgo cuantitativos mediante metodología MARTE. Por motivos de confidencialidad, no se sitúa geográficamente los túneles ni tampoco se indican nombres, generalizando las características de los mismos para no permitir su identificación.

3.1. Túneles en fase de diseño

Los trabajos realizados son numerosos y aunque de forma generalizada se pueden calificar como trabajos comunes, se presentan a continuación cuatro casos concretos en los que la realización de los análisis de riesgo en fase temprana permitió obtener conclusiones muy importantes e influyentes para futuras fases y facilitó la toma de decisiones por parte se la administración.

3.1.1. Ejemplo 1: AARR DG QRAM en Estudio informativo

El primero de los casos corresponde a un Análisis de Riesgo mediante Método de Mercancías Peligrosas en el entorno de una gran ciudad, concretamente en un Proyecto de Estudio de Alternativas. El objeto principal del Estudio era valorar diferentes alternativas al corredor actual para finalmente proponer la más idónea y una de las alternativas analizadas, consistía en un túnel de aproximadamente 3 km de longitud. A pesar de tratarse de una fase muy temprana, se desarrolló un análisis de riesgo con el objeto principal de evaluar el riesgo del paso libre o si era necesario restringir el paso de mercancías peligrosas a través del túnel. Para ello, se realizó

un análisis de riesgo por el Método de Mercancías Peligrosas tanto en la alternativa túnel como en la ruta actual a cielo abierto y mediante los resultados obtenidos se obtuvieron las siguientes conclusiones principales:

1. Comparativamente entre itinerarios, el riesgo era muy similar.
2. Los vehículos pesados suponían la mayor proporción de riesgo global en el túnel, por lo tanto, restringir el paso de mercancías peligrosas por el túnel no representaba una mejora significativa del riesgo global.

Estos resultados y conclusiones obtenidos permitieron poner en perspectiva, y parcialmente relativizar, el riesgo actual que representan los vehículos de transportes de mercancías peligrosas y el que pudieran representar en el túnel en un futuro. Este análisis de riesgo confirmó que la alternativa túnel no representaba un riesgo adicional y que tampoco requería medidas adicionales, facilitando consecuentemente la comparación con otras alternativas y permitir seleccionar la óptima.

3.1.2. Ejemplo 2: AARR Método General y DG QRAM de túnel urbano

Otro caso muy representativo de las ventajas de la realización de análisis de riesgo en fases tempranas del proyecto es el caso de un Proyecto de Construcción de un túnel urbano de aproximadamente 4 km de longitud con congestiones frecuentes en ambos sentidos. Ante la incertidumbre que generaban la definición de los sistemas de seguridad adicionales a los mínimos requeridos, la definición geométrica necesaria de la solución a adoptar (sección estricta u optimizada), la interdistancia de galerías o los distintos encajes geométricos en un entorno urbano tan constreñido, en la fase inicial del proyecto se redactaron los análisis de riesgo mediante el Método General y el Método de Mercancías Peligrosas.

Analizando de manera conjunta los resultados, se obtuvieron conclusiones de enorme ayuda respecto al Escenario Base:

1. El diseño inicialmente previsto garantizaba la seguridad en el túnel
2. El riesgo asociado al paso de vehículos transporte de mercancías peligrosas respecto al itinerario anterior era muy similar.

Estos resultados obtenidos confirmaron que los sistemas e infraestructura previstos garantizaban la seguridad del túnel y por otro confirmaba que el paso libre de vehículos de transporte de mercancías peligrosas por el túnel representaba un riesgo aceptable.

3.1.3. Ejemplo 3: AARR Método General y DG QRAM de grupo de túneles

El tercer caso que se presenta corresponde a un proyecto con un conjunto de túneles que formaban parte de un corredor de nueva construcción y donde se redactaron los análisis de riesgo de casi veinte túneles, desde túneles de longitud inferior a 200 metros a túneles de más de 5 km.

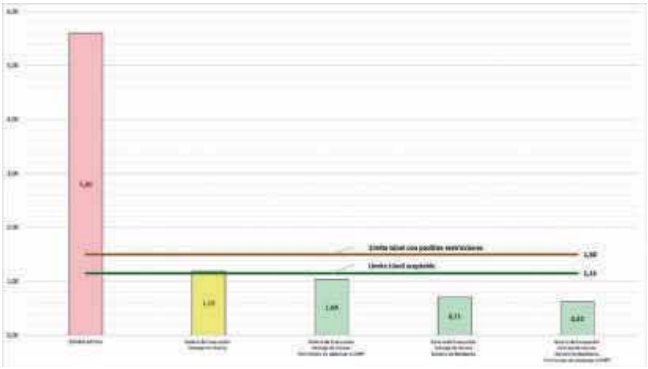
En el caso de los túneles en los cuales los resultados del Escenario Base no eran satisfactorios, se desarrollaron estudios de influencia de distintas Medidas de Mejora que incluían aspectos de la infraestructura (drenaje de tóxicos, cambio de sección tipo, etc.), los sistemas de seguridad (CCTV y DAI, sistema de cierre de túnel, etc.) o incluso condiciones de explotación. Asimismo, en el empleo de Método General se calculó el índice de riesgo aplicando al túnel virtual el RD 635/2006 así como la DE 2004/54E.

Se desarrollaron análisis de riesgos mediante Método General y el Método de Mercancías Peligrosas a todos los túneles del corredor, analizando todos los resultados de manera conjunta. En parte de los túneles, fue necesaria la aplicación de medidas de mejora y se desarrolló de forma particularizada para cada túnel, pero siempre con una visión en conjunto del corredor. Adicionalmente, en casos particulares se completaron los trabajos con otros estudios detallados como un estudio de evacuación especifico.

Se muestra en las siguientes imágenes el estudio de influencia de las Medidas de Mejora respecto al RD 635/2006 realizado en uno de los túneles, en el cual no se preveía inicialmente la construcción de galería de evacuación. Se observa la influencia en la seguridad, reflejada en un índice de riesgo, de cada una de las medidas de mejora aplicadas de forma individual o combinada:

TUNEL	INDICE DE RIESGO. Sin mejoras	Medidas aplicadas aplicadas				INDICE DE RIESGO. Con medidas aplicadas	
		Galeria de Evacuación (Obligatoria)	Drenaje de tóxicos (Obligatoria)	Servicio de Bomberos	Prohibición de adelantar a VVPP		
LOS ROBLES. 884 m	3,80	☑	☑	☑	☑	0,62	Cumpliendo Normativa
		☑	☑	☒	☒	1,19	
		☑	☑	☑	☒	0,71	
		☑	☑	☒	☑	1,04	
		☑	☒	☑	☑	0,65	Incumpliendo Normativa
		☑	☒	☒	☑	1,09	
		☑	☒	☑	☒	0,75	
		☑	☒	☒	☒	1,15	
		☒	☑	☑	☑	2,78	
		☒	☑	☒	☑	4,64	
		☒	☑	☒	☒	5,33	
		☒	☑	☑	☒	3,70	
		☒	☒	☒	☑	4,87	
		☒	☒	☑	☑	2,92	
		☒	☒	☑	☒	3,36	

☑ Medida aplicada
☒ Medida no aplicada



En el caso de este túnel, los resultados obtenidos y el estudio de Medidas de Mejora concluyeron que era necesario disponer de una galería de emergencia.

Este proyecto tenía como requisito contractual la obligatoriedad de dotar al corredor de una serie de dotaciones de Servicios de Bomberos, pero no se especificaba la ubicación de los mismos. Como parte de los análisis de riesgo, se realizó un Estudio de Sensibilidad para evaluar la influencia en la seguridad de las distintas ubicaciones y los tiempos de llegada al túnel, aplicando los correspondientes coeficientes. Este Estudio de Sensibilidad permitió proponer una ubicación óptima de las dotaciones de bomberos, desde un punto de vista de análisis de riesgo.

3.1.4. Ejemplo 4: AARR Método General de un túnel bidireccional

Por último, se comparte un proyecto en el que los resultados obtenidos en la redacción de un AARR por el Método General permitieron garantizar la seguridad de un túnel con una sencilla optimización de diseño y sin requerir medidas adicionales. El túnel en cuestión era un túnel bidireccional de nueva construcción y algo inferior a 1,5 km en el que, salvo discrepancias menores, el diseño y características del túnel previstos cumplían con los requerimientos del contrato. No obstante, comparando este Escenario Base con la DE 2004/54 se obtenía un índice de riesgo ligeramente superior al límite, concretamente 1,1552.

Al tratarse de un túnel nuevo se marcó como objetivo obtener un índice próximo a la unidad y para ello el estudio de Medidas de Mejora analizó distintas medidas de optimización del diseño. En este estudio se comprobó que era posible obtener un índice próximo a la unidad simplemente optimizando el diseño previsto y sin necesidad de aplicación de medidas adicionales, mediante la revisión de la ubicación de las secciones de semáforos interiores proyectadas. Se recalcularon los recorridos /distancias teóricas de los vehículos indirectamente afectados en el modelo de comportamiento de los usuarios respecto al Escenario Base para evitar que estos usuarios se dirijan al lugar del incendio. Este análisis de riesgo permitió definir las ubicaciones de los semáforos donde si eran efectivas y permitieron disponer una calificación de túnel seguro.

3.2. Túneles existentes

En el caso de túneles existentes, por tratarse de casos habituales se descarta compartir ejemplos de proyectos de adecuación de túneles existentes o análisis de riesgo de labores propias del Responsable de Seguridad de Túneles.

3.2.1. Ejemplo 5: AARR Método General de un túnel urbano y congestiones frecuentes

Este primer caso de túnel existente con incumplimientos normativos corresponde a un túnel urbano, con congestiones frecuentes y de aproximadamente 1 km de longitud, donde el Escenario Base calificaba el túnel con posibles restricciones.

El caso de este túnel tenía una particularidad de gran influencia, concretamente en la aplicación del Factor de proximidad de los servicios de emergencia, donde la MARTE establece franjas de tiempo de llegada (menos de dos minutos, entre dos y cinco minutos, etc.). En este caso, se disponía de un pacto con el cuerpo de bomberos local por el que se comprometían a llegar al túnel en una serie de tiempos máximos en un porcentaje determinado de actuaciones, concretamente:

a) 75% casos en un tiempo máximo de 10 minutos,

b) 90% en un tiempo máximo de 15 minutos y

c) 100% de los casos en menos de 30 minutos.

Situado en un entorno urbano y con congestiones frecuentes, el tiempo de llegada teórico al túnel varía mucho en función de la franja horaria diaria, por lo que se consideró necesario realizar un Estudio de Sensibilidad aplicando este factor por minutos y no por franjas horarias como establece la MARTE. Los resultados obtenidos basados en los compromisos temporales indicados fueron los siguientes:

- En el 84% de los incidentes acumulados, el túnel se calificaba como seguro.
- En el 16% de los incidentes acumulados, el túnel se calificaba como túnel con posibles restricciones.

Indicar que, para el cálculo del índice de riesgo del Escenario Base, se consideró como tiempo máximo de 15 minutos, el 90% de los casos.

Una vez realizado este estudio y con el objeto de garantizar la seguridad a todas las circunstancias del contorno, se realizó un estudio de la eficacia de distintas Medidas de Mejora, considerando los casos más desfavorables de tiempo de llegada de bomberos y la aplicación de distintas medidas de mejora, tanto de forma individual como combinada.

En la siguiente tabla se muestra el resumen de las medidas finalmente propuestas aplicar y su influencia en la seguridad. En la última línea de la tabla se incluyen las medidas necesarias a disponer considerando el tiempo de llegada bomberos de 30 minutos:

Tabla 1. Calificación de la seguridad del túnel en aplicación de medidas de mejora

MEJORA APLICADA		I.R ACTUALIZADO	CALIFICACIÓN
Sistemas Normativos requeridos	**Drenaje de tóxicos** Reducción 5% E2, E4 y E5	1,1912	Túnel con restricciones
	Drenaje de tóxicos + Red de hidrantes F_{otros} = 0,96 Reducción 5% E2, E4 y E5	1,1669	Túnel con restricciones
Sistemas Normativos requeridos	**Red de hidrantes (requerido norma) + semáforos interiores** F_{otros} = 0,94	1,1460	Túnel seguro
	Sistema de radar en los accesos del túnel $F_{(ex\ radar)}$ = 0,92	1,0992	Túnel seguro
Sistemas Normativos requeridos	**Tiempo inferior a 30 minutos (100% casos):** Feq_{SSEE} = 1,25 e I.R.= 1,2987 **Red de hidrantes (requerido norma) + semáforos interiores** F_{otros} = 0,94 **Sistema de radar en los accesos del túnel** $F_{(ex\ radar)}$ = 0,92	1,146	Túnel seguro

Los siguientes dos casos corresponden a túneles existentes que debían ser adaptados a nuevas situaciones y no se disponía de una normativa propia o requisitos de aplicación directa.

3.2.2. Ejemplo 6: AARR Método General, túnel adaptado sin normativa de aplicación

Se trata de un túnel de aproximadamente 5 km con circulación bidireccional y ventilación semitransversal y paralelo al mismo se proyectaba la construcción de un nuevo tubo, pasando la circulación del túnel existente objeto del análisis bidireccional a unidireccional.

El diseño e instalaciones inicialmente previstos en el túnel, Escenario Base, calificaban el túnel de peligrosidad elevada, siendo una de las principales razones el sistema de ventilación. En ese contexto, el estudio de Medidas de Mejora confirmaba que la disposición de un sistema de ventilación de capacidad 30 MW adaptado a una circulación longitudinal permitía calificar el túnel como aceptable.

Complementario a este escenario, se analizó la influencia de la aplicación de distintas medidas de mejora que permitían la obtención de una calificación similar, proponiendo para ello como alternativa la aplicación de las siguientes medidas de mejora:

1. Prohibición de adelantamiento de vehículos pesados en el interior del túnel.
2. Instalación un control de velocidad / radar en el túnel.
3. Instalación de tres secciones de semáforos en el interior.

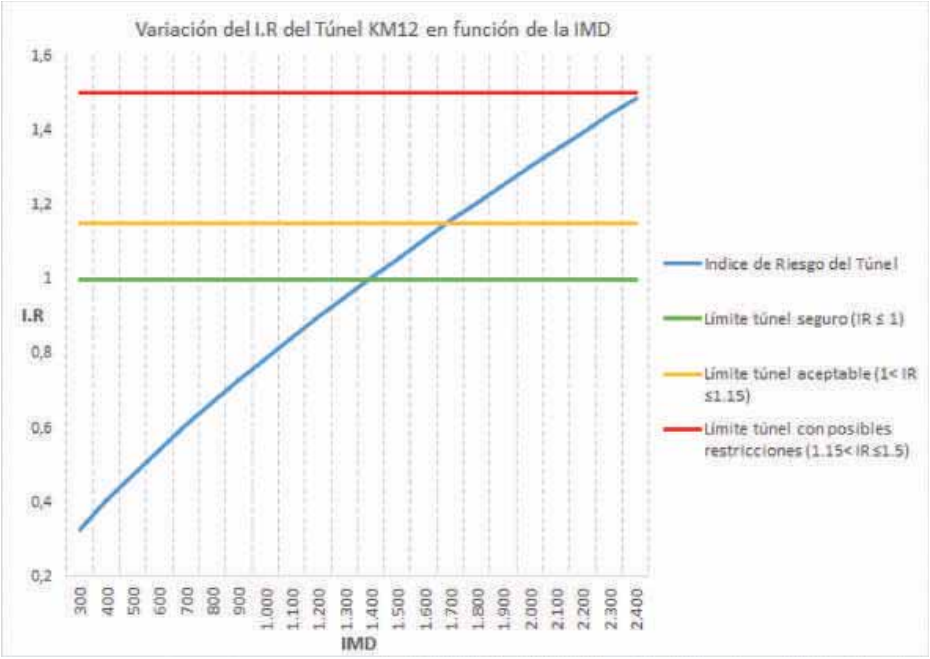
El trabajo de análisis de riesgo mediante MARTE permitió a los responsables y Autoridad disponer de dos alternativas (modificación del sistema de ventilación o aplicación de paquete medidas de mejora) que garantizaban la seguridad.

3.2.3. Ejemplo 6: AARR Método General, apertura de túneles al tráfico libre sin normativa de aplicación

El último caso corresponde a un caso muy particular que correspondía a un tramo corto de carretera con dos túneles existentes que iban a pasar a formar parte de la red de carreteras pública y representar la vía de acceso principal a varias poblaciones locales. Estos túneles presentaban singularidades que perjudicaban la seguridad del túnel, tales como pendientes elevadas y convergencias / divergencias en el interior o por otro lado tenían datos muy particulares de tráfico como una IMD prevista de 300 vehículos día con un 40% de vehículos pesados más un 20% de buses.

La apertura de estos túneles al tráfico libre permitió disponer a las poblaciones del entorno de una vía de acceso nueva y sustancialmente mejor que otras del entorno, por lo que se preveía que este nuevo acceso supondría una captación muy importante de población. No obstante, no se disponía de ningún estudio al respecto.

En ese contexto, una vez realizados los correspondientes análisis de riesgos del Escenario Base con resultados muy buenos en cuanto a la calificación del túnel, se desarrolló un Estudio de Sensibilidad considerando la influencia del aumento de la intensidad de tráfico. Del estudio se concluyó que era necesario multiplicar por seis la intensidad actual para pasar a una calificación de túnel con posibles restricciones, lo que permitió al gestor de esta carretera tener un rango o dato hasta el cual el riesgo es aceptable.



En este caso también se completaron los trabajos de análisis de riesgo con estudios de evacuación y ventilación, especialmente importante y necesario por la influencia de las aberturas de convergencias / divergencias en uno de los tubos.

4. LECCIONES APRENDIDAS Y CONCLUSIONES

Con la entrada en vigor de la Metodología de análisis de riesgo – MARTE el año 2012, disponemos de una herramienta que aporta imparcialidad, homogeneidad y coherencia a los análisis y calificación del riesgo a todos los túneles del conjunto de la Red de Carreteras del Estado. Transcurrida ya casi una década, la experiencia adquirida en el empleo de la metodología permiten calificarla como totalmente consolidada y un referente a nivel nacional e internacional.

La familiarización y un el conocimiento de lo análisis mediante MARTE tanto por el Método General como por el Método de Mercancías Peligrosas, nos ha permitido a los consultores y en este caso a SENER ir un paso más allá del empleo habitual en aplicación de la normativa y emplearlos como herramientas de apoyo al diseño. En este sentido es interesante recordar que la propia MARTE ya indicaba que uno de los principales objetivos que tenía era facilitar una herramienta que permita comparar entre distintos niveles de equipamiento o prestaciones del túnel en el Diseño de la infraestructura y de sus parámetros característicos y el Análisis de alternativas entre distintas instalaciones a disponer.

La comparativa de resultados de análisis de riesgo en función de la infraestructura o equipamiento considerado permite cuantificar su influencia y relación del coste / beneficio (tanto económico como de seguridad) de forma particularizada, lo cual representa una herramienta de enorme ayuda tanto para el consultor como para la Autoridad Administrativa.

Esta presentación presenta una serie de casos en los que se los análisis de riesgo se han empleado como herramienta de diseño con resultados muy satisfactorios desde el punto de vista del cliente final, así como consistencia en el diseño. Aunque tratados los trabajos realizados de forma genérica y sin entrar en detalle por mantener la confidencialidad, son ejemplos muy claros de los beneficios que pueden aportar los análisis de riesgos complementados con Estudios de Sensibilidad y/o Medidas de Mejora.

El empleo de los AARR como herramienta de ayuda y apoyo en fases tempranas del diseño del diseño de túneles, tanto de túneles nuevos como túneles existentes a adecuar, ha ayudado y formado parte de numerosos casos de éxito en proyectos de SENER, siendo hoy en día la evaluación de la necesidad de redactar análisis de riesgo parte del procedimiento de trabajo en proyectos con túneles carreteros. En este contexto y tal y como se ha indicado anteriormente, de manera generalizada las administraciones del ámbito nacional no acostumbrar a requerir en sus contratos o pliegos de condiciones la redacción de este tipo de trabajos, salvo en los ya mencionados casos. Por el contrario, se quiere destacar que, en el ámbito internacional, se pueden calificar como frecuentes el encargo de este tipo de trabajos de análisis de riesgo basados en la metodología nacional MARTE.

En este sentido, se quiere resaltar que, aunque los requisitos normativos son siempre la base del diseño del túnel en todo proyecto surgen dudas o incertidumbres en los criterios de diseño que pueden ser resueltos o confirmados mediante la redacción del análisis de riesgo que corresponda. Por último, se quiere completar esta observación indicando que cuanto más temprana sea la fase del proyecto, en mayor medida permitirá consolidar o mejorar el diseño previsto.

TÚNELES DE LA AUTOPISTA BOGOTÁ A VILLAVICENCIO. MODELO DE INTEGRACIÓN A NIVEL MUNDIAL

Jairo Charry Gómez
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Gerente Técnico, Coviandina, S.A.S.

Enrique Segura Echániz
Subgerente de Operación de Túneles e Integración Vial. Coviandina, S.A.S

Se presenta el proyecto de desdoblamiento de la autopista de Bogotá a Villavicencio, en las ubicaciones denominadas El Tablón y Villavicencio, en un trayecto de aproximadamente 86 km con 52 túneles que suman 70 km bajo túnel, con más de 175 puentes y viaductos que suman 46 km, los cuales están construidos desde una altura de 3.000 m.s.n.m. hasta 600 m.s.n.m.

El nuevo proyecto representa un paso más en el ambicioso plan de inversiones de la carretera con la proyección de las Dobles Calzadas teniendo en cuenta los Niveles de Servicio llevado a cabo por Coviandes desde el año 2008 acompañado de la operación de la carretera y seguridad en los túneles con la utilización de ITS dada la gran cantidad de túneles. Una vez terminada la Concesión de Coviandes, la tomó Coviandina en noviembre de 2019.

Unido al reto de la construcción sucesiva de túnel-viaducto-túnel con las técnicas de construcción más modernas, está la dificultad de implantación de tecnología ITS a las zonas entre túneles, especialmente para generar sectores de vía que se puedan operar y gestionar automáticamente desde los centros de control en modo bidireccional cuando las calzadas queden inhabilitadas y se requiera la utilización de By Pass. Actualmente están desdoblados los tercios medio y final de la autopista construidos y operando el 100% de los nuevos túneles, con la complejidad adicional de construir en paralelo a la operación y con un tráfico de camiones por encima del 30% de la IMD.

El desafío tecnológico pasa por dotar de los más modernos sistemas de gestión de tráfico a la ITS a la infraestructura, integrando además las instalaciones existentes, de modo que se aumente la seguridad y se simplifique la operación de la vía, ofreciendo un mejor servicio al usuario. Para ello la integración se ha realizado a través de una plataforma tecnológica de gestión multitúnel, siguiendo los estándares de seguridad de la Agencia Nacional de Infraestructura ANI así como estándares europeos. En cumplimiento de ellos, se han establecido varios niveles de redundancia, habilitando tres centros de control operacionales, y adicionalmente en caso de fallo se ha previsto un tercer nivel de redundancia a través de la aplicación Skynet que actúa directamente sobre los PLCs que gestionan los actuadores de los túneles.

TUNNELS OF THE BOGOTÁ TO VILLAVICENCIO HIGHWAY. GLOBAL INTEGRATION MODEL

We will present the highway widening project from Bogotá to Villavicencio, between the locations called El Tablón and Villavicencio, in a route of approximately 86 km with 52 tunnels with a total length of 70 km, with more than 175 bridges and viaducts totalling 46 km, which are built from a height of 3,000 m.a.s.l. up to 600 m.a.s.l.

The new project represents one more step in the ambitious investment plan carried out by Coviandes since 2008 and later by Coviandina for the operation of the highway and safety in the tunnels. Coupled with the challenge of successive tunnel-viaduct-tunnel construction using the most modern construction techniques, there is the difficulty of implementing ITS technology in the areas between tunnels, especially to generate track sectors that can be operated and managed automatically from the control centres in bidirectional mode when the roads are disabled and the use of By Pass is required, an example of resilience. Currently, the middle and final thirds of the highway have been duplicated, with 100% of the new tunnels built and operating, with the additional complexity of building in parallel to the operation and with a traffic of 2,000 dangerous goods vehicles per day.

The technological challenge is to provide the most modern ITS traffic management systems to the infrastructure, while integrating the existing facilities, so as to increase safety and simplify the operation of the road, offering a better service to the user. For this, the integration has been carried out through a multi-tunnel management technology platform, following the security standards of the National Infrastructure Agency ANI as well as European standards. In compliance with them, several levels of redundancy have been established, enabling three operational control centres, and additionally, in case of failure, a third level of redundancy has been provided through the Skynet application that acts directly on the PLCs that manage the actuators of the tunnels.

TUNNELS DE L'AUTOROUTE BOGOTÁ-VILLAVICENCIO. UN MODÈLE D'INTÉGRATION AU NIVEAU MONDIAL

Le projet d'élargissement de l'autoroute de Bogotá à Villavicencio est présenté, dans les localités appelées El Tablón et Villavicencio, sur un parcours d'environ 86 km avec 52 tunnels totalisant 70 km de voies sous tunnel, avec plus de 175 ponts et viaducs totalisant 46 km, qui sont élevés sur un dénivelé de 600 jusqu'à 3000 m d'altitude

Le nouveau projet représente une étape avantageuse dans un plan très ambitieux d'investissement mené par Coviandes depuis 2008 et ensuite par Coviandina pour l'exploitation de l'autoroute et la sécurité dans les tunnels. Couplée au défi des constructions successives de tunnel-viaduc-tunnel utilisant les techniques de construction les plus modernes, a qui s'ajoute la difficulté de mettre en œuvre la technologie SAE dans les zones inter-tunnels, notamment pour générer des secteurs de voie exploitables et gérés automatiquement à partir des centres de contrôle dans un mode bidirectionnel lorsque les routes sont hors-usage et que l'utilisation du By Pass soit nécessaire, en un exemple de résilience. Actuellement, sont construites les deux tiers, médiane et final de l'autoroute avec 100 % des nouveaux tunnels réalisés sont en service, à l'égard de la complexité supplémentaire de construire en parallèle à l'exploitation et en même temps qu'un trafic de 2000 transporteurs de marchandises dangereux par jour.

Le défi technologique consiste à doter l'infrastructure des systèmes de gestion du trafic SAE les plus modernes, en intégrant également les installations existantes, afin d'accroître la sécurité et de simplifier l'exploitation de la route, en offrant un meilleur service à l'utilisateur. Pour cela, l'intégration a été réalisée via une plate-forme technologique de gestion multi-tunnel, suivant les normes de sécurité de l'Agence Nationale des Infrastructures ANI ainsi que les normes européennes. Conformément à celles-ci, plusieurs niveaux de redondance ont été établis, permettant à trois centres de contrôle opérationnels, de plus, en cas de panne, un troisième niveau de redondance a été fourni via l'application Skynet qui agit directement sur les automates qui gèrent les actionneurs des tunnels.

INTRODUCCIÓN

Se presenta el proyecto de desdoblamiento de la autopista de Bogotá a Villavicencio, en las ubicaciones denominadas el Tablón y Villavicencio, en un trayecto de aproximadamente 86 km con 52 túneles que suman 70 km bajo túnel, con más de 175 puentes y viaductos que suman 46 km, los cuales están construidos desde una altura de 3.000 m.s.n.m. hasta 600 m.s.n.m.

El nuevo proyecto representa un paso más en el ambicioso plan de mejoramiento de la carretera con la proyección de las Dobles Calzadas teniendo en cuenta los Niveles de Servicio llevado a cabo por Coviandes desde el año 2008 acompañado de la operación de la carretera y seguridad en los túneles con la utilización de ITS dada la gran cantidad de túneles. Una vez terminada la Concesión de Coviandes la tomó Coviandina.

El nuevo proyecto representa un paso más en el ambicioso plan de mejoramiento de la carretera con la proyección de las Dobles Calzadas teniendo en cuenta los Niveles de Servicio llevado a cabo por Coviandes (anterior Concesionario) desde el año 2008 acompañado de la operación de la carretera y seguridad en los túneles con la utilización de ITS dada la gran cantidad de túneles.

Una vez terminada la Concesión de Coviandes, la tomó Coviandina en noviembre de 2019.

Unido al reto de la construcción sucesiva de túnel-viaducto-túnel con las técnicas de construcción más modernas, está la dificultad de implantación de tecnología ITS a las zonas entre túneles, especialmente para generar sectores de vía que se puedan operar y gestionar automáticamente desde los centros de control en modo bidireccional cuando las calzadas queden inhabilitadas y se requiera la utilización de By Pass. Actualmente están desdoblados los tercios central y final de la autopista construidos y operando el 100% de los nuevos túneles, con la complejidad adicional de construir en paralelo a la operación y con un tráfico de camiones por día por encima del 30% de la IMD.

El desafío tecnológico pasa por dotar de los más modernos sistemas de gestión de tráfico ITS a la infraestructura, integrando además las instalaciones existentes, de modo que se aumente la seguridad y se simplifique la operación de la vía, ofreciendo un mejor servicio al usuario. Para ello la integración se ha realizado a través de una plataforma tecnológica de gestión multitúnel, siguiendo los estándares de seguridad de la Agencia Nacional de Infraestructura ANI así como estándares europeos. En cumplimiento de ellos, se han establecido varios niveles de redundancia, habilitando tres centros de control operacionales, y adicionalmente en caso de fallo se ha previsto un tercer nivel de redundancia a través de la aplicación Skynet que actúa directamente sobre los PLCs que gestionan los actuadores de los túneles.

QUIÉN ES COVIANDINA

COVIANDINA SAS es la sociedad encargada de la ejecución del Contrato de Concesión No. 005 del 9 de junio de 2015, suscrito con la Agencia Nacional de Infraestructura – ANI, el cual contempla: "LA CONSTRUCCIÓN DE UNA NUEVA CALZADA EN EL SECTOR CHIRAJARA (PR 62+500) a la intersección FUNDADORES (PR 86+500), Y LA ADMINISTRACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA CARRETERA BOGOTÁ VILLAVICENCIO".

DESCRIPCIÓN Y CONTEXTO DEL PROYECTO

El proyecto de la vía que une Bogotá y Villavicencio fue potenciado por el Instituto Nacional de Vía (INVÍAS) con el fin de agilizar la comunicación entre estas dos ciudades.

La carretera, de 86 km, cuenta contará con 52 túneles 1ue suman 70 km, construidos desde una altura de 3000 msnm hasta 600 msnm.

Figura 1. Estado del Proyecto de desdoblamiento

La autopista está dividida en tres tramos:

El primer tramo contiene el túnel de Boquerón, bidireccional, de 2.400m de longitud y situado a 3.000 msnm. Este tramo tiene una longitud de 34 km y su desdoblamiento está en fase de prefactibilidad avanzada. Este primer tramo tendrá un total de 6 túneles nuevos que suman 15,4 km.

El tramo central contiene 18 túneles actualmente, en su tramo desdoblado, que suman 15.9 Km, los cuales se fueron abriendo al tráfico entre junio de 2015 y diciembre de 2017.

El último tramo de la autopista, de 25 km de longitud, cuya construcción se finalizó en mayo de 2022, contiene 9 túneles que suman 15,1 Km, de los cuales 2 ya son existentes con una longitud de 4.7 Km

TERCIO	CALZADA	AÑO ESTIMADO	CANTIDAD DE TÚNELES ESTIMADOS				TOTAL	
			Largo (L>1.000m)		Corto (L<1.000m)			
			Cantidad	Longitud (km)*	Cantidad	Longitud (km)*	Cantidad	Longitud (km)*
Inicial	Vía existente	2022 - 2027	1	2,4	0	0	1	2,4
	Nueva Calzada		4	13,99	2	1,41	6	15,40
Medio	Vía existente	Existente	0	0	2	0,7	2	0,7
	Nueva Calzada 2	2027 - 2032	2	7,2	8	7,3	10	14,5
	Nueva Calzada	Existente	4	9,5	14	6,4	18	15,9
Final	Vía existente	Existente	1	4,5	1	0,2	2	4,7
	Nueva Calzada 2	2032 - 2037	3	5,13	3	0,85	6	5,98
	Nueva Calzada	Existente	4	9,63	3	0,77	7	10,4
Total por calzada	Vía existente		2	6,9	3	0,9	5	7,8
	Nueva Calzada		17	45,454	30	16,725	47	62,18
GRAN TOTAL			19	52,35	33	17,63	52	69,98

* Incluye longitud de galerías de comunicación y galerías de evacuación.
No incluye galería inferior de emergencia de túnel Renacer

Figura 2. Túneles y longitud teniendo en cuenta los niveles de servicio de la carretera

DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA

Diseño de obras de infraestructura vial innovadoras y de gran impacto, con altos estándares de calidad, combinando un óptimo manejo ambiental y una excelente labor social. Por lo anterior, Coviandes, EDL Ltda y CEI SA, fueron galardonadas en el 2010 con el Premio Nacional de Ingeniería de Colombia "por los estudios y diseños de la doble calzada en el sector Cáqueza – Chirajara de la carretera Bogotá - Villavicencio", por la Sociedad Colombiana de Ingenieros (SCI).

Es importante destacar que este proyecto sirvió de modelo a las Autopistas de la Montaña, precursor de las actuales 4G.

TIPOLOGÍA DE TÚNELES

Para el diseño del equipamiento que deben tener los túneles, se ha adaptado la Directiva europea sobre requisitos mínimos de seguridad en Túneles de carretera CE 54/2004, así como la normativa sobre Planes de Autoprotección Decreto 82/2010.

TÚNEL	LONGITUD APROXIMADA	CGI	CGL	Control de ventilación	Iluminación	Detectores ambientales	Gestión de Red	Video Grabación	Señalización variable	CCTV/DAI
Calzada existente										
Boquerón	2.405 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
Quebrada Blanca	506 m	v	v		v	v	v	v	v	
Bijagual	185 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
Buenavista	4.520 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
Doble calzada										
1	310 m	v	v		v	v	v	v	v	v
2	390 m	v	v		v	v	v	v	v	v
3	517 m	v	v		v	v	v	v	v	v
3A	986 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
4	286 m	v	v		v	v	v	v	v	v
5	265 m	v	v		v	v	v	v	v	v
6	1.280 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
6A	4.380 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
7	265 m	v	v		v		v	v	v	v
8	750 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
9	750 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
10	772 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
11	417 m	v	v		v	v	v	v	v	v
12	80 m	v	v		v	v	v	v	v	v
13	697 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
14	374 m	v	v		v		v	v	v	v
15	405 m	v	v		v	v	v	v	v	v
16	1.838 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
TÚNEL 1C	1.953 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
TÚNEL 2C	550 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
TÚNEL 3C	1.449 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
TÚNEL 5C	1.670 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
TÚNEL 6C	220 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v
TÚNEL 7C	4.558 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v

Figura 3. Equipamiento túneles.

TÚNEL	LONGITUD APROXIMADA	Megafonia	Detección incendios	Detección puntual de incendios	Extinción de incendios	Datos de tráfico	Balizas	SOS	Grupos electrógenos	Control de gálibo	Comunicación redundante
Calzada existente											
Boquerón	2.405 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
Quebrada Blanca	506 m	v	v	v	v			v	v		v
Bijagual	185 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
Buenavista	4.520 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
Doble calzada											
1	310 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
2	390 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
3	517 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
3A	986 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
4	286 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
5	265 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
6	1.280 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
6A	4.380 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
7	265 m	v	v	v	v		v	v	v	v	v
8	750 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
9	750 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
10	772 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
11	417 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
12	80 m	v	v		v	v	v	v	v	v	v
13	697 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
14	374 m	v	v	v	v		v	v	v	v	v
15	405 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
16	1.838 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
TÚNEL 1C	1.953 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
TÚNEL 2C	550 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
TÚNEL 3C	1.449 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
TÚNEL 5C	1.670 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
TÚNEL 6C	220 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
TÚNEL 7C	4.558 m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v

Figura 4. Equipamiento túneles.

SEGUNDA CALZADA: OBRAS Y DESAFÍOS

La ejecución de las obras de la Doble Calzada no se ha visto afectada, gracias a la gestión predial desplegada por el Concesionario. Los tramos culminados con anticipación se han puesto al servicio para los usuarios.

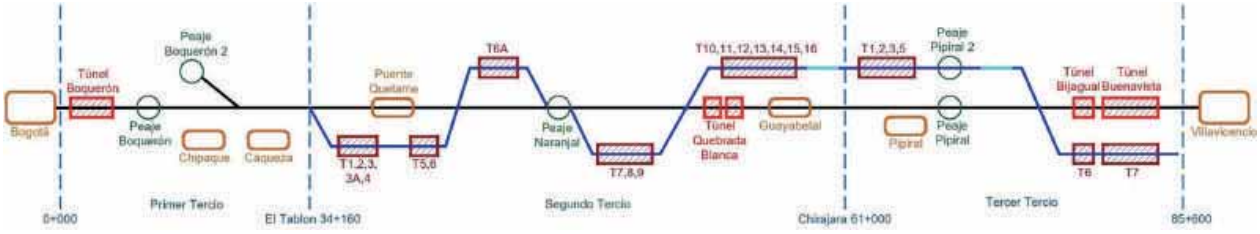


Figura 5. Representación esquemática de la autopista Bogotá a Villavicencio.

Entre los desafíos más destacables para la construcción de la segunda calzada, podemos destacar los siguientes:

- Sucesión túnel -viaducto – túnel.
- Acceso para la construcción de portales.
- Mitigación de los efectos del fenómeno invernal denominado de la niña (2010 – 2011).

- Construcción de obras en condiciones topográficas de montaña de de alta pendiente transversal.
- Obras en centros poblados.
- Excavación manual de caissons para cimentación de obras de contención de puentes.

SISTEMA DE BY -PASS

El tercio central (PR 34+900) al (PR62+500) desdoblado dispone de 5 zonas de by-pass, y el tercer tercio otros 5, situadas a una distancia media de 5,6 km y 5 km respectivamente, lo cual permite seguir operando la autopista en caso de un incidente o accidente en uno de los sentidos de circulación, permitiendo poner en sentido bidireccional cada zona de by-pass.

Así mismo, permite que los vehículos de emergencia puedan acceder a la zona afectada de una manera más ágil.

De igual forma se pueden realizar tareas de mantenimiento sin interferir en la continuidad de la operación.

Cada by-pass está diseñado con barreras automáticas, espiras, semáforos RAV, aspa-flechas, señales de velocidad y paneles de mensajería variable, además de visión por cámara, estando totalmente integrados y monitoreados en los Centros de Control.

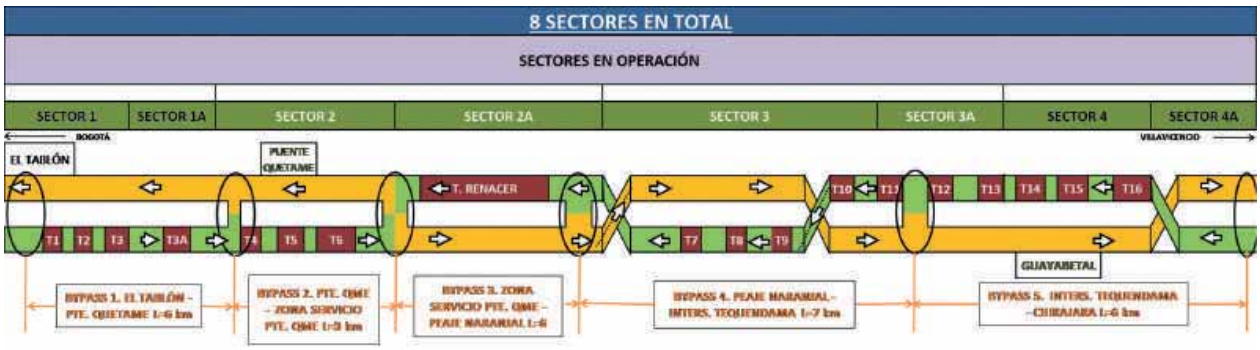


Figura 6. Zonas de by-pass tercio medio de la Autopista.

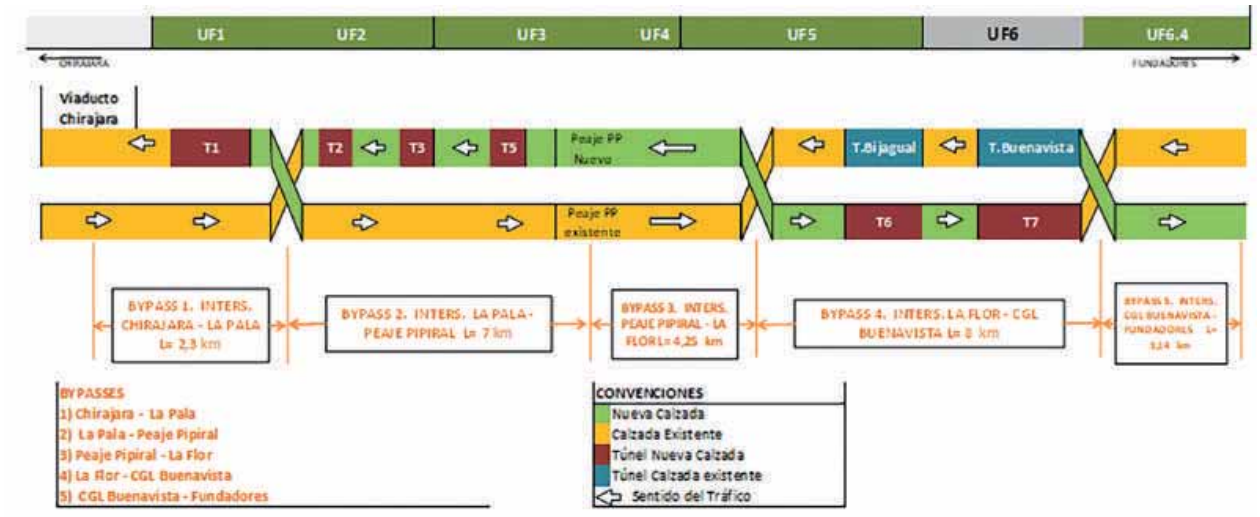


Figura 7. Zonas de by-pass tercer tercio de la Autopista.

TECNOLOGÍA

Arquitectura general de proyecto

La arquitectura del proyecto se compone de los siguientes elementos, los cuales unidos y organizados entre sí logran el correcto funcionamiento del sistema:

- Centros de Control, desde los cuales se monitorea y gestiona toda la concesión, existiendo un Centro de Control principal (CGI, Centro de Gestión Integral), situado en Boquerón; y dos secundarios (CGL, Centro de Gestión Local), situados en Naranjal y Buenavista. Estos tres centros monitorean constantemente los equipos instalados, pero sólo uno (CGI, en condiciones normales de funcionamiento) está activo y podrá actuar sobre el equipamiento de campo.
- Nueva Plataforma Scada de gestión integral para redes de túneles, implantada en los tres Centros de Control, para la supervisión y control de la concesión al completo, de todos los túneles y vías a cielo abierto de la carretera existente y de la nueva doble calzada.
- Redes de comunicaciones de Control Multiservicio, que conectan los servidores de los Centros de Gestión con todos los sistemas de campo del proyecto. Se ha diseñado una red para los servicios de control/PLC's, llamada red de control, entendiéndose como red de control a la red encargada de conectar a todos los elementos que hacen parte del sistema de PLC´s, y otra para los demás servicios de la red, llamada red multiservicio.
- Sistema Skynet, control automático de la operatividad del equipamiento de los túneles en modo degradado a través de un PLC Central y otros PLC distribuidos en cada túnel, que se hace cargo del control total de los sistemas ante una caída de las comunicaciones y servicios en los Centros de Control, o a voluntad del operador.
- Equipamiento de campo, los cuales conforman los sistemas de supervisión, vigilancia y control como: cámaras de Circuito Cerrado de Televisión (CCTV), contadores de tráfico, dispositivos de señalización vial, postes SOS, detección de incendios, control de ventilación e iluminación, megafonía, radiocomunicaciones, etc.

Sistemas inteligentes de tráfico, seguridad y vigilancia

El proyecto de doble calzada contempla los más avanzados sistemas, como los sistemas de circuito cerrado de televisión (CCTV), contadores de tráfico, señalización vial, comunicaciones, postes SOS, detección de incendios, detección automática de incidencias (DAI), control de iluminación, control de presión en galerías de evacuación y megafonía.

La concesión de doble calzada Bogotá-Villavicencio cuenta con sistemas de detección automática de incidencias (DAI), que facilitan la reacción inmediata ante sucesos que puedan poner en riesgo la seguridad del usuario o la circulación en la vía. Un sistema de video vigilancia con detección automática de accidentes, así como los equipos de medición de la calidad del aire, detección de incendios y estaciones meteorológicas, que mediante diferentes alarmas avisan en caso de emergencia, son algunos ejemplos de estos sistemas, que permiten tomar rápidamente las medidas más adecuadas. Entre ellas, está permitir que los vehículos transiten en forma bidireccional por una sola calzada en caso necesario, sin necesidad de interrumpir la circulación.

La solución implantada también incluye medidores de velocidad y sistemas de señalización variables, que informarán a los conductores en tiempo real sobre el estado de la vía, límites de velocidad e incidentes. Los túneles cuentan también con detectores de visibilidad, medidores de la velocidad y dirección del aire, detectores de NO y NO2, un sistema de iluminación artificial, de emergencia y evacuación, así como generadores de energía y plantas eléctricas de respaldo para atender cualquier contingencia.

Sistema de radiocomunicaciones

El sistema de retransmisión de radio FM es el que facilita la recepción de emisoras comerciales (del aire) y la modulación y transmisión de la emisora privada (local) emitida por la concesionaria para posteriormente retransmitirlas dentro de los túneles. Además, permite realizar la funcionalidad de interrupción/inserción de voz.

El sub-sistema de retransmisión de radio FM cuenta con un servidor controlador de radio "VAR-3", que es el grabador digital y controlador de inserción de voz con capacidad para controlar múltiples túneles, o grupos de túneles. El sistema de comunicación para VHF permite al personal de seguridad pública y al de operación y mantenimiento la realización de sus labores utilizando radios portátiles. Se han instalado repetidores locales para habilitar canales de comunicación.

El sistema en general está compuesto por extremos de configuración o sistemas maestros y esclavos los cuales contienen los equipos para la retransmisión de FM y la comunicación VHF. Además, se incluyen, sub-sistemas de antena distribuida, subsistemas para cobertura en la superficie en las cercanías de la boca del túnel, controladores (servidores) de radio FM.

Se dispone de cable radiante en los túneles y galerías para que provea una apropiada cobertura RF en los espacios reducidos. Además, se contará con una red de fibra óptica para transportar las señales de RF sobre fibra óptica entre los maestros y los esclavos.

Se dispone de comunicación por radio en toda la autopista, tanto dentro como fuera de los túneles.

Debido a las grandes distancias que existen entre los CGI/CGL y los sub-sistemas maestros y la cantidad de señales de audio que se requieren en todo el sistema, en lugar de utilizar enlaces dedicados de fibra óptica, se aprovecha la misma red troncal para transmitir paquetes de audio digital. En la siguiente ilustración se muestra el diagrama de bloques de la interfaz de audio digital entre CGI/CGL y los maestros.

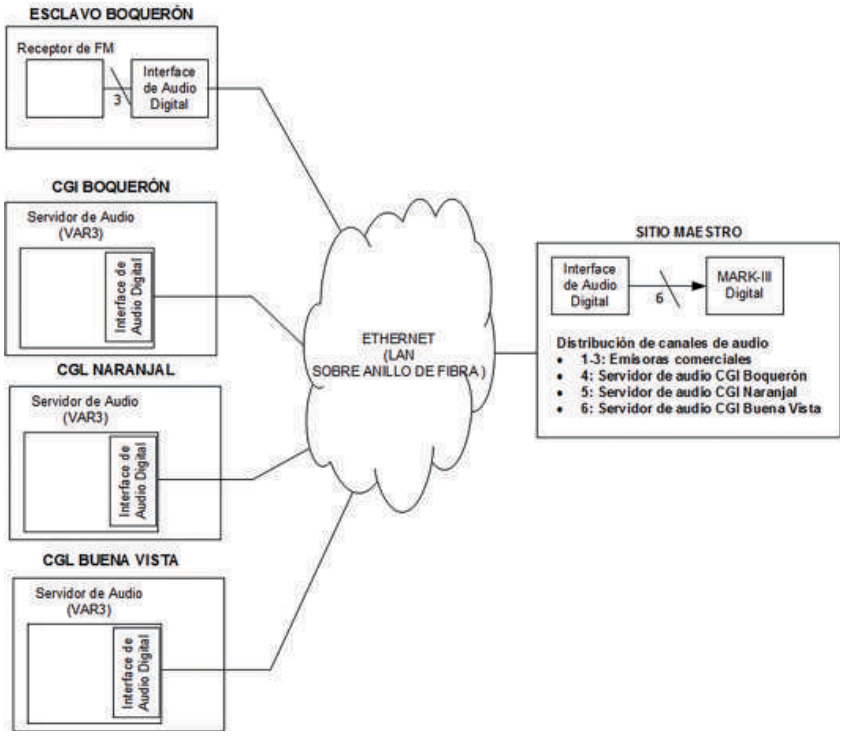


Figura 8. Esquema resumen del sistema de Audio

Se dispone de una red troncal de fibra óptica que permite la conectividad vía Ethernet para funciones de control y monitoreo entre los Centros de Gestión y los sub-sistemas maestros instalados a lo largo de todo el recorrido de la vía Bogotá-Villavicencio. Para brindar redundancia, esta red fue implementada utilizando una topología de doble anillo como se muestra en la figura.

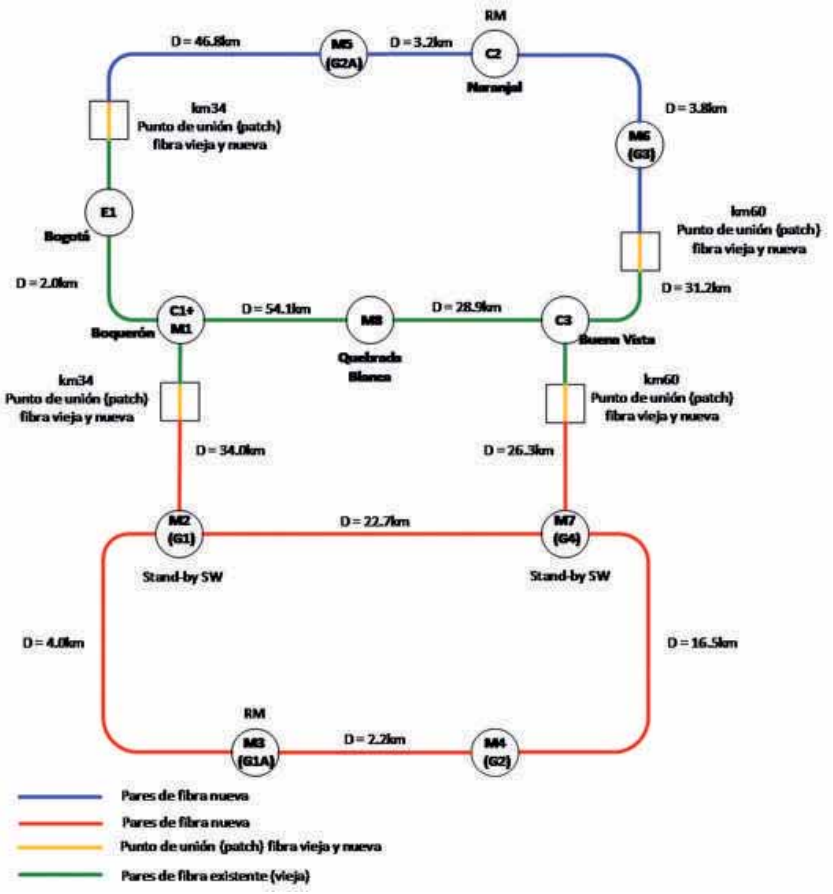


Figura 9. Esquema resumen del sistema de Fibra

Como dato fundamental cabe destacar la operatividad de la emisora de radio y la comunicación por radio por personal de operación y mantenimiento, así como los servicios de emergencia en todo el trayecto de la Autopista, tanto en el interior de los túneles como en el exterior.

INTEGRACIÓN CENTRALIZADA Y REDUNDANCIA

La arquitectura de gestión está centralizada en los tres Centros de Control replicados:

CGI de Boquerón

CGL de Naranjal

CGL Buenavista

En condiciones normales de funcionamiento, el CGI de Boquerón tiene el control de toda la concesión, manteniéndose los CGLs de Naranjal y Buenavista como centros de monitorización; los datos de campo, así como las actuaciones sobre equipos se replican en los dos centros no activos, con lo que cada uno de estos mantie-

ne coordinada la información de sus bases de datos para el eventual momento de activación. En todo momento, sólo un Centro tiene el control sobre cada equipo de campo, evitando así errores en la gestión de equipos o incidentes.

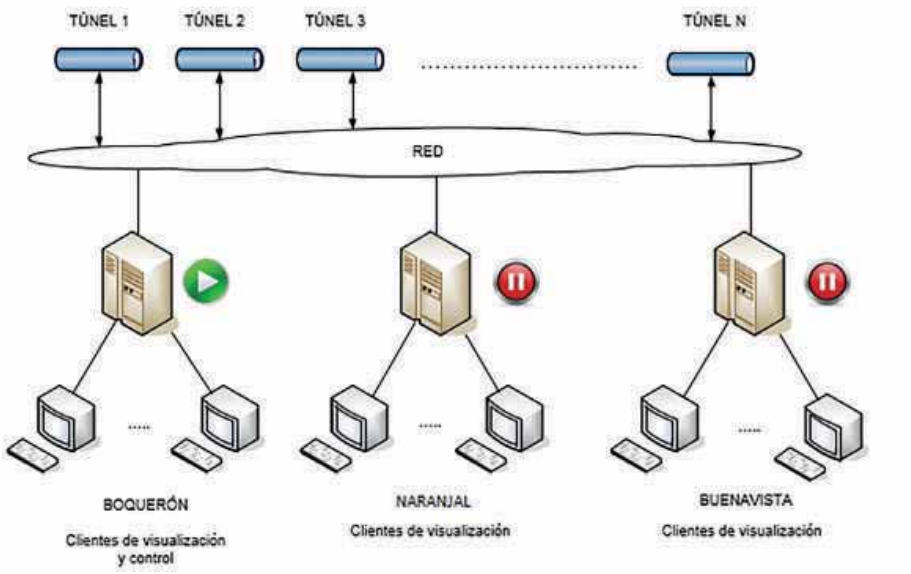


Figura 10. Esquema de gestión la centralizada en redundancia (I)

La redundancia entre Centros de Control permite maximizar la disponibilidad del control centralizado ante eventos como caída del servidor-clúster de la plataforma Scada del CGI, o pérdida de comunicación entre un tramo de la carretera y el CGI. En el primer caso, el primer Centro secundario (CGL de Naranjal) entraría en modo activo gestionando toda la concesión, y en el segundo, al perderse las comunicaciones con un tramo de concesión, el primer centro secundario con visibilidad sobre el tramo no visible por el CGI, entraría en modo activo gestionando el tramo correspondiente. Nótese que se cumple la premisa de que un equipo dado sólo está gestionado por un Centro.

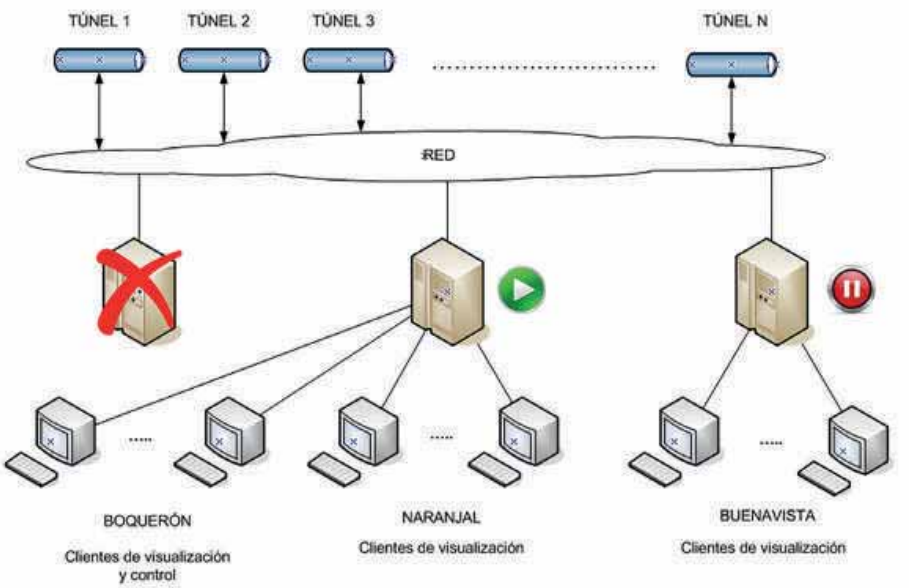


Figura 11. Esquema de gestión la centralizada en redundancia (II)

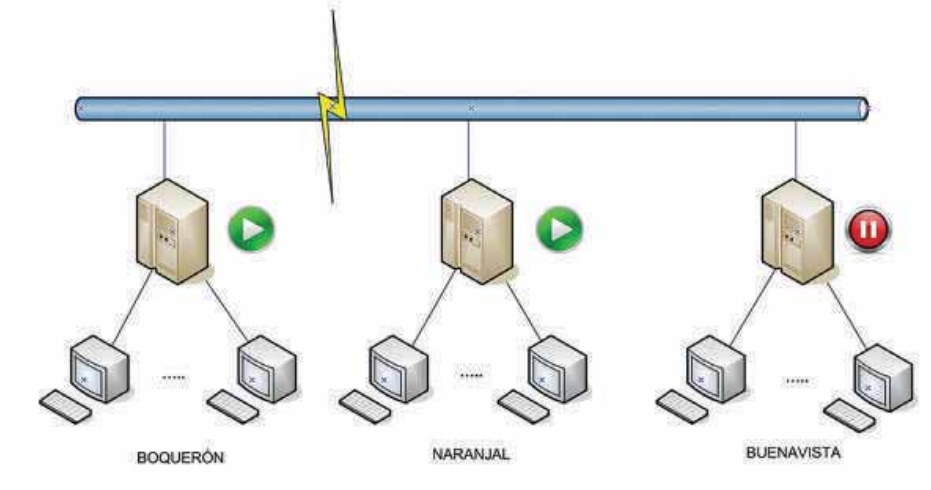


Figura 12. Esquema de gestión la centralizada en redundancia (I)

Hay que destacar la redundancia en las comunicaciones:

Por un lado, se lleva por fibra óptica por doble camino físico (un anillo redundante).

Por otro lado, se dispone de un enlace punto a punto vía radio con 1 Giga de ancho de banda.

Tercer nivel de redundancia: SKYNET

En cuanto a los sistemas de control, si el sistema de control y monitoreo se bloqueara en los tres centros de control, se podría controlar la concesión mediante el sistema Skynet, el cual gobernaría el grupo de túneles a nivel de PLC.

Es de subrayar que los PLC a este nivel tienen un ámbito geográfico por diseño coincidente con los sectores de la obra. A nivel de subestación también se dispone de las pantallas Magelis para tener control local gráfico. Es el "Interfaz Hombre-Máquina" del PLC.

Se introduce en este proyecto el concepto de PLC Skynet como el PLC capaz de coordinar distintas automatizaciones en distintos ámbitos geográficos orientadas a una serie de casos de operación.

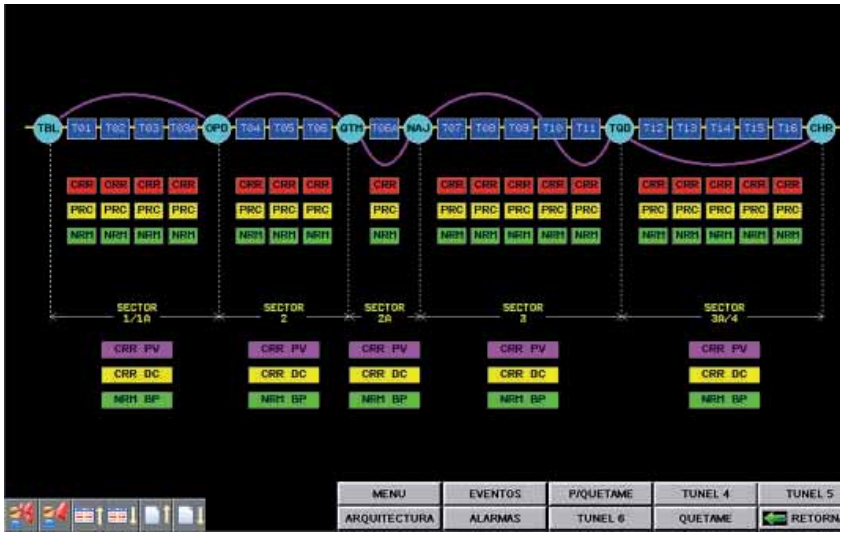


Figura 13 Pantalla de operación del sistema SKYNET

Para un correcto funcionamiento del PLC Central respecto a los centros de control, es necesario establecer un mecanismo de intercambio de información entre ambos con el fin de determinar el momento exacto en el que el PLC Central ha de hacerse cargo del control de los túneles en degradado. Esto se gestiona mediante una lógica (watch dog).

Se establece un mecanismo de latido permanente (keep alive) que los diferentes centros de control estarán enviando de forma periódica el estado en que se encuentra cada centro con el fin de conocer si está operativo o no.

La activación del PLC Central se producirá sólo en caso de modo degradado del Centro de Control. Este modo degradado, se produce en caso de falla de los tres Centros de Control, el CGI y los dos CGL's. Si el PLC Central no tiene comunicación con ninguno de ellos, entrará en Modo Degradado y permitirá que los operadores actúen manualmente sobre los túneles en caso de que se produzcan incidencias concretas dentro de su ámbito de control. Esta actuación se podrá llevar a cabo a través de una serie de comandos que estarán disponibles a través de las HMI.

El Modo Degradado no puede entrar a funcionar mientras haya alguno de los Centros de Control activo, por lo cual se ha desarrollado el mecanismo en el que el los PLCs, incluido el PLC Central, controlan que están en Modo Degradado. Esta medida de control es importante, dado que en caso de estar activo al menos un Centro de Control, la operación siempre se debe hacer desde él y una posible actuación autónoma desde un PLC o el PLC Central será descartada. Una vez el PLC o PLC Central recobren la comunicación con alguno de los Centros de Control, dejará de estar en Modo Degradado

Los PLCs y las Magelis se encuentran distribuidos en diferentes Cuartos Técnicos a lo largo de la vía y el PLC Skynet se sitúa en el Centro de Control de Naranjal. En el diagrama inferior se muestra la arquitectura de comunicaciones del mismo.

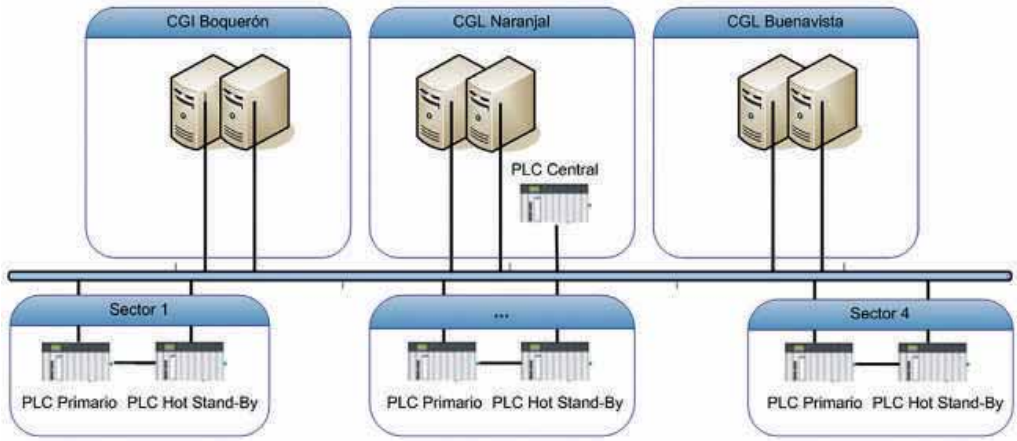


Figura 14. Esquema PLCs

Arquitectura de comunicaciones

Dentro de la red de comunicaciones desplegada en la autopista, hay tres niveles bien definidos: la red troncal, las redes de campo y la red de centro de control.

Debido a la elevada cantidad de túneles integrados y a que la red es un elemento crítico del sistema de control sobre el que se apoyan el resto de subsistemas (megafonía, CCTV,…), la red troncal es una red Gigabit Ethernet de capa 3 sobre fibra monomodo. En ella se implementan distintas VLANs para acomodar los sistemas dentro de la misma y aislarlos frente a un posible fallo. Este tipo de red ofrece la robustez, capacidad de enrutamiento y ancho de banda necesario para un sistema de esta magnitud. Para conseguir extender la red

de comunicaciones a toda la instalación se utilizan redes de campo distribuidas en los distintos túneles y conectadas a la red troncal mediante los nodos de nivel 3. El soporte físico de estas redes también será fibra óptica monomodo.

La red actual está formada por los siguientes nodos principales:

- CGI Boquerón (PK 3+500)
- Peaje Boquerón I (PK 4+100)
- Básculas (PK 22+400)
- Peaje Puente Quetame (PK 44+700)
- Peaje Pipiral (PK 72+000)
- CGL Buenavista (PK 82+500)
- Búnker en el By pass del Tablón (PK 34+900).
- Subestación Túnel 5 (PK 42+205).
- Centro del Control de Naranjal (PK 50+200).
- Subestación Túnel 10 (PK 55+552).
- Búnker en el By pass de Chirajara (PK 60+590).
- Subestación 2 del túnel 1C.
- Subestación del túnel 3C.
- Subestación 1 del Túnel 7C,
- Subestación 2 del Túnel 7C.

Actualmente se posee redundancia de tubo de fibra, utilizando un par de fibras de la empresa Media Commerce y el tubo principal instalado en el proyecto de 2010.

Para el proyecto de Doble Calzada se instaló una nueva tirada de fibra desde El Tablón (PK-34+900) hasta Chirajara (PK 60+590). En el siguiente diagrama se puede apreciar la arquitectura de 2010 y la nueva de doble Calzada:

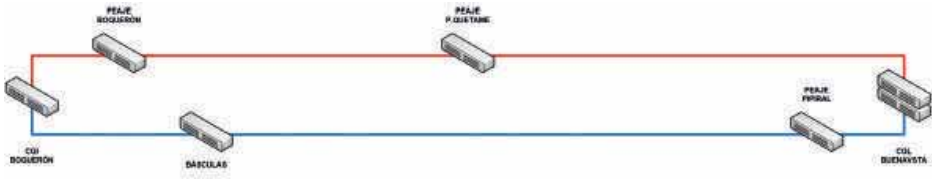


Figura 15. Esquema de arquitectura 2010

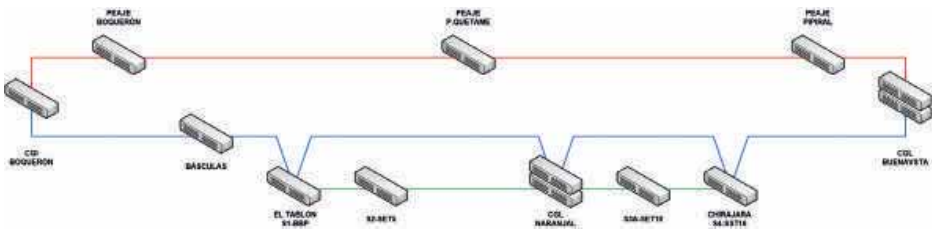


Figura 16. Esquema de arquitectura actual

SEGURIDAD

Coviandina ha tomado como referencia la Directiva Europea de Túneles de carretera además de las recomendaciones del Comité de Túneles de la PIARC, para planificar, diseñar, implantar, operar y mantener una autopista con un elevado número de túneles y un elevadísimo % de vehículos de mercancías peligrosas.

Para ello se ha utilizado la última tecnología española en plataformas para la gestión centralizada de centros de control multi-túnel que incorpora la gestión automática de incidencias y guiado de emergencias.

Como se ha mencionado, se ha adoptado la Directiva Europea de Seguridad de túneles CE 54/2004.

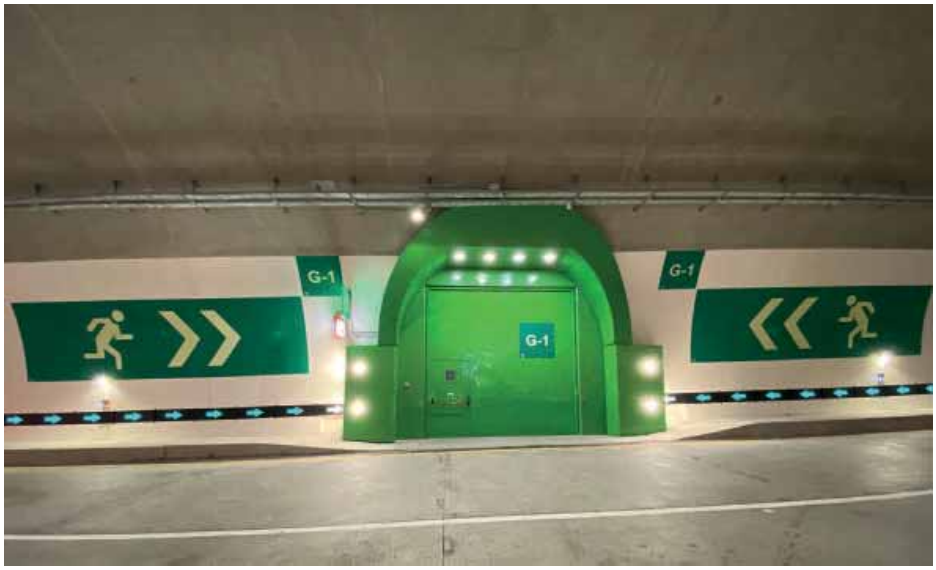


Figura 17. Salidas de emergencia cada 500m.

Se han seguido las recomendaciones en cuanto a criterios fundamentalmente de ITS en Túneles, incidiendo especialmente en los sistemas de señalización fotoluminiscentes retroiluminados de elementos de emergencia como Bies, hidrantes, postes SOS y señalización de distancia a las salidas de emergencia y señalización de éstas. Así mismo, se han incorporado sistemas electroluminiscentes a ambos lados de las salidas de emergencia para que junto con señales acústicas y luces estroboscópicas permitan guiar al usuario del túnel hacia la salida más cercana.

En cuanto a Documentación de Seguridad de los Túneles, se han realizado análisis de riesgos con la metodología DG-QRAM, y metodología general MARTE en caso de considerarse, y se ha realizado un Manual de Explotación y Plan de Autoprotección.

Finalmente, se ha incorporado la figura de Organismo de Inspección, realizando una formación a los operadores de Centro de Control y una Auditoría a las instalaciones, obra civil, formación, y mantenimiento, antes de proceder un túnel o grupo de túneles al tráfico.

Se agradece la colaboración de la PIARC en Colombia para mejorar aspectos del Manual de Túneles como "disponer de aceras de 10cm de altura para que los vehículos se puedan subir y dejar paso a vehículos de emergencia".

CONCLUSIONES

- Se trata de la mayor densidad de túneles en una autopista de Latinoamérica, ya que se trata de aproximadamente 52 túneles en una longitud de casi 70 km de una carretera en 86 km de autopista de origen - destino (28 % de túneles).
- El desdoblamiento de la carretera en sus tercios medio y central finalizó en mayo de 2022, quedando la vía existente en Par Vial.
- Está previsto el desdoblamiento del primer tercio en los próximos 5 años.
- Está previsto el desdoblamiento del par vial del tercio medio a partir del año 2027.
- La vía en operación, tiene condiciones geográficas complejas, discurre desde una altitud de 3.000 msnm hasta 600 msnm, con la complejidad y riesgo que conlleva desde la parte geológica y de alta pluviosidad.
- El tramo de autopista abierto dispone de uno de los túneles de los más largos de Latinoamérica en operación, siendo el Túnel de 7 del tercer tercio de 4.558 m de longitud el más moderno de Latinoamérica (abierto al tráfico en julio de 2022).
- La carretera se opera con un elevado % de vehículos de mercancías peligrosas (nafta), crudo y aceite de palma concretamente 2.000 vehículos al día, con una IMD de 12.600 vehículos/día y 30% de vehículos pesados.
- Para hacer frente a estos desafíos se ha seguido la Directiva Europea CE 54/2004 sobre seguridad en túneles de carretera, incrementando los sistemas ITS, dotando a la autopista de tres centros de control, redundantes, sistema redundante Skynet, comunicación por fibra óptica y redundante por radio de 1 Giga de ancho de banda.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Directiva Europea CE 54/2004.

Congreso Nacional de Infraestructura. Cámara Colombiana de la Infraestructura. Cartagena de Indias 25/11/2016

Manual de Señalización Vial 2015 del Ministerio de Transporte.

Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre requerimientos

Mínimos de seguridad en túneles de Red Transeuropea de Carreteras (20 de Abril de 2004).

ISO/IEC 18000-63 Identificación por radio frecuencia para gestión de dispositivos.

Parte 63: parámetros para interfaces de comunicaciones por aire de 860 MHz a 960 MHz Tipo C.

Decreto 2060 22 oct-2015 sobre Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS).

Resolución 4101 de diciembre 28 de 2004 Plan Nacional de Seguridad Vial.

ICONTEC. Instituto Colombiano de Normas Técnicas.

NTC 2050. Código Eléctrico Colombiano.

NTC Catálogo en Seguridad Contra Incendios.

RETIE. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.

"NFPA 14 Standard for the Installation of Standpipe and Hose Systems".

"NFPA 22 Standard for water tanks for private fire protection".

"NFPA 101 Life Safety Code".

PIARC, 2003 "Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels".

PIARC, 2000 "Pollution by Nitrogen Dioxide in Road Tunnels".

PIARC, 1999 "Fire and Smoke Control in Tunnels".

EN 135441 Equipamiento vial para carreteras. Sensores de variables atmosféricas en carreteras.

EN 60849 Seguridad en evacuación.

EN 12966-1 "Vertical road signs: Variable message signs".

UNE 135314 Normas Paneles de Mensaje Variable.

UNE 135411 Equipamiento para la señalización vial. Estaciones Remotas.

UNE 135421 Equipamiento para la señalización vial. Estaciones de toma de datos.

EN 54-20 Sistemas de detección y alarma de incendios Parte 20: Detectores de aspiración de humos.

HERRAMIENTA DE ANÁLISIS COMBINADO DE EVACUACIÓN Y HUMOS PARA TÚNELES DE CARRETERA

Carlos Del Álamo Merino
Ignacio Del Rey Llorente
Técnica y Proyectos, S.A (TYPSA)

Durante las últimas décadas se ha realizado un esfuerzo de desarrollo normativo a nivel internacional en el ámbito de la seguridad en túneles de carretera. En el ámbito europeo, en el año 2004 se aprobó la Directiva 2004/54/EC de seguridad sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras que establece la necesidad de emplear metodologías de análisis del riesgo.

En el informe PIARC "Análisis de riesgo para túneles de carretera" de 2008 se describen en detalle algunas de las metodologías disponibles en la época (Austria, Holanda, Francia, Italia, QRAM), aunque otros países (como España con la MARTE) han desarrollado metodologías similares en los últimos años que garantizan la homogeneidad, fiabilidad y coherencia de este tipo de análisis.

Todas estas metodologías precisan del desarrollo de herramientas de evaluación de consecuencias de distintos escenarios asociados a los peligros en estudio. Dichas consecuencias (en término de víctimas) pueden determinarse mediante valores tabulados de acuerdo con la experiencia o a herramientas que combinan los procesos de evacuación de usuarios y el comportamiento de los humos.

Con el incremento del uso de programas de computación de dinámica de fluidos (CFD, Computational Fluid Dynamics) y la existencia de numerosos estudios que cuantifican los efectos producidos en personas presentes en atmósferas generadas por incendios, este último tipo de herramientas capaces de determinar las consecuencias ante escenarios de incendio en túneles se hace más necesario si cabe.

En la presente comunicación se presentará una herramienta centrada en la combinación de modelos de comportamientos de humos de tipo tridimensional con modelos de evacuación simplificados en base a reglas analíticas empleadas habitualmente para túneles de carretera, destacando por su versatilidad para ser utilizada con distintas tipologías de túnel y por su utilidad a la hora de comparar los efectos que produce la aplicación de distintos criterios en la evacuación de usuarios.

Se mostrarán resultados y casos prácticos que permiten entender la capacidad y funcionalidades de este tipo de herramientas.

COMBINED SMOKE AND EXHAUST ANALYSIS TOOL FOR ROAD TUNNELS

Over the last few decades, an effort has been made to develop regulations at international level in the field of road tunnel safety. At European level, the Directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network was approved in 2004, which establishes the need to use risk analysis methodologies.

The PIARC report "Risk analysis for road tunnels" of 2008 describes in detail some of the methodologies available at the time (Austria, Holland, France, Italy, QRAM), although other countries (such as Spain with MARTE) have developed similar methodologies in recent years which guarantee the homogeneity, reliability and consistency of this type of analysis.

All these methodologies require the development of tools for assessing the consequences of different scenarios associated with the hazards under study. These consequences (in terms of casualties) can be determined by means of tabulated values according to experience or tools combining user evacuation and smoke behaviour.

With the increasing use of Computational Fluid Dynamics (CFD) software and the existence of numerous studies quantifying the effects on people in fire atmospheres, this kind of tools capable of determining the consequences of fire scenarios in tunnels becomes even more necessary.

This paper will present a tool based on the combination of three-dimensional smoke behaviour models with simplified evacuation models based on analytical rules commonly used for road tunnels, which stands out for its versatility to be used with different types of tunnels and for its usefulness when comparing the effects produced by the application of different criteria in the evacuation of the tunnel users.

Results and case studies will be shown that allow the capacity and functionalities of this tool to be understood.

OUTIL D'ANALYSE COMBINÉE DES FUMÉES ET DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT POUR LES TUNNELS ROUTIERS

Au cours des dernières décennies, un effort a été fait pour développer des réglementations au niveau international dans le domaine de la sécurité des tunnels routiers. Au niveau européen, la directive 2004/54/CE concernant les exigences de sécurité minimales applicables aux tunnels du réseau routier transeuropéen a été approuvée en 2004, ce qui établit la nécessité d'utiliser des méthodologies d'analyse des risques.

Le rapport de l'AIPCR " Analyse des risques pour les tunnels routiers " de 2008 décrit en détail certaines des méthodologies disponibles à l'époque (Autriche, Hollande, France, Italie, QRAM), bien que d'autres pays (comme l'Espagne avec MARTE) aient développé ces dernières années des méthodologies similaires qui garantissent l'homogénéité, la fiabilité et la cohérence de ce type d'analyse.

Toutes ces méthodologies nécessitent le développement d'outils permettant d'évaluer les conséquences de différents scénarios associés aux aléas étudiés. Ces conséquences (en termes de victimes) peuvent être déterminées au moyen de valeurs tabulées selon l'expérience ou d'outils combinant l'évacuation des usagers et le comportement des fumées.

Avec l'utilisation croissante des logiciels de dynamique des fluides numérique (CFD, Computational Fluid Dynamics) et l'existence de nombreuses études quantifiant les effets sur les personnes dans les atmosphères d'incendie, ce type d'outils capables de déterminer les conséquences de scénarios d'incendie dans les tunnels devient encore plus nécessaire.

Cet article présentera un outil basé sur la combinaison de modèles tridimensionnels de comportement de la fumée avec des modèles d'évacuation simplifiés basés sur des règles analytiques couramment utilisées pour les tunnels routiers, qui se distingue par sa polyvalence pour être utilisé avec différents types de tunnels et par son utilité pour comparer les effets produits par l'application de différents critères dans l'évacuation des usagers du tunnel.

On montrera des résultats et des études de cas qui permettent de comprendre la capacité et les fonctionnalités de cet outil.

1. ANTECEDENTES

A raíz de los dramáticos accidentes en túneles de comienzos del siglo XXI, la seguridad contra incendios ha pasado a ser un elemento fundamental a la hora de elaborar el proyecto de cualquier túnel, tanto a la hora de considerar elementos complementarios como puedan ser los sistemas de detección, de extinción, refugios, etc., como a la hora de elaborar un plan de actuación que se adapte a cada caso.

En el pasado eran evidentes las diferencias entre los países comunitarios a la hora de definir criterios de seguridad en túneles en forma de normativas o recomendaciones nacionales. Incluso algunos países, entre ellos España, no contaban con documentos específicos de obligado cumplimiento y se vieron obligados a apoyarse en recomendaciones externas de otros como Francia, Suiza, Austria o Alemania o las recomendaciones internacionales de PIARC (Permanent International Association of Road Congress).

No ha sido hasta las últimas dos décadas cuando se han invertido esfuerzos en un desarrollo normativo a nivel internacional en el ámbito de la seguridad en túneles de carretera. En el ámbito europeo, en el año 2004 se aprobó la Directiva 2004/54/EC de seguridad sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras [1] que establece la necesidad de emplear metodologías de análisis del riesgo con las que evaluar de manera cualitativa y/o cuantitativa las condiciones de seguridad durante la explotación de los túneles.

Las metodologías ya disponibles en la época se recogen y describen en detalle en el informe PIARC "Análisis de riesgo para túneles de carretera" de 2008 [2]. Entre ellas se pueden encontrar el Modelo austriaco (TuRisMo), el análisis de escenarios para túneles de carretera en Países Bajos, modelo holandés (Tunprim), el estudio específico de riesgos en Francia, el análisis italiano de riesgos (IRAM) o el QRAM para mercancías peligrosas.

Mientras tanto, el resto de los países de la UE han desarrollado metodologías similares en los últimos años que garantizan la homogeneidad, fiabilidad y coherencia de este tipo de análisis, como ha hecho España con la metodología conocida como "MARTE" [3], tras la resolución del 30 de mayo de 2012 por parte de la Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda del antiguo Ministerio de Fomento en aplicación del Real Decreto 635/2006 sobre los requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carretera del Estado [4].

Una parte importante dentro de estas metodologías son los análisis orientados a la seguridad frente a incendios con el objetivo fundamental de optimizar de diseños y plantear propuestas de mejora tanto para prevenir este tipo de incidentes, como para mitigar sus consecuencias.

Para este tipo de análisis se precisa del desarrollo de herramientas de evaluación que determinen y comparen las consecuencias de distintos escenarios de incendios. Dichas consecuencias (en término de víctimas) pueden determinarse mediante valores tabulados de acuerdo con la experiencia o a herramientas que combinan los procesos de evacuación de usuarios y el comportamiento de los humos.

Este último tipo de herramientas con las que ser capaces de determinar las consecuencias ante escenarios de incendio en túneles se hace más necesario si cabe con el incremento del uso de programas de computación de dinámica de fluidos (CFD, Computational Fluid Dynamics) y la existencia de numerosos estudios que cuantifican los efectos producidos en personas presentes en atmósferas generadas por incendios.

En la presente comunicación se presenta una herramienta centrada en la combinación de modelos de comportamientos de humos de tipo tridimensional con modelos de evacuación simplificados en base a reglas analíticas empleadas habitualmente para túneles de carretera, destacando por su versatilidad para ser utilizada con distintas tipologías de túnel y por su utilidad a la hora de comparar los efectos que produce la aplicación de distintos criterios en la evacuación de usuarios como, por ejemplo, la aplicación de distintas normativas. La herramienta ha sido el resultado de un proyecto de investigación, ad-hoc, interno de TYPSA.

2. METODOLOGÍA

La metodología para la realización de un análisis combinado de humos y evacuación se puede simplificar en dos etapas bien diferenciadas:

a) Conocer las condiciones ambientales en el interior del túnel durante un incendio (principalmente en la altura de evacuación)

b) Comprobar el efecto de estas condiciones sobre los usuarios durante su evacuación del túnel.

Durante la primera etapa se deberá definir el escenario de incendio a simular donde se concretan todos los parámetros e hipótesis necesarios para la simulación como la geometría del túnel, la definición del incendio o las condiciones de contorno. De esta simulación de incendio también es fundamental acordar las condiciones para la toma de resultados y las variables que se involucrarán en el posterior análisis de evacuación.

En la segunda etapa, con los resultados obtenidos de la simulación de incendio con los que se conocen la evolución de las condiciones ambientales en el interior del túnel se aplica el modelo de evacuación en base a las reglas y parámetros acordados, que pueden venir dados por una normativa, por ejemplo, o por criterios del autor del análisis.

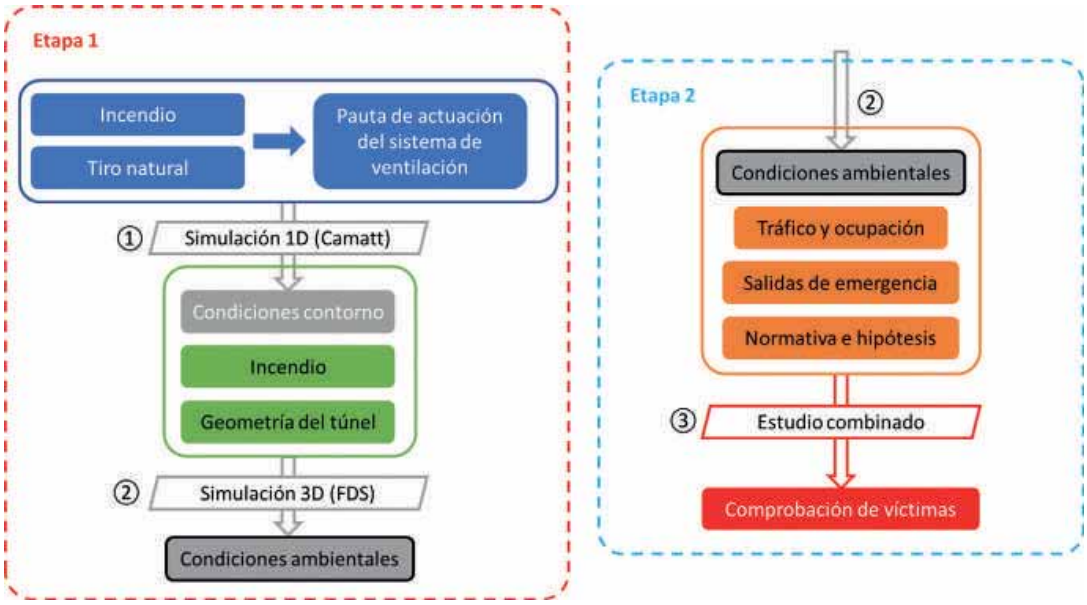


Figura 1. Ejemplo de esquema de metodología. Elaboración propia

Esta comunicación se centra en la segunda etapa del estudio, es decir, en el desarrollo de la herramienta capaz de combinar ambos modelos, aunque también se abordan algunos aspectos importantes de las simulaciones de incendio.

3. SIMULACIONES DE INCENDIO

La primera etapa va a depender de cada escenario de incendio que se quiera evaluar entrando en juego las hipótesis que se utilicen en la modelización relacionadas con las características geométricas del túnel, las características el propio incendio y las condiciones de contorno con las que se obtendrá la evolución de las condiciones ambientales en el interior del túnel.

Las simulaciones de incendio que son utilizadas ampliamente en el ámbito de túneles pueden ser de dos tipos: unidimensionales y tridimensionales.

a) Unidimensionales: Se trata de simulaciones con las que comprobar el movimiento del aire a lo largo de un túnel o red de túneles con un escaso coste computacional al suponer que toda la sección transversal se encuentra en las mismas condiciones y utilizar variables macroscópicas. Este grado de simplicidad permite realizar multitud de estudios en los que analizar escenarios de incendio con los que poder dimensionar un sistema de ventilación, por ejemplo.

   No obstante, esta situación se aleja de la realidad en las zonas cercanas al foco del incendio, pues no se tienen en cuenta los efectos de turbulencias, recirculación o flotabilidad de los gases calientes que dan lugar a la estratificación de la nube de humo en la clave del túnel y manteniendo una zona segura a la altura de la evacuación.

   Entro los programas más habituales para la modelización unidimensional se encuentran Camatt [5] o IDA Tunnel [6].

b) Tridimensionales: Con las simulaciones tridimensionales a partir de la geometría real del túnel es posible analizar la progresión de los parámetros más característicos de los incendios de una manera muy realista en las inmediaciones de estos. Este tipo de resultados en los que se tienen en cuenta la dinámica tridimensional de los gases y el flujo de los fluidos adquiere capital importancia para evaluar las condiciones que se encuentran los usuarios a la hora de salir del túnel en situaciones de incendio.

   Sin embargo, el coste computacional de este tipo de simulaciones es muy elevado. Los avances en cálculo en paralelo con varios procesadores o el lanzamiento de simulaciones en servicios en la nube reducen los tiempos de computación, pero sigue siendo un factor a tener en cuenta.

   Entre los programas especializados en simulaciones de incendio destaca Fire Dynamics Simulator, FDS [7].

Aparte de las diferentes características que presentan cada tipo de modelado, el uso de uno u otro tipo va a depender también de la finalidad del estudio. Para el dimensionamiento de los distintos tipos de sistemas de ventilación o la definición de sus pautas de actuación los modelos unidimensionales suelen ser los más adecuados, principalmente para los sistemas de ventilación longitudinales, pero también con otros sistemas. En caso de túneles de gran longitud usando un sistema semitransversal, los modelos unidimensionales son los únicos capaces de modelar el sistema por completo y, por lo tanto, de comprobar la limitación de la corriente de aire en la zona del incendio.

Pero cuando se quiere evaluar si las condiciones para la evacuación de usuarios son aceptables, por las características descritas anteriormente, los modelos tridimensionales ofrecen una información mucho más realista. Estos modelos permiten observar con mayor fidelidad el movimiento de la capa de humos a la altura de evacuación. Pueden mostrar que el túnel es menos peligroso que lo que mostraría un modelo unidimensional ya que en estos últimos, por definición, el humo ocupa toda la sección.

En algunas ocasiones se puede plantear el uso de ambos tipos para el mismo estudio. Por ejemplo, en casos de túneles de gran longitud con el objetivo de las simulaciones unidimensionales es establecer las condiciones de contorno de velocidad del aire en los extremos de la zona de simulación de los modelos 3D, lo que permite reducir la longitud del túnel simulada.

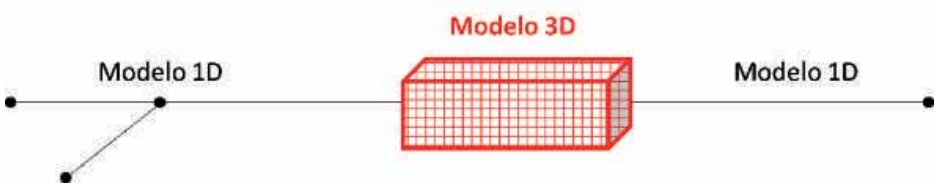


Figura 2. Ejemplo de uso de varios tipos de modelo para una simulación en túnel. Elaboración propia

Para un correcto modelado de un escenario de incendio se han de tener en cuenta:

- Geometría del túnel: Sección transversal, pendiente, posición de salidas de emergencia
- Definición del incendio: Curva de crecimiento, emisión de contaminantes, posición en el túnel…
- Condiciones de contorno: Condiciones atmosféricas (temperatura, viento…), Pautas de actuación del sistema de ventilación

En el caso de la presente comunicación, la preparación de los resultados de estas simulaciones (postprocesado) es un aspecto fundamental para pasar a la siguiente etapa del análisis y poder coordinar el movimiento de usuarios afectados por un incendio con los valores de visibilidad, temperatura o concentración de contaminantes.

Mediante el uso de los programas de simulación mencionados se deberá conseguir en formato tabla la evolución espacial y temporal de todas las variables.

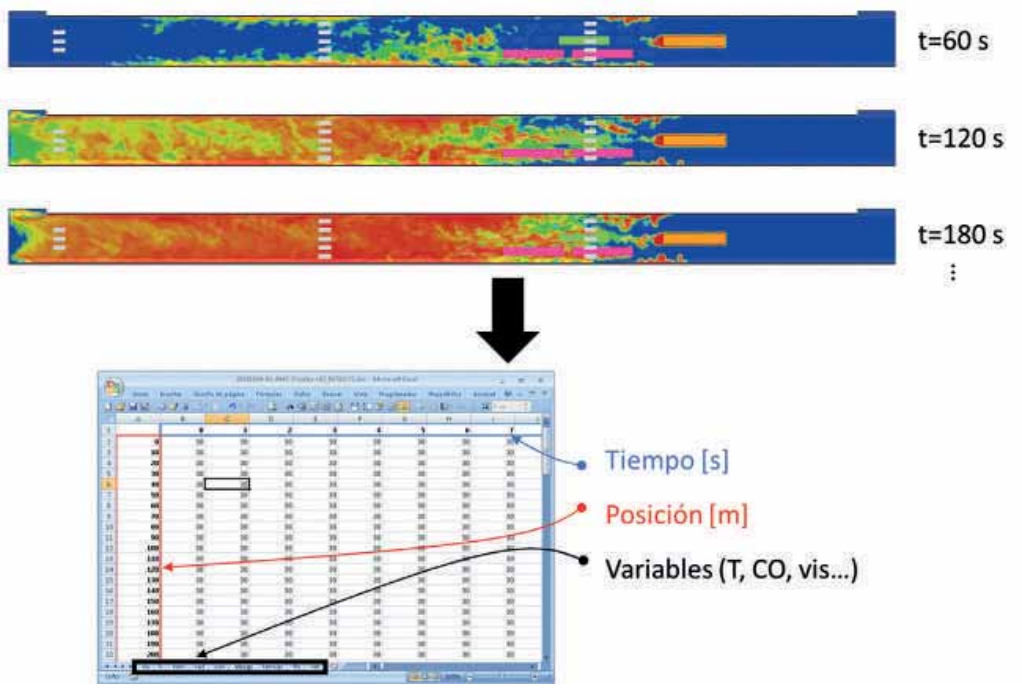


Figura 3. Preparación de resultados de una simulación de incendio con FDS. Elaboración propia

El estudio se centra en el uso de simulaciones tridimensionales ya que ofrecen una mejor representación de las condiciones a la altura de evacuación como se ha comentado con anterioridad, pero podría aplicarse a simulaciones unidimensionales igualmente.

4. HERRAMIENTA DE ANÁLISIS COMBINADO "PESTO"

Tras obtener y preparar los resultados de la simulación de incendio con los que se conoce la evolución de las condiciones ambientales en el interior del túnel se pasa a aplicar el modelo de autoevacuación con el que se conocerá de manera cuantitativa los riesgos de un posible incendio en términos de efectos sobre los usuarios del túnel.

La Asociación Mundial de Carreteras (PIARC) define la autoevacuación como "la capacidad de las personas involucradas en un incidente en un túnel para alejarse de una fuente de peligro por iniciativa propia y manteniendo un comportamiento apropiado" [8]. Además, se incide en que, en caso de incendio, el principal problema para la seguridad humana es el humo, de aquí la necesidad de abordar esta problemática de manera combinada.

Este tipo de análisis se incluye, por ejemplo, en los estudios específicos de riesgos que se realizan en Francia [9]. Uno de los principales objetivos es evaluar si el estado de referencia de un túnel en servicio relativo a su equipamiento (salidas de emergencia, ventilación, etc.) es aceptable o no de acuerdo con la seguridad de los usuarios del túnel. Para lo cual se hace una selección de un número representativo de escenarios de incendio y mediante gráficos espacio-tiempo se comprueban las condiciones para los usuarios durante su autoevacuación y se comparan para distinto equipamiento.

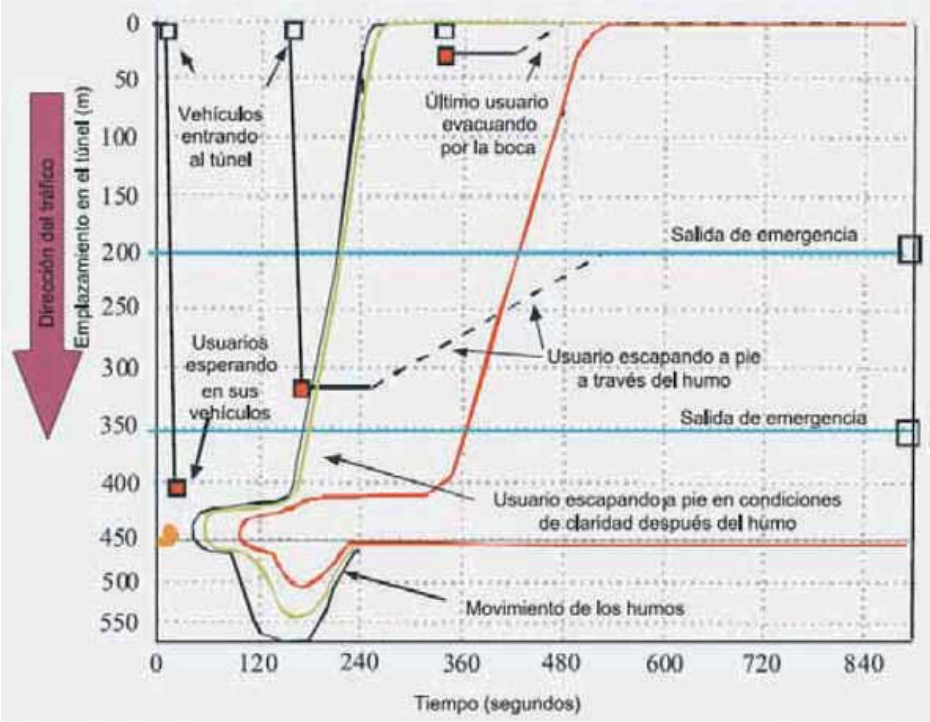


Figura 4. Ejemplo de análisis combinado de humos y autoevacuación. Fuente: [2]

Con esta base como referencia y el uso de estudios realizados sobre los efectos del humo en personas, se ha desarrollado la herramienta PESTO (del acrónimo People Evacuation and Smoke for Tunnels under Operation) que permite realizar este tipo de análisis combinados de humos y autoevacuación de usuarios de manera automática. En este apartado se comentará el entorno de programación de la herramienta y su estructura, los principales modelos e hipótesis utilizadas y algunos ejemplos de aplicación.

4.1. Desarrollo

La herramienta se ha desarrollado con el entorno de programación de Microsoft VBA (Visual Basic for Applications) junto con Microsoft Excel. VBA es el lenguaje de macros (instrucciones que se ejecutan secuencialmente) de Microsoft Visual Basic que permite a usuarios y programadores ampliar la funcionalidad de programas de la suite Microsoft Office, siendo la automatización de procesos o la creación de aplicaciones para el escritorio sus utilidades principales.

La elección de esta solución para el desarrollo de la herramienta se debe a varios motivos:

- No hay necesidad de interfaz gráfica porque se utiliza directamente la ventana de Excel para la introducción de datos.
- Prácticamente todo el cálculo es programado en VBA.
- Los resultados se escriben de nuevo en Excel lo que permite el desarrollo de la parte gráfica en el mismo libro Excel, pero potenciado con VBA.
- Fácil protección de la herramienta mediante contraseña.

Esta herramienta primeramente se alimenta de los resultados de las simulaciones de incendio previamente procesados para su uso que incluyen la evolución temporal a lo largo del túnel de las principales variables involucradas en un incendio. Posteriormente, tras la introducción de varios parámetros de entrada que caracterizan del túnel y el tráfico que soporta, así como la elección de las hipótesis a utilizar, se lleva a cabo el modelo de cálculo de trayectorias de autoevacuación programado con varias macros.

4.2. Modelado e hipótesis

El modelo de autoevacuación se plantea en 3 procesos:

1. Movimiento de los vehículos llegando al foco del incendio
2. Movimiento de los usuarios saliendo del túnel
3. Cuantificación de la incapacidad de los usuarios para abandonar el túnel

4.2.1. Movimiento de vehículos

Para estimar el número de vehículos en el túnel al producirse un accidente se utiliza un método simplificado similar al que propone el CETU [9] o la metodología española conocida como MARTE [3]. El modelo de formación de colas permite conocer el número de usuarios presentes y, gracias al desarrollo de esta herramienta, puede considerarse la interacción el movimiento del tráfico y el movimiento de los humos, planteando hipótesis como la parada de vehículos al ver humo avanzando.

En esta parte del cálculo se utiliza el modelo macroscópico simple, típico de ingeniería de tráfico, que relaciona las variables básicas a través de la siguiente ecuación:

$$I = \frac{V}{D} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- D: Intensidad de tráfico [veh/h]
- V: Velocidad de circulación [km/h]
- I: Interdistancia entre vehículos en movimiento [km/veh]
- El número de vehículos N presentes en el túnel de longitud L por carril se calcula mediante la siguiente relación:

$$N = \frac{L \cdot D}{V} \qquad \text{Ecuación 2}$$

- Cuando se produce un incendio, se supondrá que el tráfico se bloquea completamente en el instante inicial a una distancia *d* de la boca de entrada del túnel y que la velocidad de formación de la cola de vehículos v se calcula de forma aproximada por la siguiente ecuación:

$$v = \frac{D}{\left(\frac{1}{I(0)} - \frac{D}{V}\right)} \qquad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- *I(0)*: interdistancia entre vehículos.
- Con esta velocidad de formación de cola *v*, la fila de vehículos llegaría hasta la boca de entrada del túnel en un tiempo *T* calculado a través de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{d}{v} \qquad \text{Ecuación 4}$$

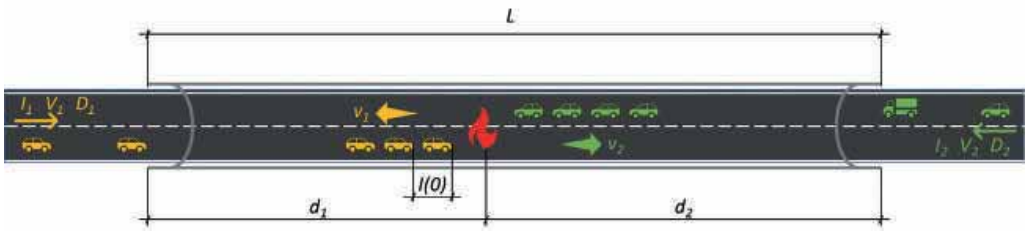


Figura 5. Movimiento de vehículos en el interior del túnel ante un incendio. Elaboración propia

Aparte de estas relaciones típicas de un modelo macroscópico de tráfico, se tiene la posibilidad de incluir criterios opcionales de parada de vehículos valorando la respuesta de los conductores al percatarse de otros usuarios evacuando o de la presencia de elementos de corte de tráfico tanto en el exterior como en el interior del túnel una vez se declare el cierre del túnel. Pero, además, gracias a disponer de los datos con la evolución del movimiento del humo, se pueden combinar con el movimiento de los vehículos incluyendo la posibilidad de que los conductores puedan detenerse en caso de ver el humo avanzando contra ellos.

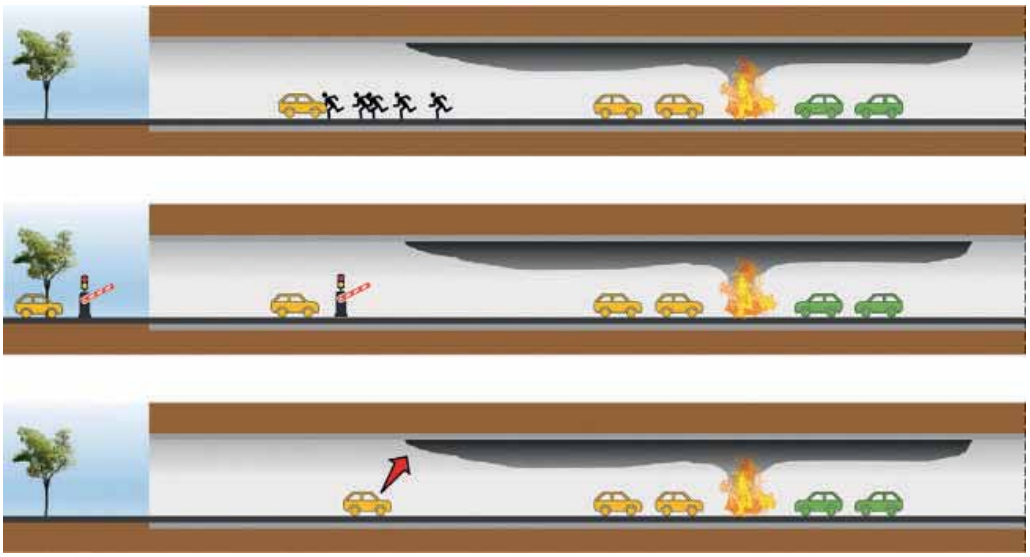


Figura 6. Criterios opcionales de parada. Elaboración propia

4.2.2. Evacuación de usuarios

Para modelar el movimiento de los usuarios que dejan sus vehículos y caminan hacia las salidas de emergencia, se propone un modelo simplificado basado en varios criterios.

En primer lugar, se deben establecer las tasas de ocupación de cada tipo de vehículo para contabilizar las personas afectadas por el incidente. En este sentido, se podría utilizar alguna de las propuestas existentes en las distintas metodologías de ámbito internacional como MARTE (España), el modelo de Países Bajos o el CETU (Francia), pero la herramienta también permite crear manualmente la cola de vehículos incluyendo el tipo y ocupación de cada uno con lo que se podrían realizar análisis de casos muy particulares como un carril bus, por ejemplo.

La Agencia Europea del Medio Ambiente [10] ha estado evaluando la evolución este índice para distintos tipos de vehículos con datos hasta 2008 para varios países.

Cuando un vehículo se detiene, ya sea por llegar a la cola de vehículos parados o por alguno de los otros mo-

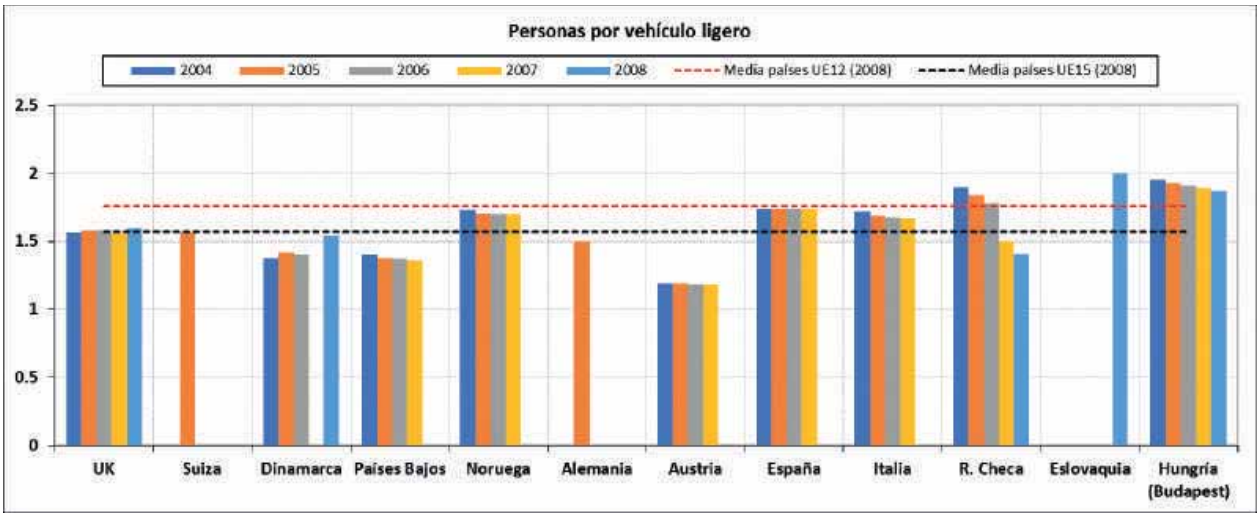


Figura 7. Tasa media de ocupación de vehículos ligeros por países y año. Agencia Europea del Medio Ambiente [10]

tivos mencionados en el apartado anterior, se estima que transcurre un tiempo desde que el vehículo se detiene hasta que todos sus ocupantes abandonan el vehículo llamado tiempo de reacción (también parametrizable) tras el cual los usuarios comienzan su trayecto hacía las bocas del túnel o las salidas de emergencia, si las tuviera.

Además, se puede seleccionar uno de los tres tipos distintos de comportamientos que pueden tener los usuarios a la hora de decidir la dirección de evacuación:

- Siempre hacia la salida de emergencia más cercana
- Siempre en dirección opuesta al incendio
- Hacia la salida de emergencia más cercana si hay buena visibilidad o alejándose del incendio en caso de mala visibilidad.

También se añade una opción para contemplar la posible desorientación de los usuarios en caso de comenzar la evacuación con visibilidad reducida considerando que el 50% de los ocupantes de ese vehículo se desorientarán y evacuarán en dirección contraria al criterio de comportamiento elegido anteriormente.

Por último, también se establecen criterios para la velocidad de la marcha de los usuarios caminando. Son numerosos los estudios presentados en torno a esta materia. En ellos normalmente se relaciona la velocidad de desplazamiento con la visibilidad (Jin y Yamada [11] o Fridolf [12]), pero también se puede relacionar con otros parámetros como la temperatura o la concentración de monóxido de carbono (Truchot [13]).

En este caso, la velocidad de desplazamiento únicamente estará influenciada por las condiciones de visibilidad que tengan los usuarios en cada momento (a 1.8 o 2 m del suelo) y se han tenido en cuenta varios métodos propuestos en distintos estudios o normativas:

- CETU [9]: Para simular el movimiento de los usuarios hacia las salidas de emergencia, el CETU propone los siguientes valores de velocidad en función de la visibilidad.
  - 1 m/s para condiciones de visibilidad clara
  - 0.5 m/s si la visibilidad es muy reducida
  - 0.3 m/s en ausencia de visibilidad
- MARTE [3]: Los valores de velocidad de desplazamiento dependen de los tiempos de desestratificación de los humos para cada tipo de incendio y no de valores de visibilidad en el caso de la metodología española. La velocidad reducida (una vez se produce la desestratificación de la capa de humo) depende, a su vez, del equipamiento que disponga el túnel (entre 0,3 y 0,6 m/s), mientras que la velocidad en condiciones normales toma un valor de 1 m/s.
- Artículo de Fridolf [12]: La propuesta en este artículo es que la velocidad de cada individuo se reduzca linealmente hasta un valor mínimo:
  - Visibilidad mayor de 3 metros: La velocidad es representada por 1 m/s
  - Visibilidad menor o igual a 3 metros: La velocidad es representada con una reducción de 0.34 m/s por metro de visibilidad hasta la velocidad mínima de 0.2 m/s.

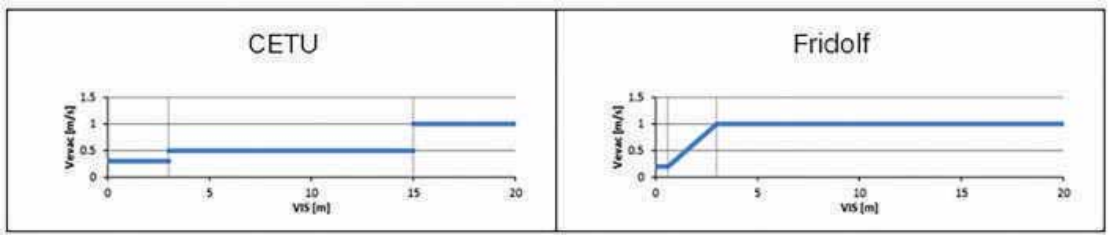


Figura 8. Ejemplos de velocidad de evacuación. Fuentes: izquierda [9] y derecha [12]

4.2.3. Cuantificación del estrés térmico y tóxico de los usuarios

Con el movimiento de los usuarios por el túnel ya definido, solo queda evaluar los efectos que la nube de humo puede producir sobre las personas al moverse por este tipo de ambientes contaminados. Se han considerado dos tipos de efectos que influyen de forma directa en la salud de las personas y que permitirían predecir la contabilización del número de víctimas que se producen durante la evacuación del túnel en caso de incendio. Estos son:

a) Efectos por la exposición a calor

b) Efectos por toxicidad

En esta ocasión se han seguido los estudios y modelos desarrollados por la Society of Fire Protection Engineers (SPFE) en su "Handbook of Fire Protection Engineering" [14], que también se incluyen en otras publicaciones de prestigio como el "Tunnel Fire Dynamics" de Ingason, el manual de usuario del FDS [15] o la norma NFPA 502 [16].

El cálculo de estos efectos, utilizado en esta herramienta, está basado en modelos de predicción del tiempo de incapacitación por exposición a estos efectos y la utilización del concepto de dosis efectiva fraccional o FED, del inglés Fractional Effective Dose, como medida de los contaminantes en el aire absorbidos por un usuario (Purser, David [14]).

A continuación, se dan detalles para cada uno de ellos.

4.2.3.1. Efectos por la exposición a calor

Según se recoge en "Handbook of Fire Protection Engineering" [14], hay tres formas básicas en las que la exposición al calor puede llevar a la incapacitación: a través de la insolación (hipertermia), el dolor y las quemaduras en la piel, o las quemaduras en el tracto respiratorio.

Para situaciones en las que los ocupantes deben pasar por debajo de una capa de humo caliente para poder escapar, el límite de aceptabilidad para la exposición de la piel al calor radiante es de aproximadamente 2,5 kW/m^2, que corresponde aproximadamente a una temperatura de la capa caliente de 200°C. El calor radiante superior a este nivel provoca dolor en la piel seguido de quemaduras en pocos segundos, pero los flujos inferiores pueden tolerarse durante más de 5 minutos.

Por encima de este umbral, el tiempo en segundos hasta la incapacitación debido al calor radiante a un flujo radiante de q_{rad} kW/m^2 viene dado por la siguiente ecuación:

$$t_{I_{rad}} = \frac{K_{rad}}{q_{rad}^{4/3}} \qquad \text{Ecuación 5}$$

Los efectos del calor en la respuesta de un ocupante pueden depender de la situación. El umbral del dolor se produce aproximadamente a cuando K_{rad} está entre 80-100 (kW/m^2)$^{4/3}$ s , las quemaduras de segundo grado a 240-730 (kW/m^2)$^{4/3}$ s y las de tercer grado, a aproximadamente 1000 (kW/m^2)$^{4/3}$ s . Siendo estas últimas las más significativas en la causa de la mortalidad.

En cuanto a la temperatura del aire, y por tanto la del aire respirado y la que está en contacto con otras partes del cuerpo, puede ser relativamente baja, incluso cuando el flujo radiante es alto. Por esta razón, el principal peligro es el dolor y las quemaduras en la piel, más que la hipertermia. Para exposiciones al calor por convección del aire que contiene menos del 10% en volumen de vapor de agua, el tiempo en segundos hasta la incapacitación a una temperatura T (°C) se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$t_{I_{conv}} = K_{conv} \cdot T^{-3.4} \qquad \text{Ecuación 6}$$

Siendo el valor propuesto como dosis fraccional incapacitante, K_{conv} , es de $3 \cdot 10^8$ (°C)$^{3.4}$ s .

Se puede considerar que el cuerpo de una víctima de un incendio adquiere una "dosis" de calor a lo largo de un periodo de tiempo durante la exposición, siendo más incapacitante una exposición corta a un flujo radiante o a una temperatura elevada que una exposición más prolongada a una temperatura o a un flujo inferior. Puede aplicarse, por tanto, un mismo modelo de dosis fraccionales de incapacitación sumando las de calor radiante y convectivo mediante la siguiente ecuación (con q_{rad}>2.5), de tal manera que, cuando se llega a la unidad, el usuario será incapaz de continuar con su evacuación:

$$FED_{heat} = \sum_t \left(\frac{1}{t_{I_{rad}}} + \frac{1}{t_{I_{conv}}} \right) \Delta t = \sum_t \left(\frac{q_{rad}^{4/3}}{1000} + 3 \cdot 10^{-8} T^{3.4} \right) \Delta t \qquad \text{Ecuación 7}$$

De acuerdo con este modelo como ejemplo se presentan los tiempos de tolerancia para distintos valores de calor:

Tabla 1. Tiempos de tolerancia para distintos valores de calor. Fuente [14]

Modo de transferencia de calor	Intensidad	Tiempo de tolerancia
Radiación	<2.5 kW/m^2 2.5 kW/m^2 10 kW/m^2	> 5 min 30 s 4 s
Convección	< 60°C 100% saturado 100°C <10% en vol. de agua 120°C <10% en vol. de agua 140°C <10% en vol. de agua 160°C <10% en vol. de agua 180°C <10% en vol. de agua	> 30 min 12 min 7 min 4 min 2 min 1 min

Aparte de la hipertermia provocada por la exposición a altas temperaturas (calor convectivo), los datos de tolerancia térmica de la piel humana sin protección sugieren un límite de unos 120°C para el calor convectivo, por encima del cual se produce rápidamente un dolor considerable junto con la producción de quemaduras en pocos minutos.

Debido a esto y en vista a los valores de la Tabla 1, se deja la opción de establecen valores límites para temperatura y radiación que resulten en la incapacitación inmediata del usuario.

4.2.3.2. Efectos tóxicos

En una atmósfera de fuego, la incapacitación o la muerte se produce cuando la víctima ha inhalado una determinada dosis de productos tóxicos, entendida esta como el producto de concentración (C) por tiempo de inhalación (t).

Un método práctico ampliamente utilizado es el concepto de dosis efectiva fraccional o FED. El producto *C·t* para pequeños periodos de tiempo durante el incendio se dividen por la dosis de producto *C·t* que causa incapacitación por los productos tóxicos. Estas dosis efectivas fraccionales se suman durante la exposición hasta que la alcanza la unidad, momento en el que se prevé que ocurra la incapacitación o muerte del usuario. Así,

$$FED_{toxic} = \frac{C \cdot t}{Dosis\ efectiva\ causante\ de\ muerte\ o\ incapacitación} \qquad Ecuación\ 8$$

La composición de las atmósferas de los incendios son de tal manera que, para los efectos asfixiantes, el monóxido de carbono (CO) será el producto tóxico más importante, por lo que será el único producto de combustión considerado en el modelo.

La incapacitación por CO depende de una dosis acumulada durante un periodo de tiempo hasta que se alcanza una concentración de carboxihemoglobina, *%COHb*, en la que fallan los mecanismos de compensación y se produce el colapso. La concentración de carboxihemoglobina, a su vez, depende de la actividad que se esté llevando a cabo. Para tiempo t en segundos, concentración de monóxido de carbono C_{CO} en ppm y volumen de aire respirado V en L/min, la concentración de carboxihemoglobina se expresa como una expresión de "dosis" *C·t*:

$$\%COHb = 3.317 \cdot 10^{-5} \cdot (C_{CO})^{1.036} \cdot \frac{V}{60} \cdot t \qquad Ecuación\ 9$$

Dado que la "dosis" *C·t* representa en realidad la concentración de COHb, la dosis fraccional está mejor representada por la relación de la concentración de COHb en el instante t con la concentración de COHb conocida para causar la incapacitación o la muerte ($K_{\%COHb}$). Este valor K_{COHb} asociado a la evacuación de un usuario del túnel de 70 kg que puede suponerse como actividad ligera con una respiración de 25 L/min es de 30 %COHb.

Con estos datos, la dosis fraccional incapacitante para por efectos tóxicos se define como sigue para "Δt" en segundos:

$$FED_{toxic} = \sum_{t} \frac{1.3821 \cdot 10^{-5} \cdot (C_{CO})^{1.036}}{K_{\%COHb}} \Delta t = \sum_{t} \frac{1.3821 \cdot 10^{-5} \cdot (C_{CO})^{1.036}}{30} \Delta t \quad \text{Ecuación 10}$$

En la Figura 9 se representa el tiempo de incapacitación por monóxido de carbono para una persona de 70 kg y diferentes niveles de actividad. La curva B es la seleccionada para la evacuación de túneles.

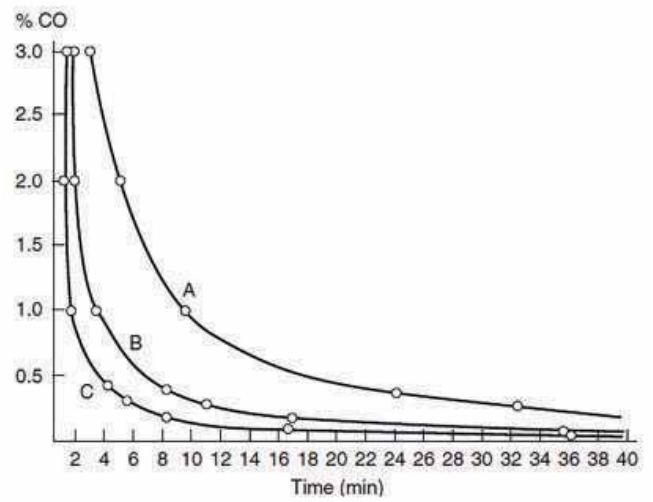


Figura 9. Tiempo de incapacitación por monóxido de carbono para una persona de 70 kg. Curva A, Reposo (sentado): 40 %COHb y 8.5 L/min; Curva B, Trabajo ligero (caminar a 6.4 km/h): 30 %COHb y 25 L/min; Curva C. Trabajo pesado (correr a 8.5 km/h o caminar a 5.6 km/h con una pendiente del 17%): 20 %COHb y 50 L/min. Fuente: [14]

De igual manera que se proponía con los efectos térmicos, se da la opción de establecer un valor límite para la concentración de CO que resulte en la incapacitación inmediata del usuario.

4.3. Estructura de la herramienta

La estructura y el procedimiento de uso de PESTO se puede plantear en tres partes:

- Entrada de datos
- Cálculo
- Resultados: En forma de resumen, con información individualizada y distintas representaciones gráficas

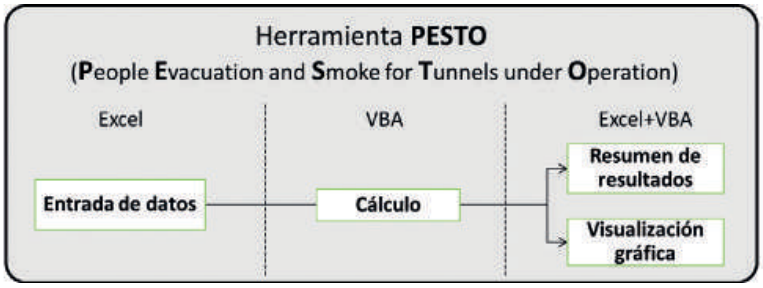


Figura 10. Estructura de la herramienta PESTO

4.3.1. Entrada de datos y carga de resultados de una simulación

Como ya se ha comentado, para el desarrollo de la herramienta se ha optado por una solución con Excel y VBA porque no era necesaria la creación de una interfaz de usuario. En la primera pantalla se presenta un panel de entrada de todos los datos necesarios para la elaboración de un análisis combinado de humos y autoevacuación.

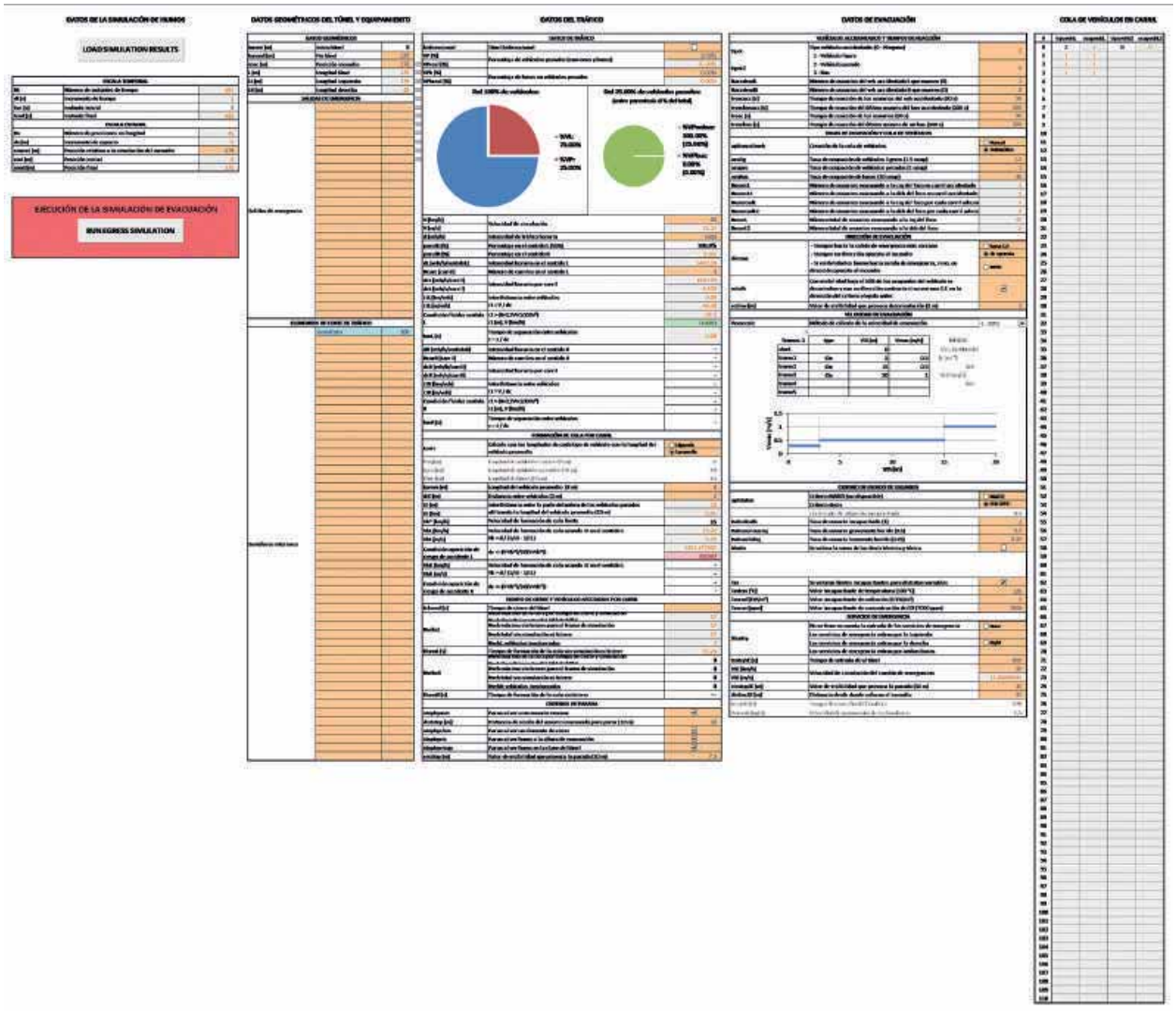


Figura 11. Vista del panel de entrada de datos divididos en módulos. Elaboración propia

Este panel está divido en varios módulos que facilitan el proceso de caracterización del caso de estudio, en un proceso a realizar de izquierda a derecha hasta completar los datos necesarios basados en criterios de diseño y normativa aplicada.

Lo primero es cargar los resultados de la simulación de humo que previamente han de ser preparados para ser importados en esta herramienta, incluyendo visibilidad y temperatura en la clave del túnel y a la altura de evacuación, y radiación y concentración de monóxido de carbono a la altura de evacuación.

Después se introducen los parámetros que caracterizan el túnel geométricamente (longitud y posición del incendio), así como la posición de las salidas de emergencia y los elementos de corte del tráfico, si los hubiera.

Se continúa con los datos de tráfico, para distinguir entre túnel unidireccional o bidireccional, la definición del mix de tráfico que soporta y pudiendo dar diferentes valores de las variables macroscópicas a cada sentido de circulación. Como se avanzó previamente, en este módulo se incluyen las distintas opciones para incorporar otros criterios de parada de los vehículos: Tiempo de cierre del túnel, al ver a un usuario evacuar, al ver humo o al ver un elemento de corte de tráfico interior (semáforo o barrera), si los hubiera.

Por último, es necesaria la definición de los parámetros relacionados con la autoevacuación de los usuarios como los tiempos de reacción, hacia dónde se dirigen los usuarios al salir de los vehículos, y elegir cómo afectan las condiciones ambientales en la velocidad a la que se desplazan y cómo se determina si consiguen completar la evacuación o no. Con esta información se muestra la cola de vehículos que se genera automáticamente dando el tipo de vehículo y su ocupación, aunque también se da la opción de crearla de manera manual.

4.3.2. Cálculo

Con la introducción de datos terminada, se procede con el cálculo de las trayectorias de autoevacuación de todos los usuarios involucrados en el incidente a través de las macros programadas en VBA. Este cálculo tiene una duración de unos pocos minutos y varía en función de la longitud del túnel y del tamaño de datos a procesar proveniente de la simulación de incendio.

4.3.3. Visualización de resultados

Al finalizar el cálculo, se presenta una hoja con un resumen de los resultados (Figura 12), indicando el número de usuarios que consiguen completar la evacuación, ya sea sin secuelas o con lesiones, y los que no, y un gráfico circular con los porcentajes de según el estado de los usuarios al finalizar su autoevacuación.

Además, se puede acceder a la toda la información de la trayectoria de autoevacuación de cada usuario:

- Vehículo en el que viaja
- Tiempos de evacuación
- Duración de la exposición
- Distancia recorrida
- Valores de temperatura, radiación y concentración de CO en el último instante de la autoevacuación
- Valor de las dosis efectivas fraccionales de calor y toxicidad en el último instante de la autoevacuación
- Estado del usuario
- Gráficas espacio-tiempo con la trayectoria de autoevacuación de los usuarios seleccionados mostrando la posición del incendio y las salidas de emergencia
- Gráficas de evolución temporal de las FED de los usuarios seleccionados durante el tiempo de exposición

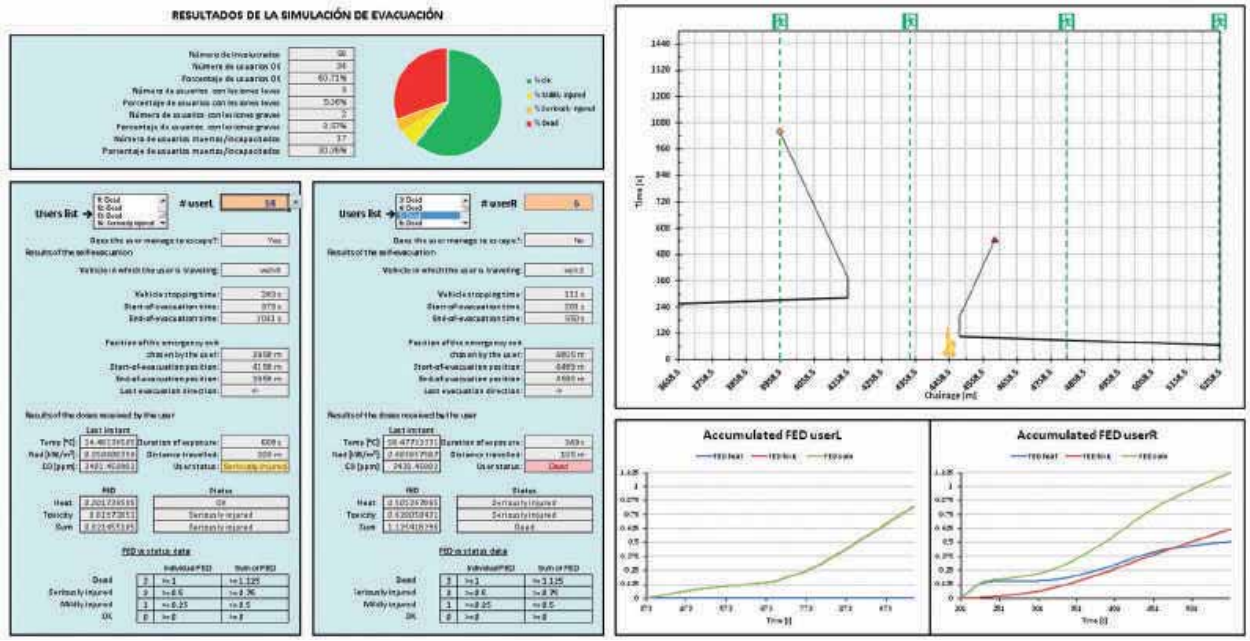


Figura 12. Panel de resultados de la simulación combinada. Elaboración propia.

Por último, en una nueva hoja de la herramienta, se puede visualizar de manera conjunta las trayectorias de autoevacuación de todos los usuarios en conjunto con cada una de las variables exportadas de las simulaciones de incendio (Figura 13): visibilidad, coeficiente de extinción, temperatura, radiación o concentración monóxido de carbono.

En este gráfico se consigue mostrar de una vez:

- Posición en el túnel en abscisas y tiempo en ordenadas
- Resultados de la simulación de incendio en el fondo y su escala de colores
- Salidas de emergencia representada con una línea blanca y verde y un icono de salida de emergencia en la parte superior
- Trayectoria de vehículos
- Trayectorias de autoevacuación de los usuarios
- Estado de los usuarios cuando terminan la evacuación mediante un marcador de distinta forma y color según su estado

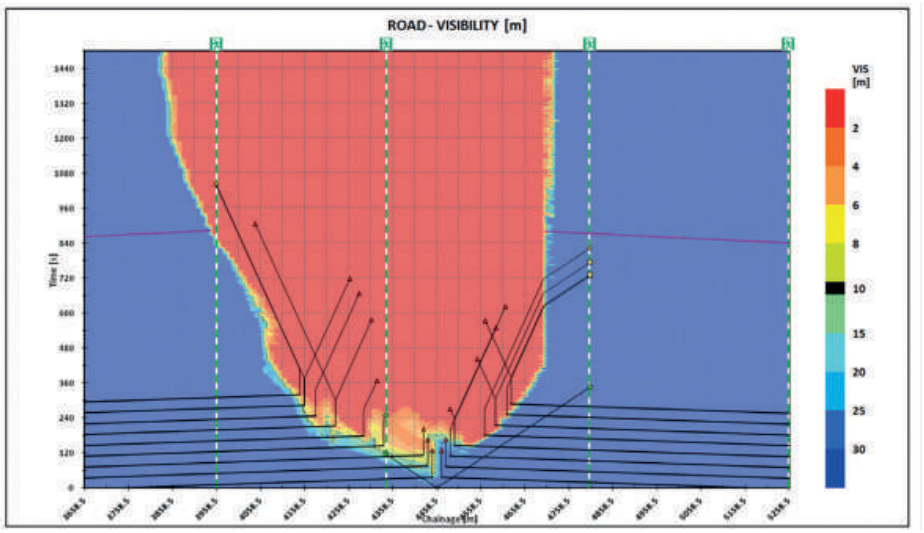


Figura 13. Ejemplo de gráfico final con las trayectorias de autoevacuación de todos los usuarios del túnel comparándolas con los resultados de visibilidad obtenidos en la simulación de incendio tridimensional. Elaboración propia

5. EJEMPLOS

El desarrollo de la herramienta PESTO siempre ha tenido el objetivo claro de poder generar este tipo de análisis combinados de una manera rápida y sencilla y, de esta manera, ser capaz de obtener análisis comparativos ante distintos escenarios motivados por aplicación de distintas normativas y/o criterios.

En este sentido se exponen a continuación un par de ejemplos mostrando la diferencia en los resultados al cambiar el criterio de parada de los vehículos y utilizando distintas leyes de velocidad de desplazamiento de usuarios en función de la visibilidad.

5.1. Ejemplo 1: Criterios de parada de los vehículos

En este primer ejemplo se evalúa la diferencia de considerar o no que los vehículos se detienen al ver humo desplazándose por la clave del túnel.

Como se ha visto en el apartado 4.2.1, ya que el humo se desplaza por la clave, parece razonable pensar que en cuanto un vehículo llegue a la posición de la nube de humo, será suficiente motivo para que el conductor se alerte del desarrollo de un incendio más adelante y detenga su vehículo y para comenzar posteriormente su autoevacuación. En caso contrario, los vehículos continuarán su marcha hasta llegar a la cola de vehículos con lo que las condiciones ambientales serán mucho peores.

Las diferencias se presentan a continuación en un caso de un incendio de 100 MW mostrando las trayectorias de autoevacuación junto con gráficos de visibilidad a la altura de evacuación (1.8 m de altura) y visibilidad en la clave del túnel. En estas figuras se puede ver cómo el avance del humo por el techo del túnel es más rápido, sobre todo, para los vehículos que llegan al incendio por la parte izquierda.

En la siguiente tabla a la izquierda se presentan los gráficos de trayectorias de evacuación sin considerar el criterio de parada de los vehículos al ver el humo, dando lugar a numerosas víctimas de los usuarios que llegan por la parte izquierda del túnel. Mientras que, en la parte derecha de la tabla, como los vehículos paran al ver humo en la clave las condiciones ambientales son mucho mejores y no se producen víctimas.

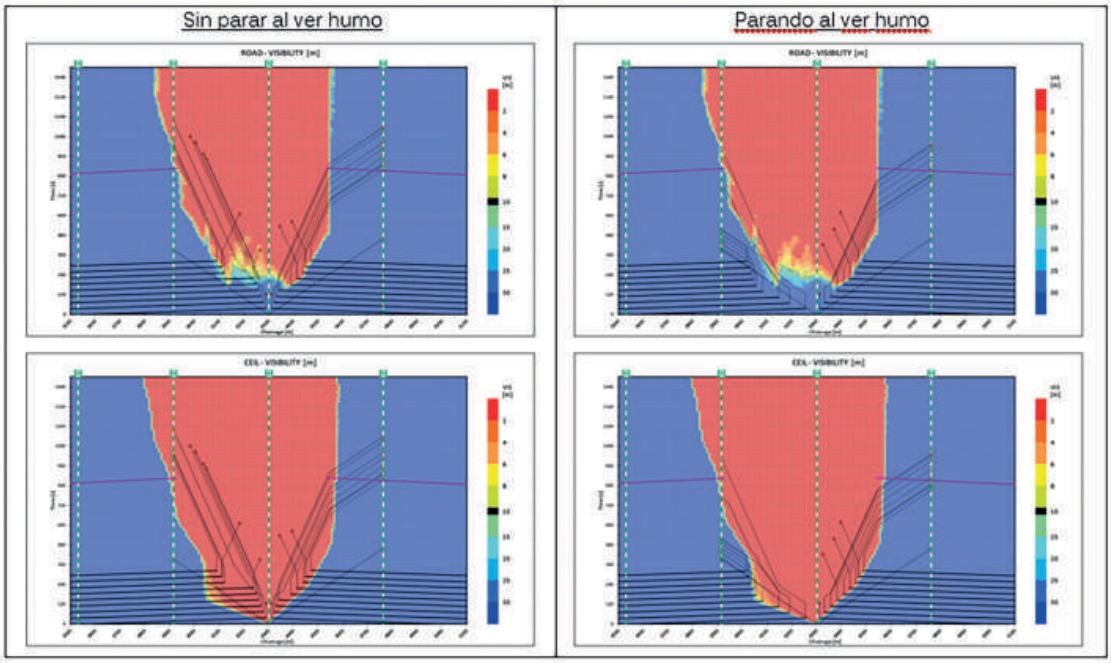


Figura 14. Gráficos de trayectorias de evacuación con distintos criterios de parada de vehículos. Arriba se comparan con la visibilidad a la altura de evacuación; debajo, con la visibilidad en la clave del túnel. Elaboración propia

5.2. Ejemplo 2: Leyes de velocidad de desplazamiento de usuarios

Otro de los análisis que pueden hacerse de manera rápida es considerar distintas leyes de comportamiento de los usuarios a la hora de considerar la velocidad de desplazamiento durante su autoevacuación.

Como ejemplo, a continuación, se muestran las diferencias entre la ley del CETU [9] (arriba) y del artículo de Fridolf [12] (debajo) presentadas en el apartado 4.2.2:

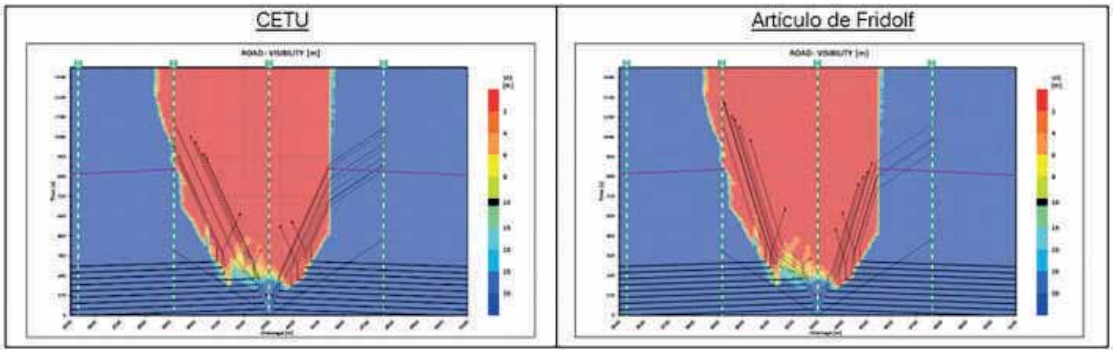


Figura 15. Trayectorias de autoevacuación para distintas leyes de velocidad de desplazamiento. Arriba, con el criterio del CETU. Abajo, según la ley del artículo de Fridolf. Elaboración propia

6. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

PESTO es una herramienta muy versátil que funciona para múltiples configuraciones de túnel capaz de comprobar de manera rápida los impactos sobre los usuarios del túnel de distintos criterios de diseño, hipótesis o los requerimientos de distintas normativas, proporcionando una visualización de resultados limpia y sencilla de interpretar.

Entre las próximas características a desarrollar se encuentran:

- Selección de varios idiomas
- Aumentar la complejidad del modelo de cuantificación del estrés tóxico de los usuarios: incluir los efectos de hipoxia por falta de oxígeno y de hiperventilación inducida por el CO_2.
- Implementación de la metodología MARTE una vez finalizada su revisión
- Mayor desarrollo de la parte gráfica con nuevos tipos de gráficos

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Parlamento Europeo, «Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras.,» 2004.

[2] Comité técnico PIARC C3.3 Explotación de túneles de carretera, «Análisis de riesgo para túneles de carretera,» 2012.

[3] Ministerio de Fomento, «Metodología de Análisis de Riesgo en Túneles de la Red de Carreteras del Estado,» 2012.

[4] Ministerio de Fomento, «Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado,» 2006.

[5] Centre d'Études des Tunnels, "CAMATT software," 2021. [Online]. Available: https://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/new-release-of-camatt-software-a759.html.

[6] EQUA, "IDA Tunnel," [Online]. Available: https://www.equa.se/en/tunnel/ida-tunnel/overview.

[7] National Institute of Standards and Technology, "FDS and Smokeview," [Online]. Available: https://www.nist.gov/services-resources/software/fds-and-smokeview.

[8] PIARC, "Manual de túneles de carretera: Autoevacuación," [Online]. Available: https://tunnelsmanual.piarc.org/es/seguridad-medidas-de-seguridad/auto-evacuacion. [Accessed 2022].

[9] Centre d'Études des Tunnels, «Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers. Fascicule 4: Les études spécifiques des dangers (ESD),» 2003.

[10] Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA), "Tasas de ocupación de vehículos (Indicador de especificación TERM29)," 06 Agosto 2015. [Online]. Available: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/term29-occupancy-rates-in-passenger-transport-1.

[11] T. Jin y T. Yamada, «Irritating effects of fire smoke on visibility,» 1985.

[12] K. Fridolf, «Walking speed in smoke: representation in life safety verifications,» 2018.

[13] B. Truchot, C. Willmann y J. Guivarch, «People evacuation in tunnel fires: a cross evaluation of two methodologies,» 2004.

[14] Society of Fire Protection Engineers, "Handbook of Fire Protection Engineering. Section Two: Fire Dynamics," 2015.

[15] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott y M. Vanella, Fire Dynamics Simulator Users Guide, Sixth Edition, Special Publication (NIST SP 1019), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.

[16] National Fire Protection Association, «NFPA 502. Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other limited Access Highways,» 2020.

AN ANALYSIS OF ROAD ACCIDENT MODELS BASED ON TUNNEL LENGTHS AND ACCIDENT VARIABLES

Antonella Pireddu
Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro
(Italian National Institute for Insurance against Accidents at Work)
Silvia Bruzzone
Istituto Nazionale di Statistica
(Italian National Institute of Statistics)

During the period 2018-2020, the Italian National Institute of Statistics recorded 1,885 road accidents with 2,999 injuries and 60 deaths in Italian road tunnels. As was to be assumed, the frequency of accidents was lower than that observed on open roads. However, the ratio between the number of injuries and deaths and the number of road accidents in tunnels was higher. In Italy road tunnels, which extend for about 2,600 km, are distributed throughout the country. The class of tunnels up to 500 m is the most extensive with over 8,300 units, while there are about 750 tunnels from 500 to 1,000 m in length. The remaining classes are fewer.

For the period 2018-2020, we conducted a national investigation of road accidents in Italian tunnels. The aim was to observe how different types of vehicles are involved in road accidents in tunnels through a predictive model. We analysed the type of accident, the circumstances, the type of road, the carriageway, the type of vehicle involved, the time of the accident, the purpose of the journey (if related to work) and the length of the tunnel. Using recursive partitioning and the regression tree (rpart), we found the descriptive nodes of the long and short tunnel accident models. By selecting the "vehicle type" as the "target" variable, the algorithm determined the best variable to predict the type of vehicle involved in the accident. In the case of short tunnels, the best predictive variable was the "type of road" while for long tunnels, the "purpose of the journey". Prediction or classification trees showed some differences between long and short tunnel accident models. The study provides a methodological reference for all those involved in road safety assessment and risk management in a specific context.

UN ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE ACCIDENTES DE TRÁFICO BASADO EN LAS LONGITUDES DE LOS TÚNELES Y LAS VARIABLES DE LOS ACCIDENTES

En el período 2018-2020, el Instituto Nacional de Estadística Italiano registró 1.885 accidentes de tráfico con 2.999 heridos y 60 muertos en los túneles de carretera italianos. Como era de suponer, la frecuencia de los accidentes fue inferior a la observada en las carreteras abiertas. Sin embargo, la proporción entre el número de heridos el número de accidentes de tráfico en los túneles fue mayor. En Italia, los túneles de carretera, que se extienden a lo largo de unos 2.600 km, se distribuyen por todo el país. La clase de túneles de hasta 500 m es la más extensa con más de 8.300 unidades, mientras que hay alrededor de 750 túneles de 500 a 1.000 m de longitud. Las clases restantes son menos numerosas.

Hemos realizado un estudio nacional sobre los accidentes de tráfico ocurridos en los túneles italianos en el período 2018-2020. El objetivo era observar el tipo de vehículo implicado a través de un modelo predictivo. Analizamos el tipo de accidente, las circunstancias, el tipo de carretera, la calzada, el tipo de vehículo, la hora del accidente, el propósito del viaje (relacionado o no con el trabajo) y la longitud del túnel. Utilizando el particionado recursivo y el árbol de regresión (rpart), encontramos los nodos descriptivos de los modelos aplicables a los túneles de carretera largos y cortos. Al seleccionar el "tipo de vehículo" como variable "objetivo", el algoritmo proporcionó, como la mejor variable predictiva del tipo de vehículo implicado, el "tipo de carretera" para túneles cortos y el "propósito del viaje" para túneles largos. El estudio puso de manifiesto las diferencias entre los modelos de accidente de tràfico en los túneles largos y cortos, que pueden ser útiles para todos los implicados en la evaluación de la seguridad vial y la gestión de riesgos.

UNE ANALYSE DES MODÈLES D'ACCIDENTS DE LA ROUTE BASÉS SUR LES LONGUEURS DE TUNNEL ET LES VARIABLES D'ACCIDENT

Durant la période 2018-2020, l'Institut National de Statistique Italien a enregistré 1.885 accidents de la route avec 2.999 blessés et 60 morts dans les tunnels routiers italiens. Comme prévu, la fréquence des accidents de la route a été inférieure à celle observée sur les routes ouvertes. Toutefois, le rapport entre les blessures et les accidents de tunnel routier était plus élevé. En Italie, environ 2.600 kilomètres de tunnels routiers sont situés à travers le pays. La classe de tunnels jusqu'à 500 m est la plus étendue avec plus de 8.300 unités, tandis qu'il y a environ 750 tunnels de 500 à 1.000 m de long. Les classes restantes sont moins nombreuses. Nous avons réalisé une étude nationale sur les collisions sur les tunnels routiers italiens de 2018 à 2020. L'objectif était d'observer l'implication de différents types de véhicules dans les accidents dans les tunnels à travers un modèle prédictif. Nous avons analysé le type d'accident, les circonstances, le type de route, la chaussée, le type de véhicule impliqué, l'heure de l'accident, le but du voyage (si lié au travail) et la longueur du tunnel. En utilisant le partitionnement récursif et l'arbre de régression (rpart), nous avons trouvé les nœuds descriptifs des modèles liés aux tunnels routiers longs et courts. En sélectionnant le "type de véhicule" comme variable "cible", l'algorithme a déterminé la meilleure variable pour prédire le type de véhicule impliqué dans l'accident. Dans le cas des tunnels courts, la meilleure variable prédictive était le "type de route" tandis que pour les longs tunnels, le "but du voyage". L'étude a révélé de différences entre les accidents des deux types de tunnels. Il a également fourni une référence méthodologique à tous ceux qui participent au développement de modèles d'accidents, à l'analyse des causes des accidents et à la gestion des risques.

1. INTRODUCTION

The use of tunnels belonging to national networks is a common situation in Italy, more than in other countries, because of the presence of important mountain chains such as the Alps in the frontier regions and the Apennines that divide the territory longitudinally. In fact, in Italy, the tunnels cover about 2,600 km and spread all over the country.

During the period 2018-2020, the Italian National Institute of Statistics recorded 463,034 road accidents, 643,551 injuries and 8,902 fatalities on Italian roads. Accident data provide essential information for road safety (Hollò et al., 2010). A road accident occurs when two or more vehicles collide or when a vehicle hits a pedestrian, an animal or an object such as a tunnel wall, traffic sign, etc. (single vehicle accident). Amundsen et al. carried out a series of tunnel traffic accident analyses on Norwegian road tunnels from 1994 to 2009. They observed that the risk of accidents in tunnels was lower than on open roads, but that the severity of accidents was much higher. In general, the frequency of tunnel accidents is lower than on straight sections, curves, roundabouts and intersections. However, we found the highest injury-to-accident ratio among tunnel sections. Tunnel length and confinement are important factors in this respect. Accidents may develop fire which could produce severe consequences for human life and significant costs, as confinement results in longer persistence and higher temperatures, toxic gases, and overpressure with respect to open air (Bubbico et al. 2007). Most tunnel fires and smoke without fire are caused by vehicle accidents and not by technical problems (Nævestad, S. Meyer, 2014). Similarly, in the event of a road accident in the tunnels, queuing vehicles can delay the rescue of injured persons.

Between 2018 and 2020, there were 2,999 injuries, 60 fatalities and 1,885 accidents in Italian road tunnels. Accidents in Italian road tunnels increased during the period 2013-2017 (Pireddu and Bruzzone, 2019) while in the three-year period 2018-2020 there was a consistent trend. In 2020, as a result of traffic restrictions related to the Covid 19 pandemic lockdown, there was a general shift in road accidents that also impacted tunnels. With regard to the length, recent studies have shown a higher absolute and relative frequency of road accidents and injuries in the shortest tunnels. (Pireddu and Bruzzone, 2021). Problems in accessing and using geolocation technologies in tunnels have sometimes made empirical research impossible because of unavailable or incomplete data. Recent studies have analysed data on tunnel collisions causing death or injury in Italy over the five-year period 2013-2017 and 2018. A descriptive and multivariate analysis applied to this data revealed the relationship between the type of tunnel and the collision parameters. The frequency was higher in the shorter tunnels and negatively related to the length (Pireddu and Bruzzone, 2021). Further studies integrating the archives of Inail (information on workers) and Istat (information on road accidents) have provided adequate data for the open air accidents, but insufficient data for tunnels. The most reliable source for our nationwide study was therefore the Istat databases. Considering this source of data, our study aimed to develop a model to predict the involvement of different vehicle types (the target or dependent variable) in road tunnel accidents. The objective was also to investigate the relationship between the type of vehicle involved in the accident and the other variables. In this way, we propose a methodological reference for all those who develop models and analyse the variables of road tunnel accidents and risk.

2. DATA SOURCE

Statistical information on road accidents is produced by the Italian National Institute of Statistics - Istat based on a survey of all road accidents occurring in Italy: the "Survey on road accidents resulting in death or injury". The field of observation of the survey includes all road accidents involving deaths within 30 days or injuries that occur throughout the country over a one-year period and recorded by a police authority. Detection refers to the time which the accident occurred. Istat provides data on all reported road accidents involving at least one vehicle on the roads in Italy (Istat data warehouse I. Stat. 2018, 2020). The data considered, for the purposes of this paper, as defined by national standards, are those that occur in pu-

blic roads and where "at least one vehicle is involved and where at least one injured person is recorded" (Vienna Convention on Road Traffic, 1968). Therefore, accidents without injuries, or that did not occur on public roads, or without vehicles involved, or without police reports were excluded (Gariazzo et al., 2019). The Istat dataset contains information about the vehicle, the time of the accident, the journey purpose (work-related or not work-related), the accident circumstances. It also includes geographical coordinates, road type, fatalities and injuries. The study missed variables such as the characteristics of road sections, the alignment of tunnels and vehicle traffic.

This investigation was focused on 1,885 records, regarding 1,885 collisions involving 2,299 injuries and 60 deaths that occurred over 2018–2020 in Italian road tunnels. For the purpose of this study, the Istat accident variables used were: accident circumstances (not keeping distances between vehicles, distraction, normal driving, speeding, unspecified and other circumstances, corresponding to driver behaviour recorded when the accident occurred); accident type (rear-end; impact or collision with other vehicles; pedestrians or obstacles, skidding or off-road etc.); carriageway (one way lane, two way lanes, two carriageways, more than two carriageways); consequence (accident with at least one fatality, accident with at least one injured person and no fatality); journey purpose (in route to/from work or driving on duty, not work-related); pedestrian (accident not involving pedestrian, accident involving at least one pedestrian); road tunnel type (motorway, rural road, urban road); time of accident occurrence (defined according to a conventional interval); vehicle type (car, truck and special vehicle, motorcycle, other vehicle etc.). These variables, better described in Table 1, are based on Istat and European encoding (European Commission CARE 2016).

3. METHODS

First, as a result of geo-processing (Cima et al., 2014; Costabile et al., 2012), the Istat dataset was completed with the length of the tunnel involved in the collision. The 1.3 version of the Rstudio and the 3.18.3 version of the Quantum Gis (geographic information system) were used. Based on the results of descriptive analysis, tunnels were grouped into three classes: up to 500 metres in length, over 500 metres in length (Directive 2004/54/EC) and underpasses, more suitable for exploration and classification of accident data. The Istat accident dataset was divided in the same three classes (accident data without coordinates or geographical references resulted "unclassified") and 10 accident parameters (Table 1) and the frequency were then determined and (Appendix A).

For dataset classification, we used the recursive partitioning and regression tree (Breiman et al., 1984). In developing the rpart method, the following two subsets of the Istat dataset were used: accidents in short tunnels and underpasses and accidents in long tunnels. This method is a powerful "machine learning" that provides a prediction algorithm (probability) defined by a mathematical model. The advantage of this nonparametric method in "R" is that the result is relatively easy to understand and interpret. In order to explain the involvement of different types of vehicles in tunnel accidents, we used the Istat dataset of road accidents, referring to 2018-2020. The variables considered relevant for the model definition have been aggregated according to the criteria in Table 1.

Table 1 – Attributes and labels resulting from the Istat accident dataset and geo-processing. Accident model. Italy. Years 2018 – 2020

Attribute (variable)	Labels [1]
Accident circumstances	distance (not keeping distance between vehicles); distraction; normal driving; speeding; other_circ (unspecified and other circumstances); corresponding to driver behaviour recorded when the accident occurred (Amundsen et al., 2000; Pireddu et Bruzzone, 2021).
Accident type	rear-end; collision, impact (impact with other vehicles, frontal or lateral collisions); other (pedestrians or obstacles, skidding or off-road etc.).
Carriageway	1 (one-way lane); 2 (two-way lanes); 3 (two carriageways); 4 (more than two carriageways).
Consequence	Death (accidents with one or more fatalities); Injury (accidents with one or more injuries and no fatalities).
Journey purpose	work-related 1 (driving for duty); work-related 2 (as part of commuting); not work-related (journey purpose not work-related). The journey purpose resulted often not filled due to the difficulty of recording this information at the scene of the accident.
Pedestrian	0 (accident not involving pedestrian); 1 (accident involving at least one pedestrian).
Road tunnel location (road type)	motorway (road inside or outside urban areas, reserved to certain categories of vehicles); rural (road outside urban areas and not motorway); urban (road in urban areas and not motorway).
Time of accident occurrence	morning (06h-12h); afternoon (13h-18h); evening (19h-21h); night (22h-05h); defined according to a conventional interval.
Tunnel length (class)	short tunnel (up to 500 m in length or "0-500"); long tunnel (over 500 m in length or ">500"); underpass; unclassified (when the tunnel length were not available).
Vehicle type	car; truck, special vehicle (heavy goods vehicle); motorcycle; otherV (other vehicle); bicycle, scooter; (bicycle, electric bicycle and scooter).

Source: Authors' processing on Istat data - Survey on road accidents resulting in death or injury. R studio

Selecting the "vehicle type" as the target variable, the rpart algorithm determined the best variable (root node) useful for predicting the type of vehicle involved in the accident. The Istat variables and the relevant labels used in the recursive partitioning and regression tree are reported in Table 1. By splitting the original dataset into a training set and a test set and choose "class" as algorithm to be used in the model, the target variable (vehicle type) has been linked to the other variables. By the subset used to train the machine to predict a given observation, the predictive variables were then divided into several simple areas. The prediction derived from the mean of the observations in the area where the observation falls.

The "root node" divided the short and long tunnels datasets to the best extent possible while the remaining nodes classify the data in the tree model. For each complexity parameter (cp), the error rate calculated from cross-validation represented the average of the error rates calculated on the whole dataset. This was useful to redistribute the error ratio and evaluate the model's performance. The "confusion matrix " has provided indicators for the assessment of model reliability: "accuracy", "sensitivity", "specificity" and "balanced accuracy".

[1] These classes are based on Istat and European coding (European Commission CARE 2016)

The first measure of how often the model was correct in the prediction of the positive class, sensitivity measures the true positive rate. Balanced accuracy was especially helpful for our study as classes were not balanced (one class appears much more than others). When accuracy, sensitivity and balanced accuracy are close to 1, the model can better classify or predict the observations.

4. RESULTS

4.1 The Italian tunnel road network

In Italy, tunnels and underpasses cover the whole territory: 907 km in the North West , 488 km in the North East , 410 km in the Centre , 527 km in the South and 268 km in the Islands (Authors' processing on OpenStreetMap data). The class of tunnels up to 500 m is the largest with more than 8,300 units, whereas there are about 750 tunnels of 500 to 1,000 m in length. The other classes are less numerous and go from about 300 (1,000-1,500m) to 30 (3,000-3,500m). The type of tunnel considered in our study represents the totality divided by short tunnels (up to 500 metres in length), long tunnels (over 500 metres), underpasses and unclassified tunnels.

Therefore, as represented in Figure 1, the 1,885 accidents occurred in Italian road tunnels between 2018 and 2020 include 693 short tunnel accidents, 680 long tunnel accidents, 272 underpasses and 240 tunnel accidents unclassified. Based on Istat accident data set, during the 2018-2020, missing geographic coordinates account for 13% of the tunnel road accident dataset (1,885 cases) while for open sections, the same percentage represents 10% of the open road accident dataset (461,149 cases).

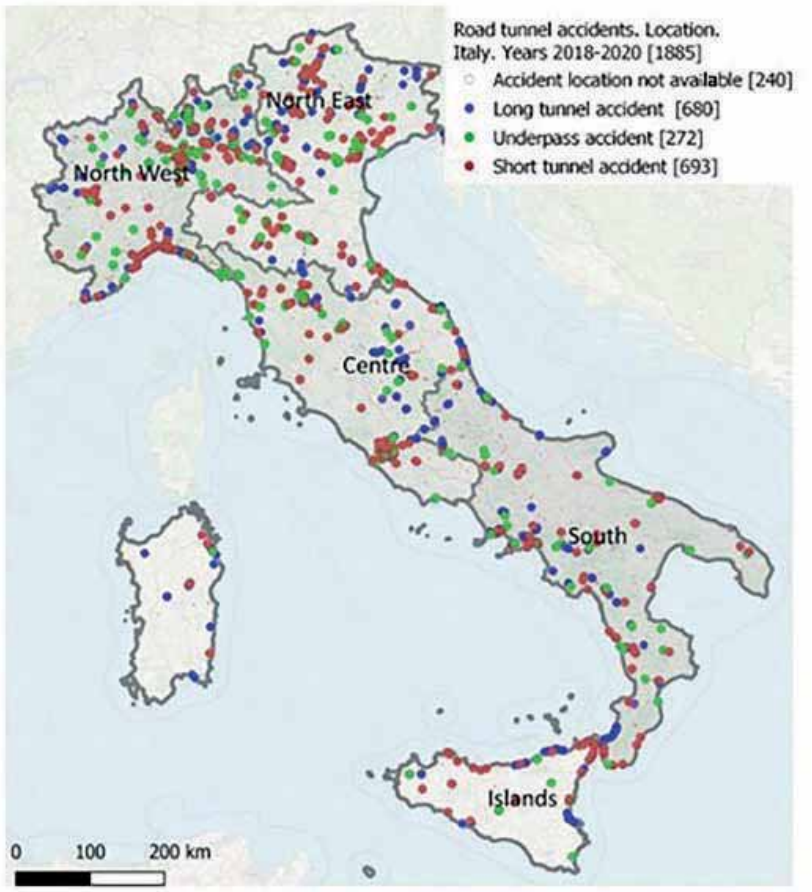


Figure 1 – Location of tunnel road accidents by classes. Italy - Years 2018-2020

Source: Authors' processing on Istat and OpenStreetMap data - Survey on road accidents resulting in death or injury, Quantum Gis (QGIS)

According to Pireddu et Bruzzone, road tunnel accidents increased in the period 2013-2017 in Italy while in the period 2018-2020 we observed a constant trend. In 2020, due to traffic restrictions associated with the COVID-2 pandemic, we saw a general shift in road accidents also affecting tunnels (Table 2).

Table 2 – Accident frequency by class and year. Italy. Years 2018–2020

Class	2018	2019	2020	Total
0-500	306	206	181	693
>500	265	263	152	680
underpasses	28	140	104	272
unclassified	117	107	16	240
Total	**716**	**716**	**453**	**1885**

Source: Authors' processing on Istat and OpenStreetMap data - Survey on road accidents resulting in death or injury. R studio

Once analysed attributes and classes (Appendix A) we provided the "randomisation" of the tunnel accident datasets for short, long tunnel and underpasses (Table 3).

4.2 A road tunnel accident model

In developing the rpart method, the following two subsets of the Istat dataset were used: accidents in short tunnels and underpasses (965 records) and accidents in long tunnels (650 records). Thus, the two models provided by rpart are based on 965 accidents occurring in short tunnels (including underpasses) and 650 in long tunnels.

4.2.1 Accident Model Development – The train dataset

The rpart algorithm used to build the short and long tunnel models was [formula = VEHICLE_TYPE ~ ROAD_TYPE + CIRCUMSTANCE + JOURNEY_PURPOSE + TIME_OF_ACCIDENT + ACCIDENT_TYPE + TUNNEL_TYPE + CARRIAGEWAY, data = train, method = "class", minsplit = 50, minbucket = 8, cp = 0.01].

We informed the program that the parameters for "pruning" the tree and reducing its complexity were minisplit"[2] = 50 and "minibucket"[3] = 8. A training dataset containing 90% or 95% of the original dataset provided variables (nodes and root nodes) contributing to the development of the accident models.

[2] Minisplit is a parameter of tree control that express the minimum number of observations that must exist in a node in order for a split to be attempted

[3] Minibucket is a parameter of tree control that express the minimum number of observations in any terminal "leaf" node.

Table 3 – Attributes and classes resulting from accident dataset randomisation. Short and long tunnels, underpasses. Italy. Years 2018–2020

Attribute (variable)		**Tunnel by length (m)**		**Underpasses**
	Classes	***0-500 (%)***	***>500 (%)***	***underpasses (%)***
Road type	motorway	29	46	10
	rural road	26	41	30
	urban road	45	13	60
Carriageway	1	36	49	28
	2	42	28	54
	3	20	23	16
	4	2	0	2
Vehicle type	bicycle, scooter	7	1	6
	car	66	73	65
	motorcycle	15	10	16
	other vehicle	2	4	3
	truck, special vehicle	10	12	10
Circumstance	distance	14	17	12
	distraction	16	14	16
	normal driving	20	22	24
	other circumstance	35	33	36
	speeding	15	14	12
Time of accident	afternoon	41	39	46
	evening	8	11	15
	morning	38	37	31
	night	13	13	8
Accident type	collision, impact	43	42	45
	rear-end	37	37	35
	other	20	21	20
Consequences	dead	2	4	3
	injured	98	96	97
Journey purpose	not work-related	94	95	96
	work-related 1	2	2	2
	work-related 2	4	3	2

Source: Authors' processing on Istat and OpenStreetMap data - Survey on road accidents resulting in death or injury. R studio

Table 4 – Nodes (variables) of tree model for type of tunnel. Target variable: type of vehicle affected. Training sets 95% and 90% of the original dataset. Italy. Years 2018–2020

Class	Nodes (Importance of variables %)						
	road type	circumstance	journey purpose	time of accident	accident type	tunnel type	carriageway
0-500 and underpasses	32	35	11	7	7	4	4
>500	-	-	100	-		-	-

Source: Authors' processing on Istat data - Survey on road accidents resulting in death or injury. R studio.

4.2.2 Model Development – Graphical Representation

For short tunnels (underpasses included) the variables included in the tree resulted: "road type" (root node), "circumstance", "journey purpose", "accident type" and "time of accident" (Table 4). The terminal nodes (leaf) resulted from the model were thus: cars, motorcycles, truck or special vehicles. The leaf nodes unused in the tree were: bicycles, electric bicycle and scooters as well as other vehicles. By assuming 0.01 as the cp (complexity parameter), the algorithm keeps separating trees until the percentage of variance explained is less than 0.01. By the cross-validation, the best estimate of the tree error rate was calculated over all data. Therefore, for shorter tunnels the nodes "pruned" from the tree were "tunnel type" and "carriageway" and the final model included only 5 nodes (Figure 2 and Table 5). The tree structure gives a predictive rule for each terminal node. The maximum predictive purity is found in the terminal nodes because, proceeding toward them, the classes assume greater homogeneity.

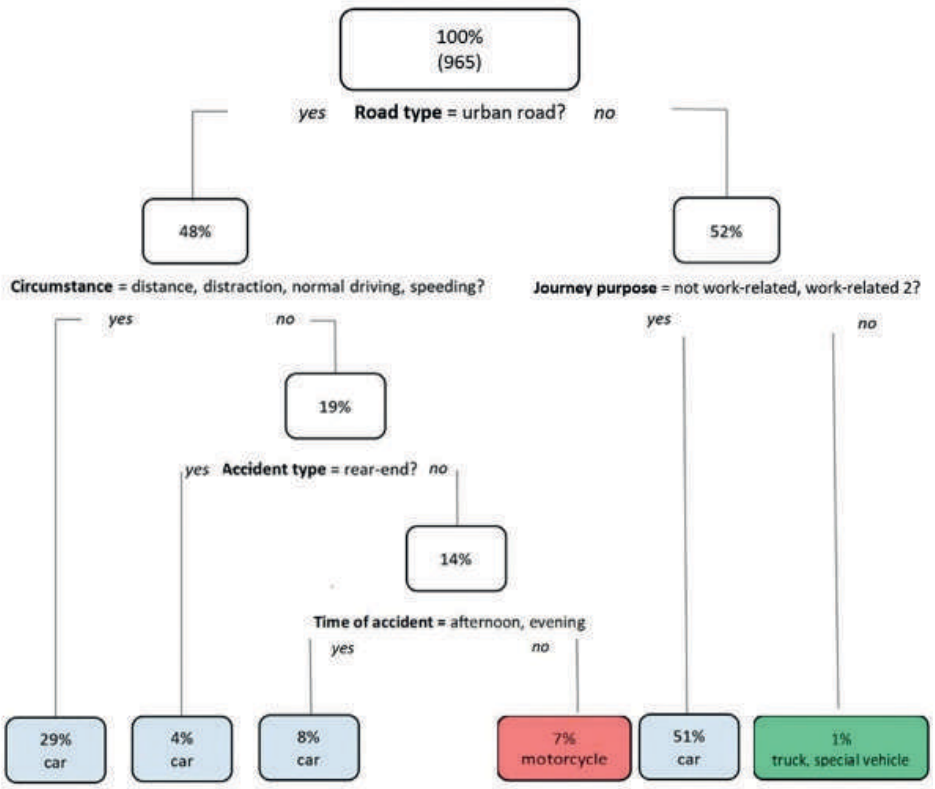


Figure 2 – Road accident model for tunnels up to 500 m in length (underpasses included). Target variable: type of vehicle affected. Training dataset 95%. Italy. Years 2018–2020.

Source: Authors' processing on Istat data - Survey on road accidents resulting in death or injury. Rstudio.

For short tunnels, the rpart algorithm provided 5 accident paths (Figure 2 and Table 5).

Table 5 – Leaf nodes and accident paths. Tree model provided by the "rpart" algorithm for road accidents in short tunnels (underpasses included). Italy. Years 2018–2020

Leaf node (prediction)	Accident path
car (29%)	urban road / distance, distraction, normal driving and speeding
car (4%)	urban road/other circumstance/rear-end
car (8%)	urban road / other circumstances / collision, impact or other / afternoon, evening
motorcycle (7%)	urban road / impact, collision or other type (not rear end or impact) /morning or night
car (51%)	motorway or rural road/not work-related or work-related 2 (commuting)
truck, special vehicle (1%)	motorway or rural road / work-related 1 (on duty)

Source: Authors' processing on Istat data - Survey on road accidents resulting in death or injury. R studio

As reported in Table 6, for tunnels over 500 m in length the root node "journey purpose" provided two paths and two leaf nodes: car; truck, special vehicles. Target variables not detected by the program were motorcycles, bicycles, electric bicycles and scooters as well as other vehicles.

Table 6 - Leaf nodes and accident paths. Tree model provided by the "rpart" algorithm for road accidents in long tunnels. Italy. Years 2018–2020

Leaf node (prediction)	Accident path
car (98%)	not work-related, work-related 2 (on commuting)
truck, special vehicle (2%)	work-related 1 (on duty)

Source: Authors' processing on Istat data - Survey on road accidents resulting in death or injury. R studio

Table 7 presents the division criterion applied to the accident models shown in Figure 2, Tables 5 and 6, based on binary questions on which each node is then split.

Table 7 – Tree models. Nodes, binary questions and answers. Short tunnel accidents (underpasses included) and long tunnel accidents. Italy. Years 2018–2020

Node	Binary question		Answer
	short tunnels	long tunnels	
1 (root node)	road type = urban road?	journey purpose=not work-related or work-related 2?	yes /no
2	circumstance = distance, distraction, normal driving, speeding?	-	yes /no
3	journey purpose =not work-related or work-related 2?	-	yes /no
4	accident type = rear-end?	-	yes /no
5	time of accident = afternoon, evening?	-	yes /no

Source: Authors' processing on Istat data - Survey on road accidents resulting in death or injury. R studio

4.2.3 Accident Model Development – The test and validation dataset

For long and short tunnels (underpasses included), the reliability of the accident models was computed by the test set (10% or 5% of original Istat dataset). The confusion matrix provided the accuracy, the sensitivity and the balanced accuracy (Table 8).

Table 8 – Tree model validation. Target variable: type of vehicle affected. Test set 5% and 10% of the original dataset. Italy. Years 2018–2020

Vehicle type	short tunnel model	long tunnel model
	balanced accuracy	balanced accuracy
bicycle, scooter	0.6	NA
car	0.6	0.6
motorcycle	0.6	0.5
other vehicle	NA	0.5
truck, special vehicle	0.6	0.6

Source: Authors' processing on Istat data - Survey on road accidents resulting in death or injury. R studio.

Accuracy (short tunnel): 0.5 - 0.7

Accuracy (long tunnel): 0.5 - 0.7

The accuracy of the short tunnel accident model was included in the range 0.5-0.7. The sensitivity resulted in 0.7 for the cars, 0.3 for bicycles and electric bicycles and scooters, motorcycles and truck and special vehicles. The balanced accuracy resulted overall 0.6 (other vehicle excluded). The accuracy for the long tunnels was included in the range 0.5-0.7. The sensitivity resulted in up to 0.7 for the car while the balanced accuracy resulted in 0.6 for the car, truck and special vehicle. (Table 8).

5. DISCUSSION

The study provided an overview of the 1,885 accidents in Italian road tunnels between 2018 and 2020. In 2020, as a result of the impact of the COVID-19 pandemic, we saw an exceptional decrease in road accidents and injuries. The blocking period issued by the government decrees to contain the spread of infections, has caused the almost total blocking of mobility and circulation from March to the end of May and subsequently also in the winter months, to counter the second pandemic wave, that significantly affects the trend of road accidents (Istat and ACI, 2020). As a result, the frequencies per year were constant in 2018 and 2019, while in 2020 we observed a decrease in accident frequencies (Table 2). According to Lemke, the risk of a tunnel accident is lower than the open road (about 50%). The severity of tunnel accidents is greater when the vehicle collides against the tunnel wall than when it collides against the guard rail on open roads. In addition, we observe the limited availability of rescue devices in tunnels such as cranes (Lemke, 2000). Tunnel length has an important impact on the severity of injuries: a longer tunnel is associated with more serious accident consequences. This result is consistent with the findings of several studies, according to which the severity of accidents is greater in long tunnels. Caliendo showed by means of a negative binomial regression model for non-serious and serious accidents, that crash frequency on unidirectional Italian motorway tunnel sections increases with tunnel length, in addition to other factors (Caliendo et al., 2019).

According to Xing et al., the type of vehicle was found to be determined on the severity of the individual tunnel accidents. Compared to cars, trucks and special vehicles present a significantly lower risk of accidents. This result can be explained by the difference in structure and speed between heavy vehicles and passenger cars (Xing, Lu, & Wang, 2015).

The classification and regression tree, based on covariates, provided the possible rules for predicting the type of vehicle involved in the accident. The tree provided a classification for the different types of vehicles involved in accidents distinguishing between long and short tunnels. For the short tunnels, we obtain 7 nodes and 5 predictive rules (path), equal to the number of terminal nodes (leaves) while for the long tunnels 2 paths (Tables 5, 6 and 7). This accident classification path leads from the root node to the target variable (vehicle type) and vice versa. The useful nodes for constructing the tree model for the short tunnels (including underpasses) were the type of road (root node), the circumstance, the purpose of the journey, the type of accident and the time of accident. The most frequent path produced by the model in short tunnels concerned the involvement of cars (51%) on motorway or rural roads, where the purpose of the journey was "not-work-related" or "on commuting" (work-related 2). According to Xing et al. for the single accident, in short tunnels, the time of the accident occurrence is considered significant in the type of vehicle involved. As highlighted by Xing et al. the time of the accident represents a predictor in the involvement of motorcycles. Our study found that in short tunnels, motorcyclists are exposed to the highest risks in the morning and at night (Figure 2 and Table 5). The most frequent path produced by the model in the long tunnels concerned the involvement of cars (98%) and the purpose of the journey "not-work-related" or "on commuting" (work-related 2). The second path concerned trucks or special vehicles (2%) on duty (work-related 1). The time of the accident did not affect the type of vehicle involved, as the purpose of the journey was the only node for long tunnels (Tables 6 and 7). The algorithm has "pruned" from the model the variable corresponding to the type of carriageway (number of lanes) in which the accident occurred. This "exclusion" concerned both short and long tunnel models. Xing et al. pointed out that multi-lane tunnel accidents increase the severity levels of accidents. Changing lanes to overtake in the multi-lane tunnel would result in high speed and a high risk of accidents (Xing et al., 2015). Rear-end in road tunnels are estimated at 70% of all collisions in 2006-2008, based on information from the Singapore CTE tunnel (Meng and Qu, 2012) and 75%, according to Shanghai-Sanmen-Highway in China (W. Guo et al. 2013). Other studies indicate 80% of total accidents (Lu et al., 2014). Unlike these results, our study has shown that rear-end represents 46% of the total collisions in short tunnels and 53% in long tunnels (Appendix A Table A1).

Our survey confirms the significant differences between accidents in short and long tunnels previously highlighted in recent studies (Caliendo et al., 2019; Pireddu and Bruzzone, 2021). The descriptive analysis showed that trucks and special vehicles account for 10% of all vehicles involved in tunnel accidents. 4% of trucks and special vehicles were involved in accidents in long tunnels, while 3% in short tunnels and 1% in underpasses (Appendix A Table A9). The difference between short and long tunnel accidents is probably due to the high use of heavy vehicles on motorways and rural roads, where there are mainly long tunnels (Appendix A Table A7). This difference is also confirmed by the two tree models. Unfortunately, the model was unable to predict accidents involving bicycles, electric bicycles and scooters due to lack of data. For electric scooters in fact, accident detection has only recently been introduced. Further limitations of the study are related to the number of missing geographical coordinates in the Istat dataset. The incomplete recording of this attribute concerns 13% of road accidents in tunnels, while 10% of cases on open roads. This result shows a criticality concerning the use of technologies to locate accidents inside the tunnels. As well as the location, the purpose of the journey was in many cases incomplete.

The descriptive analysis expressed the frequency at which a type of vehicle is involved in a road accident in a tunnel (Appendix A, Table 9). The rpart method applied at tunnel accident dataset provided the probability and the type of path that leads from the type of vehicle to the root node and vice versa. The differences between the two methods are substantial. The "added value" offered by rpart consistes in a number of different "tunnel accident paths" obtained through the Istat variables, which lead to the involvement of a certain type of vehicle.

6. CONCLUSIONS

The models obtained with the recursive partitioning and regression tree are quite easy to understand and interpret, differently to other supervised machine learning outputs. The algorithm is also suitable for balancing and randomising the variable into the dataset. The algorithm provided both short and long tunnel accident models and the most probable variable paths (scenarios) to classify or predict the vehicle involved in tunnel accidents. The methodology is an analytical tool useful for authorities and experts involved in risk analysis and management.

APPENDIX A – DESCRIPTIVE ANALYSIS

Table A1 – Accident frequency by class and accident type. Italy. Years 2018–2020

Class	collision_impact	other	rear-end	Total
0-500	299	137	256	692
>500	283	144	253	680
underpass	123	55	94	272
unclassified	106	64	70	240
Total	**811**	**401**	**673**	**1885**

Table A2 – Accident frequency by class and circumstance. Italy. Years 2018–2020

Class	distance	distraction	normal_driving	other_circ	speeding	Total
0-500	99	109	140	239	106	693
>500	114	94	153	223	96	680
underpass	33	48	66	95	30	272
unclassified	33	33	49	92	33	240
Total	**279**	**284**	**408**	**649**	**265**	**1885**

Table A3 – Accident frequency by class and carriageway type. Italy. Years 2018–2020

Class	1	2	3	4	Total
0-500	250	283	144	16	693
>500	332	192	155	1	680
underpass	75	149	43	5	272
unclassified	50	151	38	1	240
Total	**707**	**775**	**380**	**23**	**1885**

Table A4 – Accident frequency by class and consequence. Italy. Years 2018–2020

Class	death	injury	Total
0-500	17	676	693
>500	27	653	680
underpass	6	266	272
unclassified	6	234	240
Total	**56**	**1829**	**1885**

Table A5 – Accident frequency by class and journey purpose. Italy. Years 2018–2020

Length	not work-related	work-related 1	work-related 2	Total
0-500	655	12	26	693
>500	644	14	22	680
underpass	260	6	6	272
unclassified	213	6	21	240
Total	**1772**	**38**	**75**	**1885**

Source: Authors' processing on Istat and OSM data - Survey on road accidents resulting in death or injury

Table A6 – Accident frequency by class and pedestrian. Italy. Years 2018–2020

Class	0	1	NAN	Total
0-500	676	17	0	693
>500	673	2	5	680
underpass	253	17	2	272
unclassified	215	21	4	240
Total	**1817**	**57**	**11**	**1885**

Table A7 – Accident frequency by class and road type. Italy. Years 2018 – 2020

Class	motorway	rural road	urban road	Total
0-500	209	180	304	693
>500	306	284	90	680
underpass	24	85	163	272
unclassified	2	98	140	240
Total	**541**	**647**	**697**	**1885**

Table A8 – Accident frequency by class and time of accident. Italy. Years 2018 – 2020

Class	afternoon	evening	morning	night	NAN	Total
0-500	286	56	264	87	0	693
>500	256	73	269	77	5	680
underpass	122	42	83	23	2	272
unclassified	100	29	87	20	4	240
Total	**764**	**200**	**703**	**207**	**11**	**1885**

Table A9 – Accident frequency by class and vehicle type. Italy. Years 2018 – 2020

Class	bicycle, scooter	car	motorcycle	otherV	truck, special vehicle	Total
0-500	46	464	106	11	66	693
>500	5	499	72	25	79	680
underpass	16	177	45	7	27	272
unclassified	21	146	57	5	11	240
Total	**88**	**1286**	**280**	**48**	**183**	**1885**

Source: Authors' processing on Istat and OSM data - Survey on road accidents resulting in death or injury

REFERENCES

Amjad, P., H. Helai, H. Chunyang, W. Jie, L.Ye. 2020. "Revisiting freeway single tunnel crash characteristics analysis: A six-zone analytic approach". Accident Analysis & Prevention, Volume 142. https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105542.

Amundsen, F.H. 1994. "Studies of driver behaviour in Norwegian road tunnels". Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 9, Issue 1: 9-15.

Amundsen, F.H., and A. Engebretsen. 2009. "Studies on Norwegian Road Tunnels II. An Analysis on Traffic Accidents in Road Tunnels 2001—2006".

Amundsen, F.H., and G. Ranes. 2000. "Studies on traffic accidents in Norwegian road tunnels". Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 15, Issue 1: 3–11.

Bassan, S. 2016. "Overview of traffic safety aspects and design in road tunnels". International Association of Traffic and Safety Sciences - IATSS Research, Volume 40, Issue 1: 35-46.

Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A. & Stone, C.J. 1984. Classification and regression trees, Wadsworth International.

Caliendo, C., M.L. De Guglielmo, and I. Russo. 2019. "Analysis of crash frequency in motorway tunnels based on a correlated random-parameters approach". Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 85: 243-251.

Cima, V., M. Carroccio, e R. Maseroli. 2014. "Corretto utilizzo dei Sistemi Geodetici di Riferimento all'interno dei software GIS". In Atti della 18a Conferenza Nazionale ASITA, 14-16 ottobre 2014, Firenze: 359-363. Milano, Italia: Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali - ASITA

Costabile, S, S. Martini, L. Petriglia, G. Corrarello, e A. Avanzi. 2012. "Geoportale Nazionale. Un approfondimento sulle metodologie di conversione e trasformazione coordinate". GEOMEDIA, Volume 16, N. 6: 26-28.

Decreto Legislativo 30 aprile 1992, n. 285. "Testo aggiornato recante il nuovo codice della strada". Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale, n. 67 del 22 marzo 1994, Supplemento Ordinario n. 49.

Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81. "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro". Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale, n. 101 del 30 aprile 2008, Suppl. Ordinario n. 108.

European Commission, Community Database on Road Accidents - CARE. 2016. "Road Safety: new statistics call for fresh efforts to save lives on EU roads", Press Release 31 March 2016. Brussels, Belgium: European Commission.

European Parliament. 2004. Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network.

Gariazzo, C. (a cura di), A. Brusco, A. Bucciarelli, M. Bugani, C. Giliberti, A. Marinaccio, S. Massari, A. Pireddu, L. Veronico, G. Baldassarre, S. Bruzzone, M. Scortichini, M. Stafoggia, e S. Salerno. 2019. "Gli incidenti con mezzo di trasporto. Un'analisi integrata dei determinanti e dei fattori di rischio occupazionali". Collana Ricerche. Roma, Italia: Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro - INAIL.

Gariazzo, C., M. Stafoggia, S. Bruzzone, A. Pelliccioni, and F. Forastiere. 2018. "Association between mobile phone traffic volume and road crash fatalities: A population-based case-crossover study". Accident Analysis & Prevention, Volume 115: 25-33.

Guo, W., Pan, X., Deng, Q., Fu, Z. 2013. Traffic accidents' distribution in the highway tunnels of mountainous areas and preventive measures, ICTE 2013 © ASCE, pp. 507–513.

Hollò, P., V. Eksler, and J. Zukowska. 2010. "Road safety performance indicators and their explanatory value: A critical view based on the experience of Central European countries". Safety Science, Volume 48, Issue 9:1142-1150.

Istituto Nazionale di Statistica - Istat, e Automobile Club d'Italia - ACI. "Incidenti stradali in Italia. Anno 2018". Comunicato Stampa. Roma, Italia: Istat. https://www.istat.it/it/archivio/232366.

Istituto Nazionale di Statistica - Istat. "Rilevazione degli incidenti stradali con lesioni a persone". Informazioni sulla Rilevazione. Roma, Italia: Istat. https://www.istat.it/it/archivio/4609.

Istituto Nazionale di Statistica - Istat. "Survey on Road accidents resulting in death or injury". In SIQual - Information system on quality of statistical production processes. Roma, Italy: Istat. http://siqual.istat.it/SIQual/lang.do?language=UK.

Istituto Nazionale di Statistica - Istat. I.Stat, Your direct access to the Italian Statistics: the complete data warehouse for experts. Roma, Italy: Istat. http://dati.istat.it/Index.aspx.

Istituto Nazionale di Statistica - Istat, e Automobile Club d'Italia - ACI. "Incidenti stradali in Italia. Anno 2020". Comunicato Stampa. Roma, Italia: https://www.istat.it/en/archivio/259830.

Lemke, K. 2000. Road safety in tunnels. Transp. Res. Rec. 1940, 170–174.

Lu, L., Lu, J., Xing, Y., Wang, C., Pan, F. 2014. Statistical analysis of traffic accidents in Shanghai River crossing tunnels and safety countermeasures, Discrete Dynamics in Nature and Society, Hindawi Publishing Corporation, pp. 1–7, 824360 (http://dx.doi.org/10.1155/2014/824360).

Ma, Z.L., C.F. Shao, S.R. Zhang. 2009. "Characteristics of traffic accidents in Chinese freeway tunnels". Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 24: 350-355.

Meng, Q., Qu, X. 2012. Estimation of rear–end vehicle crash frequencies in urban road tunnels, Accid. Anal. Prev. 48. 254–263

Nævestad, T.O., Meyer, S. 2014. A survey of vehicle fires in Norwegian road tunnels 2008–2011, Tunn. Undergr. Space Technol. 41, 104–112.

PIARC, Comité technique 3.3 - Exploitation des tunnels routiers. 2008. Human factors and road tunnel safety regarding users. Paris, La Défense CEDEX, France: PIARC.

Pireddu, A., and S. Bruzzone. 2021. "An analysis of the influence of tunnel length and road type on road accident variables". Rivista di statistica ufficiale, N. 2/2021: 71-102. Roma, Italy: Istat. https://www.istat.it/it/ archivio/262320. ISSN 1828-1982.

Pireddu, A., e S. Bruzzone. 2019. "Incidenti in gallerie stradali". Fact Sheet. Roma, Italia: Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro - INAIL.

Rapport N. TS4-2009, Roads and Traffic Department, Traffic Safety Section. Oslo, Norway: Statens vegvesen Vegdirektoratet.

Xing, Y., Lu, J and Wang C. 2015. Single Vehicle Traffic Accidents in Shanghai River-crossing Tunnels. Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC 2015).

Yeung, J.S., and Y.D. Wong. 2013. "Road traffic accidents in Singapore expressways tunnels". Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 38: 534-541.

FRÉJUS TUNNEL RISK ASSESMENT: A SPECIFICALY DEVELOPPED ITALIAN METHOD COMBINED WITH THE FRENCH ONE

F. Luciani[a]
R. Borchiellini[b]
C. Willmann[c]
S. Sergi[d]
JM Couvert[d]
G. Ladre[e]
P. Pons[a]

[a] *BG Ingénieurs Conseils, France*
[b] *Politecnico di Torino, Italy*
[c] *CETU, France*
[d] *GEIE GEF, Italy*
[e] *Setec, France*

The introduction of the concept of risk analysis in the 2004 European Directive has led to different types of tunnel risk assessment methods within each country of the European Community. In 2008, the PIARC published a report about risk analysis for road tunnels, and in 2013, a second report has been published about practices for risk evaluation for road tunnels.

In the case of transalpine tunnels, which connect two countries, risk assessment of the whole structure must be done from a global perspective.

For the Fréjus tunnel, a specific method has been developed coherently with the Italian risk evaluation method (ADR). It has been carried out in parallel with the French ESD, which made it possible to study the complementarity of the two methodologies.

The Italian ADR consists in a system-based approach that allows the quantification of the risk associated with events that may occur in a tunnel. It is based on the critical application of probabilistic methods for the risk assessment of complex events identified using Event Tree and Cause Tree techniques, each event giving rise to a scenario whose consequences must be assessed.

The risk assessment for the Fréjus tunnel is based on feedback and the effectiveness of the safety measures installed and the safety functions provided by the management systems and makes it possible to characterise scenarios representative of critical events, to describe the evolution of these events by considering the reliability and effectiveness of the safety measures adopted in the tunnel.

The probabilistic analysis allows to highlight the most representative scenarios in terms of likelihood and to select fire and dangerous goods scenarios for which an evaluation of the consequences needs to be done by means of evacuation simulation models.

The paper aims at showing how the Italian method has been applied in the case of Frejus tunnel, and to discuss respective advantages of the French and the Italian methodologies.

EVALUACIÓN DEL RIESGO DEL TÚNEL DE FRÉJUS: UN MÉTODO ITALIANO ESPECÍFICAMENTE DESARROLLADO Y COMBINADO CON EL FRANCÉS

La introducción del concepto de análisis de riesgos en la Directiva europea de 2004 ha dado lugar a diferentes tipos de métodos de evaluación de riesgos en túneles dentro de cada país de la Comunidad Europea. En 2008, la AIPCR publicó un informe sobre el análisis del riesgo para los túneles de carretera, y en 2013 se ha publicado un segundo informe sobre las prácticas de evaluación del riesgo para los túneles de carretera.
En el caso de los túneles transalpinos, que conectan dos países, la evaluación del riesgo de toda la estructura debe hacerse desde una perspectiva global.
Para el túnel de Fréjus se ha desarrollado un método específico coherente con el método italiano de evaluación de riesgos (ADR). Se ha llevado a cabo en paralelo con la EDS francesa, lo que ha permitido estudiar la complementariedad de ambas metodologías.
El ADR italiano consiste en un enfoque sistémico que permite cuantificar el riesgo asociado a los sucesos que pueden ocurrir en un túnel. Se basa en la aplicación crítica de métodos probabilísticos para la evaluación del riesgo de sucesos complejos identificados mediante técnicas de Árbol de Sucesos y Árbol de Causas, dando lugar cada suceso a un escenario cuyas consecuencias deben evaluarse.
La evaluación del riesgo del túnel de Fréjus se basa en la retroalimentación y la eficacia de las medidas de seguridad instaladas y de las funciones de seguridad proporcionadas por los sistemas de gestión y permite caracterizar escenarios representativos de sucesos críticos, describir la evolución de estos sucesos considerando la fiabilidad y la eficacia de las medidas de seguridad adoptadas en el túnel.
El análisis probabilístico permite poner de relieve los escenarios más representativos en términos de probabilidad y seleccionar los escenarios de incendio y de mercancías peligrosas para los que hay que hacer una evaluación de las consecuencias mediante modelos de simulación de evacuación.
El objetivo de este artículo es mostrar cómo se ha aplicado el método italiano en el caso del túnel de Frejus y discutir las ventajas respectivas de las metodologías francesa e italiana.

EVALUATION DES RISQUES DU TUNNEL DU FRÉJUS : UNE MÉTHODE ITALIENNE SPÉCIALEMENT DÉVELOPPÉE COMBINÉE À LA MÉTHODE FRANÇAISE

L'introduction du notion d'analyse des risques dans la directive européenne de 2004 a conduit à différents types de méthodes d'évaluation des risques dans les tunnels au sein de chaque pays de la Communauté européenne. En 2008, l'AIPCR a publié un rapport sur l'analyse des risques pour les tunnels routiers, et en 2013, un deuxième rapport a été publié sur les pratiques d'évaluation des risques pour les tunnels routiers.
Dans le cas des tunnels transalpins, qui relient deux pays, l'évaluation des risques de l'ensemble de l'ouvrage doit se faire dans une perspective globale.
Pour le tunnel du Fréjus, une méthode spécifique a été développée en cohérence avec la méthode italienne d'évaluation des risques (ADR). Elle a été menée en parallèle avec l'ESD française, ce qui a permis d'étudier la complémentarité des deux méthodologies.
L'ADR italienne consiste en une approche systémique qui permet de quantifier le risque associé aux événements qui peuvent se produire dans un tunnel. Elle est basée sur l'application critique de méthodes probabilistes pour l'évaluation du risque d'événements complexes identifiés à l'aide de techniques d'arbre des événements et d'arbre des causes, chaque événement donnant lieu à un scénario dont les conséquences doivent être évaluées.
L'évaluation des risques pour le tunnel du Fréjus est basée sur le retour d'expérience et l'efficacité des mesures de sécurité installées et des fonctions de sécurité assurées par les systèmes de gestion et permet de caractériser des scénarios représentatifs d'événements critiques, de décrire l'évolution de ces événements en considérant la fiabilité et l'efficacité des mesures de sécurité adoptées dans le tunnel.
L'analyse probabiliste permet de mettre en évidence les scénarios les plus représentatifs en termes de probabilité et de sélectionner les scénarios d'incendie et de marchandises dangereuses pour lesquels une évaluation des conséquences doit être effectuée au moyen de modèles de simulation d'évacuation.
L'article vise à montrer comment la méthode italienne a été appliquée dans le cas du tunnel du Fréjus, et à discuter des avantages respectifs des méthodologies française et italienne.

1. INTRODUCTION

Tunnel safety has been the subject of increasing study over the years. Different countries and associations have established different regulations and methods to deal with tunnel safety. The events in the large transalpine tunnels awakened and exacerbated this need, so at the beginning of the 2000s the question arose of defining a way of analysing tunnel safety.

In 2004, Directive DE2004 54 EC on minimum safety levels in tunnels longer than 500m was introduced in Europe, which among other things introduced the concept of risk analysis.

This directive was transposed by the various countries in different ways and at different times. Furthermore, while the minimum safety measures were clearly identified in the technical annex to the directive, it referred the definition of the risk analysis back to the individual European states, thus leaving each country free to determine the specific study to be applied and the relative acceptability criteria.

For road tunnels, the specific risk study is therefore carried out according to the state to which it belongs, which allows the level of risk and compliance with the specific standard to be assessed. If, however, a tunnel straddles two states, not just one standard must be applied, but both. Thus for large transalpine tunnels, the specific risk study must be carried out according to two regulations.

In this article we will illustrate the procedure carried out for the Frejus tunnel, a tunnel between Italy and France, and give a more detailed view of the Italian methodology of analysis that has been specifically developed for the Fréjus tunnel coherently with the Italian ADR, highlighting the process followed and in particular the parallelism achieved between the Italian and French methodologies.

2. THE FREJUS TUNNEL

The Fréjus motorway tunnel is a 12 km tunnel belonging to the trans-European network, route E70 connecting Italy to France. Opened in 1980, it has undergone updates over time, improvements in safety and operational measures and the recent adaptation to the European Directive. Currently in operation as a bi-directional tube, it will see in the next few years the opening of a second tube that will allow it to be used as a one-way twin-tube tunnel.

The safety studies illustrated concern the configuration currently in operation, a single bi-directional tube, with 34 pedestrian escape routes and 9 driveway by-passes connected to the second tube under construction. With the opening of the connecting branches, the Frejus tunnel complies with the European Directive and the respective French and Italian directives in terms of the minimum safety measures present.

Figure 1: Pedestrian escape routes

When adapting the tunnel to the European directive in 2018, the Binational Safety Committee requested that the tunnel's safety verification be carried out using both methodologies, Italian and French. The need therefore arose to verify the safety of the tunnel by considering two different technical regulations and to carry out this in parallel, highlighting the complementarity of the methodologies used.

2.1. Tunnel Description and Safety Measures

The tunnel is equipped with all the safety measures required by the standards, and with numerous redundancies that implement the safety level of the entire system.

The tunnel is equipped with all the systems that allow proper driving, redundant automatic event and fire detection systems, a communication system for users and communication systems dedicated to emergency services, CCTV, a tunnel closure system both at the tunnel entrances and with barriers inside the tunnel itself, a fire-fighting water system and a dedicated drainage system. In addition, the tunnel is equipped with a semi-transverse ventilation system with 4 ventilation units; the system injects fresh air through inlets distributed every 4.5m and extracts exhaust air through dampers installed in ceiling every 130m.

The tunnel is operated from the Italian Central Control Station (PCCI); in parallel, a so-called "back-up" control station on the French platform can be activated at any time in case of failure of the main control station.

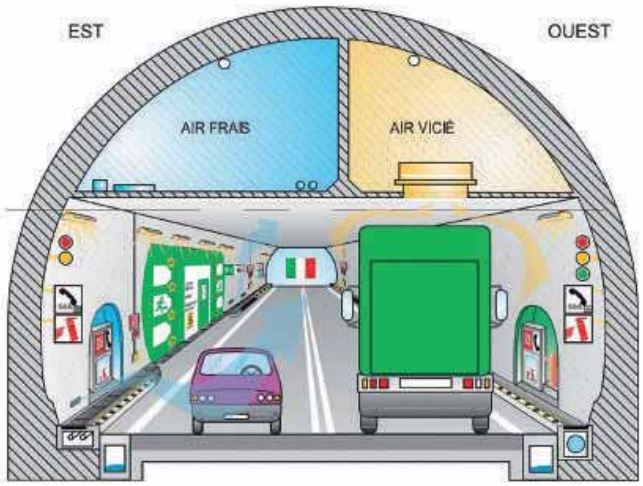


Figure 2: Cross secction f the Frejus tunnel

The operating part of the tunnel is of no secondary importance for the overall safety of the work.

The circulation of vehicles is subject to Italian and French regulations, international regulations for the transport of dangerous goods (ADR) and the tunnel's own rules. As far as dangerous goods are concerned, the tunnel is classified as category C according to ADR 2017 and the transit of ADR goods through the tunnel is escorted. In addition, the presence of tolls at the tunnel entrances allows for the cadencing of vehicles within the tunnel.

Particular mention must be made of the rescue management system in the Frejus tunnel. It is in fact equipped with a dedicated first aid organisation in case of emergency.

The tunnel is equipped with 4 fixed control units on each tunnel entrance and 2 fixed control units inside the tunnel, located respectively at 1/3 and 2/3 of the tunnel. From the point of view of intervention, the tunnel is therefore divided into 3 sections of 4 km each. Each rescue post is manned by intervention personnel 24 hours a day, 365 days a year.

2.2. Security Assessment Methodologies - Process Defined for Frejus Tunnel

The risk analysis on the one hand and the étude des dangers on the other, are documents that are part of a more general documentation complex called safety documentation, or dossier de sécurité. They are regulated on the one hand by an Italian decree, Legislative Decree 264 of 2006, which defines the general principles of risk analysis, and on the other hand by the CETU reference file 4 "Les études spécifiques des dangers (ESD)" of 2003, which describes the contents of the ESD in detail.

The request to develop the two analyses according to the respective regulations was carried out by developing the two approaches in parallel and defining common starting assumptions. The standards of the two countries are quite different, the Italian standard required a quantitative risk analysis, i.e. to assess the probability of occurrence of possible accidental events and the relative indicator of the severity of the consequences linked to the evolution of the event. The French standard, on the other hand, has a semi-quantitative approach, with preliminary risk analysis to deal qualitatively with a large number of hazardous situations and the subsequent fire scenario analysis analysing and quantifying the severity of appropriately identified scenarios.

The development of the analyses in parallel started from the definition of the general approach and assumptions common to the two studies. In fact, these must evaluate the work as a whole while maintaining a single common thread. The following common starting assumptions were therefore identified: the studies are carried out for the same tunnel configuration, starting from the same accident and traffic data.

In addition, each of the two studies requires fire simulations to be carried out to assess the safety system in the event of an event. For both studies, the same fluid-dynamic modelling was carried out with the same HRR curves to be used for the different fire powers analysed. In addition, the same damage criteria were considered for evaluating the results of the simulation in terms of the consequences on users.

Each of the two studies used these simulations as required by its own regulations.

3. FRENCH RISK ANALYSIS

Whereas, in Italy, the method should be developed by the user based on general rules, in France the method is defined at national level by the booklet 4 "specific Hazard Investigations" (SHI) of the Guide to Road tunnel safety documentation.

Mainly, the specific hazard investigation aims to understand the way the tunnel system react to the danger in order to improve it. Therefore, it will deeply analysed few cases to do so. In this regards, the specific hazard investigation follow a scenario based approach in

The specific Hazard investigation:

- Must "describe any accidents, whatever their cause, that may occur once the tunnel si in operation together with their extent and possible consequences";
- Must "describe and explain the measures required in order to reduce the probability of these accidents and their consequences".

The investigation is conducted in accordance with the following plan:

- Overview of the tunnel and its environment
- Functional description of the tunnel
- Identification of hazards and choice of scenarios
- Analysis of the scenarios
- Summary

Overview of the tunnel and its environment

The tunnel is described in other document in the safety documentation. The purpose of this chapter is to emphasise solely what is important from a safety point of view, even if this means referring the reader to other documents.

Functional description of the tunnel

This chapter describes the safety functions in place together and how principal structural elements, equipment and operating arrangements ensure their effective performance.

Identification of hazards and choice of scenarios

This phase is conducted in close collaboration with the different parties involved (owner, operating body, police and emergency services).

This phase meets two requirements:

- An exhaustive inventory of possible events: this serves both as e preliminary to the choice of scenarios and as basis for finalising the operation documents, notably the emergency and safety plan
- The selection of a small number of scenarios to be analysed in detail

First, hazards are identified (for example HGV broken down, speeding, Infiltration of water into the tunnel, pool of oil, etc.). Certain tunnel malfunctions (for instance, serious power cut) should not be considered when they lead to the immediate closure of the tunnel as a preventive measure. On the other hand, when the possibility that the loss of a function goes unnoticed cannot be ruled out, or when it may have been caused by a trigger event (e.g. loss due to a short circuit cause by a fire), then any such loss of a function should be regarded as an aggravating factor.

The choice of scenarios to be analysed begins with the choice of trigger events (rarely more than three or four). For example HGV fire is a possible trigger event. The choice of the trigger event is based on a provisional general assessment of it frequency and severity. In this regard a frequency-severity matrix representation could be used, relating the occurrence' frequency of the trigger events to their presumed consequences.

			GRAVITE				
			Mineur ou nul Dégâts matériels seulement	**Significatif** Blessés légers seulement	**Critique** Blessés graves / moins de 5 décès	**Catastrophique** Entre 5 et 50 décès	**Catastrophe majeure** Plus de 50 décès
Fréquence			I	II	III	IV	V
Temps de retour	Fréquence qualitative						
< 1 an	Très fréquent	A					
< 10 ans	Fréquent	B			Incendie d'un VL	Incendie d'un PL	
Entre 10 et 20 ans	Occasionnel	C					
Entre 20 et 100 ans	Rare	D					Incendie d'un TMD
Entre 100 et 1000 ans	Très rare	E					
> 1000 ans	Extrêmement rare	F					

Figure 3: Extract of the frequency-severity matrix of Frejus SHI

Once the trigger events have been selected from the list of identified hazards, defining the scenarios consists of associating them with a context: localisation (ex 650 m after the entrance portal), time (ex 18:30), traffic conditions (ex: congested), etc.

Whilst there must not be an excessive number of contexts, on the basis of few scenarios, variants can be examined subsequently to test the sensitivity of the consequences to a parameter which has shown itself to be particularly influential. The scenarios are chosen with care and in order that the whole set is well balanced including

- Scenarios with minor consequences that are the most common and that the system should handle without any difficulties,
- Scenarios with average consequences that enable to analyse the effectiveness of organisational or technical measures
- Scenarios with severe consequences that are rare to push the system to its limits.

Exhaustiveness is not the purpose here, but rather the instructive nature of the scenarios i.e. their ability to demonstrate the link between the facilities and the operating and emergency provisions designed to meet the safety requirements.

Localisation incendie	ESD	Scénario	Incendie	Puissance (MW)	ΔP Global (Pa)	Contrôle courant d'air*	Trafic (veh/h/sens)	Présence Bus
2010 PM 3470 (P3)	2010 (rappel)	S1	VL	4	+200 Pa	SO	450	Oui
		S2	PL	30	-375 Pa	EO	450	Non
		S3	PL+	100	-500 Pa	EO	225	Non
		S4	VTMD	200	0 Pa	EO	450	Non
2018 PM 3530 (P3) Au droit du rameau 10	2018	S1	VL	4	+200 Pa	SO	370	Oui
		S2	PL	30	-550 Pa	EO/SO	370	Oui
		S3	PL+	100	-550 Pa	EO/SO	280	Non
		S4	VTMD	200	0 Pa	SO	280	Non

Figure 4: Extract of the scenarios' list of the Frejus tunnel SHI

Analysis of the scenarios

The description of the sequence of events and the action required illustrate the contribution of each material and organisational facto of tunnel safety and the way these factors interact.

Each scenario starts with a trigger event and continues with the sequence of events right up to ensuring user safety or the arrival of the emergency services if this occurs later.

These events involve:

- The progress of a phenomenon in a confined space (smoke propagation, liquids, gases and heat in the tunnel under the effect of the prevailing geometric, mechanical and air flow conditions). 1D or 3D model are used for fire effects.
- User behaviour (mainly their walk towards the emergency exits). Assumptions are made concerning reaction time, time to exit the vehicle time walking speed (depending on the visibility), loss of self-evacuation capacity (due to temperature or smoke for example), etc.
- Implementation of the safety systems and procedures (detection systems, activation and operation of the required facilities, the operator's reactions, action by the emergency services, etc.).

Generally the analysis is based on a 2D graph that represents both the phenomenon and users (see Figura 4).

Examination of the scenario should be such as to:

- Show the function of each system or procedure designed to minimise effects on users safety;
- Reveal the interactions between the different systems and procedures;
- Identify the weak points;
- Highlight more or less hazardous areas and make it possible to assess the number of persons likely to lose their self-evacuation capacity and then be in danger

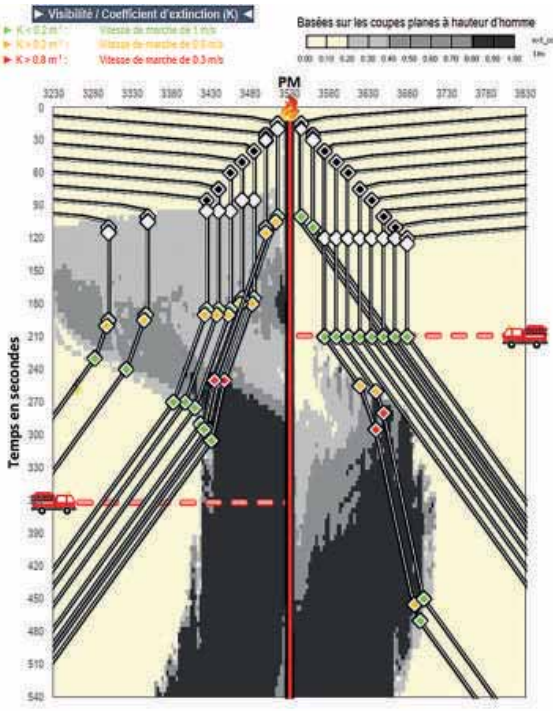


Figure 5: 2D graph example - SHI of Frejus tunnel

Summary

The summary especially include the following:

1. A summary of the scenarios examined and their consequences
2. A recapitulation of the observations on safety measures and any proposal for improvement:
    - The compliance with widely accepted practice of the measures intended to reduce the probability of occurrence of accidents;
    - For tunnels in operation not compliant with the reference technical instruction in France, an assessment of the level of safety compared with the safety level that would be achieved by strict application of this instruction
    - The scope of the measures intended to reduce both the occurrence and the consequences of accidents
    - Where applicable, proposals for the improvement of the provisions adopted.

3. A summary of the items useful for :
    - The operating instructions
    - The emergency and safety plan
    - The actions plans of the public emergency services.

4. ITALIAN RISK ANALYSIS

The quantitative analysis of Italian risks must be carried out by applying a systemic approach, the 'tunnel system'. It must take into account all the following aspects: Incidents characteristic of the tunnel, Geometrical characteristics of the tunnel: length, slope, etc., Performance of safety measures, Traffic conditions (number VL, VP, etc.), Organisation of the operator, Organisation of rescue, Information given to users.

The specific hazards related to the tunnel system are defined in Annex 3 of Legislative Decree 264/06 and are: fires, fire collisions, releases of flammable substances, releases of toxic and harmful substances. The risk analysis of the Frejus was carried out in a differentiated way: the events related only to dangerous goods were analysed using the PIARC DG-QRAM, while the fire events related to ordinary traffic were analysed using the tunnel's own data.

Risk quantification cannot be carried out by direct measurement, it requires a risk model compatible with the theoretical foundations of probability theory to be formulated and solved by statistical calculation techniques.

This concept applied to the Frejus tunnel delimits the procedure to be applied for the correct performance of the analysis:

- the types of hazards associated with a tunnel are determined on the basis of the tunnel's own accidents and define the relevant events to be analysed;
- the infrastructure's own safety measures, through their reliability and efficiency, make it possible to establish the probabilities of correct operation and failure of the individual systems, and therefore to define the overall performance of these measures;
- the management of the safety system under emergency conditions is provided on the one hand by the tunnel detection and communication system and on the other hand by the intervention of the rescue teams.

The risk analysis in tunnels, carried out in accordance with Art. 13 of Legislative Decree No. 264 of 5.10.2006, is then developed with reference to the performance levels of the safety equipment present in the tunnel and the reliability of these systems calculated on the basis of statistical data.

The accident scenarios and their evolution inside the tunnel, the hazards involved in these scenarios, must be represented by models that must contain the tree of causes, the initiating event and the tree of events.

The Italian risk analysis methodology is an analytical method that requires a detailed analysis of the tunnel under examination, the characteristic data and the definition and quantification of each aspect to allow the method to be defined and developed as a whole. On the one hand, the characteristic traffic and accident data must be recorded and analysed, and on the other hand, the safety and operational measures present must be analysed in order to be able to apply the methodology to the tunnel itself.

A wide range of methodologies with different assumptions, event tree accuracy and consequences modelling could be developed coherently with general prescriptions and guidance of the Art 13.

Hereby the specific one developed for the Frejus is presented.

The event tree defined for the Fréjus is developed on several levels:

1. Level 1: accidents characteristic of the Fréjus
2. Level 2: type of event
3. Level 3: fire power
4. Level 4: Presence of first intervention teams
5. Level 5: Security measures
6. Level 6: Fire location
7. Level 7: Traffic condition
8. Level 8: Back pressure

Each of the identified levels is detailed and their probability of occurrence defined.

The methodology starts with the hazard investigation, i.e. the assessment of the occurrence frequencies of the reference events, which are derived from the accident data. The calculation of accident frequencies starts with an accident analysis on the specific route aimed at determining the accident rate. Accident analysis based on statistical data is thus of great importance and allows the risk analysis to be based on real, tunnel-specific data.

Table 1: Tunnel accident data

EVENT	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Accidents	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
Fires	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0

The subsequent probabilistic analysis aims to identify the expected frequency of events that are at the origin of the scenarios analysed in the risk analysis.

The first level, the Fréjus characteristic accident breakdown is derived from the historical data of the tunnel. The probability of occurrence of an event is based in the case of an existing tunnel on the historical data collected during the tunnel operation. The reliability of the parameter considered depends on the amount of data analysed. In the case of the Fréjus, data for several years are available. The diagram below shows the breakdown of accidents relating to the Fréjus. This subdivision shows that the breakdown of events at Fréjus defines three types of event: collisions, fires and events involving dangerous goods.

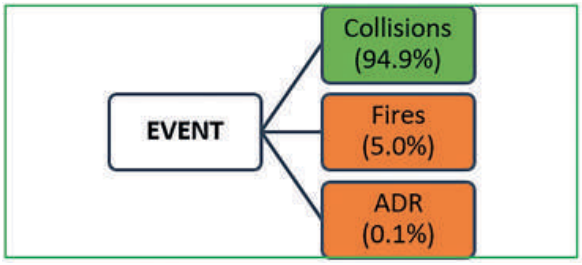


Figure 6: Fréjus characteristic accident breakdown

Considering the events that can occur inside a tunnel, collisions, minor incidents, fires and releases, only a portion of these can be considered critical, and of these a further subset constitutes the relevant events. Collisions highlighted in green are part of road traffic accidents and should not be considered in the development of the risk analysis.

The second level of the event tree, the event type, requires the events considered critical, i.e. fires and events involving ADR goods, to be broken down. Other events such as collisions do not need to be developed, according to the Italian decree.

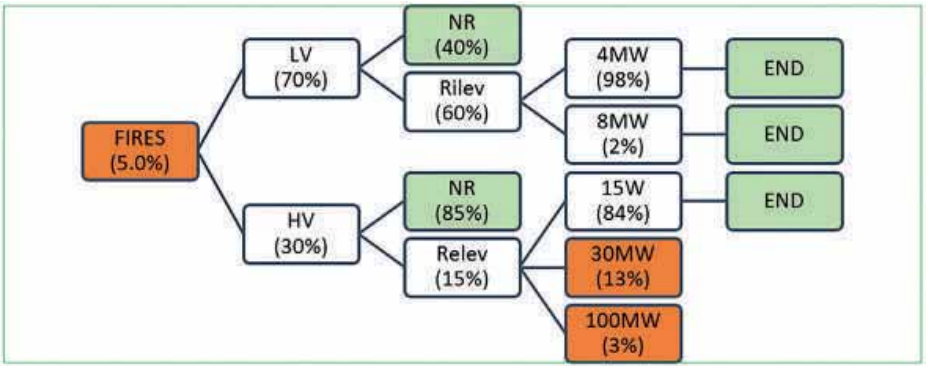


Figure 7:Event type

The fire event classification is carried out starting from the subdivision between Light Vehicles (LV) and Heavy Vehicles (HV) reported in the literature and continues by attributing to this subdivision the percentages relating to non-relevant events (NR) that do not give rise to consequences for which the branches of the event tree will not be further developed and Relevant events. For the Fréjus tunnel, fires resulting from VL or fires smaller than VP (15MW) may be considered as non-significant fires. For these powers, the management systems and facilities allow a complete management of the event without consequences for the users. In fact, the safety systems designed and implemented in Frejus allow the management of relevant fire powers even in conditions of partially degraded installations.

The third level, fire power, defines the types of fire considered as relevant for risk analysis. Fires with powers of 30MW and 100MW and events resulting from accidents involving dangerous goods, i.e. events highlighted in orange in the previous diagrams, were considered for the analysis.

The fourth level takes into account the first intervention teams (FIT) lent in the tunnel.

A particularity of the Frejus tunnel is the presence of fire-fighting teams located close to tunnel portals and in 2 locations within the tunnel at respectively one third and two thirds of the length. The control centre supervises the evolution of the accidental scenario and communicate via radio with the teams to both support them and provide guidance. The emergency teams are in a condition to operate in order to control or extinguish fire principles before they evolve into larger fires.

Figure 8: Fire-fighting vehicles

This permanent presence has the following advantages: events are managed in the early stages and in most cases the fire is not only mitigated but most of the time extinguished. This presence therefore contributes substantially to the reduction of incidents inside the tunnel and the consequent reduction in risk.

The effect of the intervention of rescue teams on the development of fires is assessed through a probabilistic approach: the emergency services can be considered as a safety system whose objective is to avoid the development of the vast majority of fires.

The historical data present made it possible to analyse the times of event detection, team activation and team arrival at the scene of the incident. This analysis over a period of 6 years showed that the arrival time of the first team at the scene of an incident varies from 40 seconds to 10 minutes.

The parameter that is decisive for the risk analysis is the arrival time of the FIT at the fire event. A limit value of 5 minutes has been set for this parameter to allow the teams to intervene at the beginning of the event and contain the development of the fire. Historical data showed that the percentage of teams arriving within 5' is 86%.

The approach identified for the intervention of rescue teams is conservative. In fact, only the first team to intervene and not the next 3 teams were considered, and their intervention was limited to 5 minutes. After this time, the team intervenes in any case and takes action to mitigate or extinguish the fire, but for the purposes of the risk analysis, this intervention was not evaluated, it was considered that the event evolves completely after the 5 minutes.

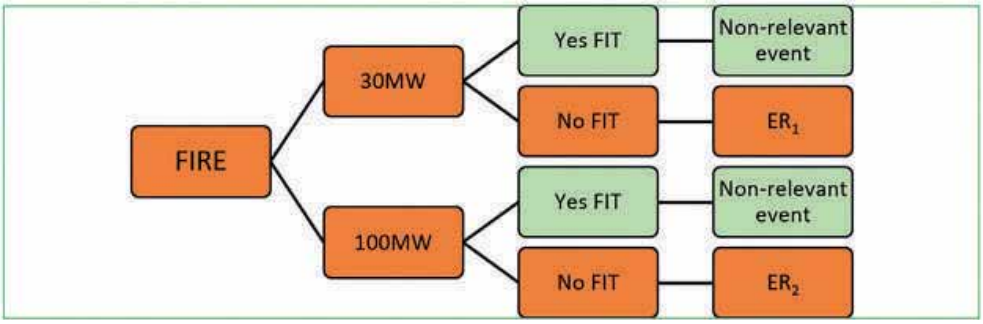


Figure 9: First intervention teams

Infrastructure-specific security measures constitute the fifth level of the tree. Through their reliability and efficiency they make it possible to establish the probability of correct operation and failure of individual systems, and thus to define the overall performance of these measures.

The Fréjus tunnel is equipped with all the measures required by the decree and also with redundancies that make it a very well-equipped tunnel. All the installations are interconnected and managed through the centralised management system that allows automated management of events, the system proposes to the operator the intervention to be implemented and the operator validates this proposal. GTC (centralised technical management) also allows monitoring and maintenance management. The centralised system collects all the data coming from the field, alarms and faults, data that are analysed in real time by specialised personnel who catalogue and manage them.

Minimum operating conditions (MOC) have also been defined for the Fréjus tunnel, which are integrated into the management of system degradations and/or malfunctions and allow the efficiency and effectiveness levels of the systems to be constantly monitored. The tunnel safety measures are managed according to a division into functional families, the same families that are managed by the central system and the MOCs. Management is therefore done according to the functionality that a family of systems must fulfil and guarantee.

Only a few families of installations were considered relevant for safety purposes: fire detection system, central management system, ventilation system, power supply system and tunnel closure system. The other families of installations, although essential for safety, were not taken into account in the analysis because the in-depth examination of these systems showed that they are built with complete redundancy and therefore a malfunction, even local, of part of these systems does not lead to a reduction in the functionality of the system as a whole.

The analysis of the levels of service implemented in the tunnel and the times for the systematic tests that are carried out for each family of installations have made it possible to define the reliability levels of families of installations divided according to their functionality. The probabilities calculated for the families of installations considered relevant to safety are particularly high, e.g. the fire detection system has a probability of correct operation of 9.9E-01 and the locking system of 9.62E-01.

The 5 families identified above and their relative probabilities make it possible to compose the security measures part of the event tree.

The event tree of the safety measures for the Frejus tunnel is rather rich and complex. Starting from a given relevant event and following the development of this event in the trajectories of the tree it is possible to determine, depending on the performance of the systems, the correct handling or not of the event itself.

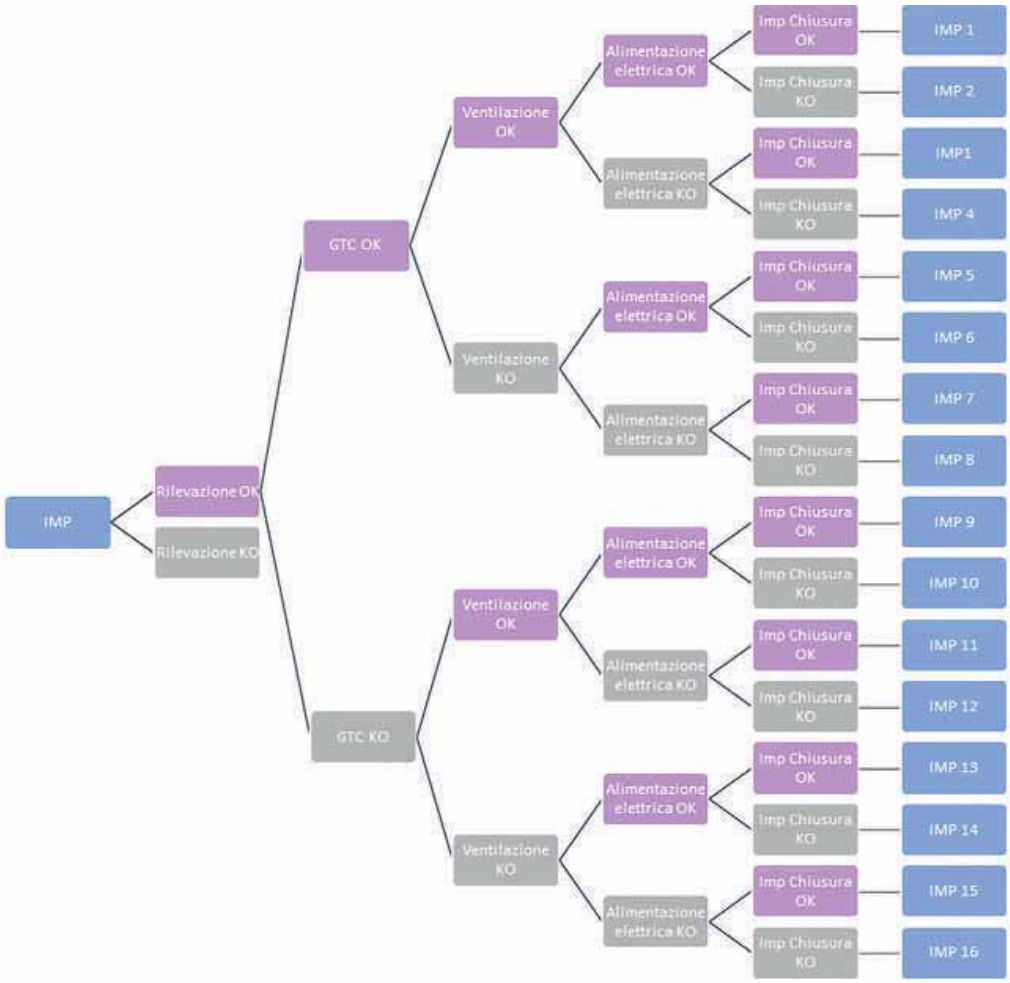


Figure 10: part of the event tree for safety system

The figure above illustrates part of the Frejus event tree, the combinations of all safety system cases leads to a total of 32 combinations.

Associated with this tree, the combination of probabilities of occurrence of the safety measures tree is given by the combination of the probabilities of the individual branches. These probability combinations range from 9.56E-01, a branch corresponding to the probability of all systems functioning properly, to 5.36E-15 a branch corresponding to no systems functioning at all. The most interesting probability combinations to analyse are those with functioning safety measures or in which only one plant family fails.

The contextualisation of the scenarios, levels 6, 7 AND 8, are respectively the identification of fire positions, traffic and back pressure conditions.

The objective of the risk analysis is not to analyse all the possible scenarios of events that may occur in the tunnel, but only the most representative ones, which allow highlighting the suitability of the tunnel equipment to guarantee an acceptable level of safety.

In order to be able to associate a damage with such events, other variables must also be defined that may allow the localisation of the event and its boundary conditions, i.e. fire positions, traffic conditions and the possible presence of buses and weather conditions must be defined.

The choice of scenarios to be analysed is particularly complex. In fact, given the length of the tunnel and the particularity of the tunnel itself, it is impossible to analyse all the positions in the tunnel and all the possible events in each position. In principle, all positions within the tunnel can be considered as equi-probable.

The choice of location positions for the scenarios was based on the following criteria:

- Possibility of occurrence of the event at a given position based on the accident data of the structure;
- Criticality of a given location for ventilation, i.e. ability of the system to handle air velocity;
- Special conditions for the user: maximum interdistance to be travelled in the event of an event to reach the safe location.

The locations identified for the analysis met the above criteria.

Traffic conditions derive from traffic data collected in the Fréjus tunnel and analysed to determine the trend and distribution of traffic throughout the day and according to the type of vehicle circulating. This distribution is functional to the analysis of scenarios and their contextualisation, and has made it possible to determine the characteristic traffic scenarios to be analysed.

Finally, in order to carry out the simulations, the boundary conditions and thus the pressure differences at the time of the event must be defined. The analysis of the back pressures made it possible to identify a distribution curve of the back pressures with the corresponding frequencies of occurrence.

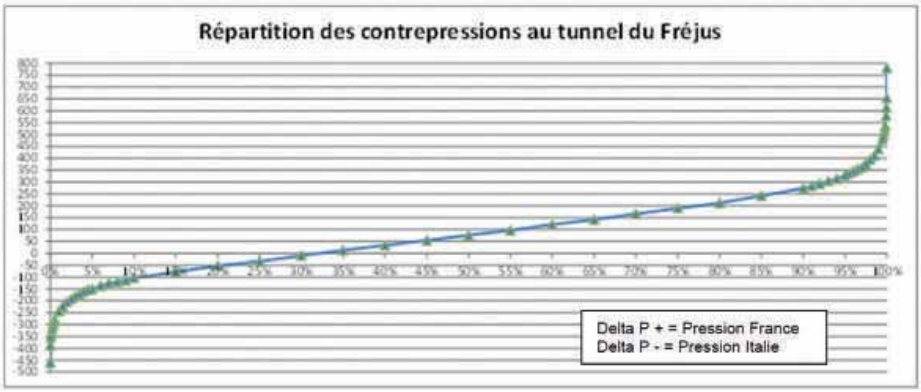


Figure 11: Pressure trend

This trend makes it possible to assign the relative probability of occurrence to each range of values.

The analyses carried out previously and the relative breakdown of the event tree into sub-levels resulted in a rather large number of branches. In particular, for each relevant fire 32 combinations of safety equipment, 3 different fire positions, 3 traffic levels and 5 back pressure intervals were associated. For each relevant fire, 1,440 branches were thus defined, i.e. scenarios that needed to be analysed to determine their consequences. The complete tree therefore represents all possible fire scenarios starting from a spectrum of hypotheses that represents all reasonable possible initiating events

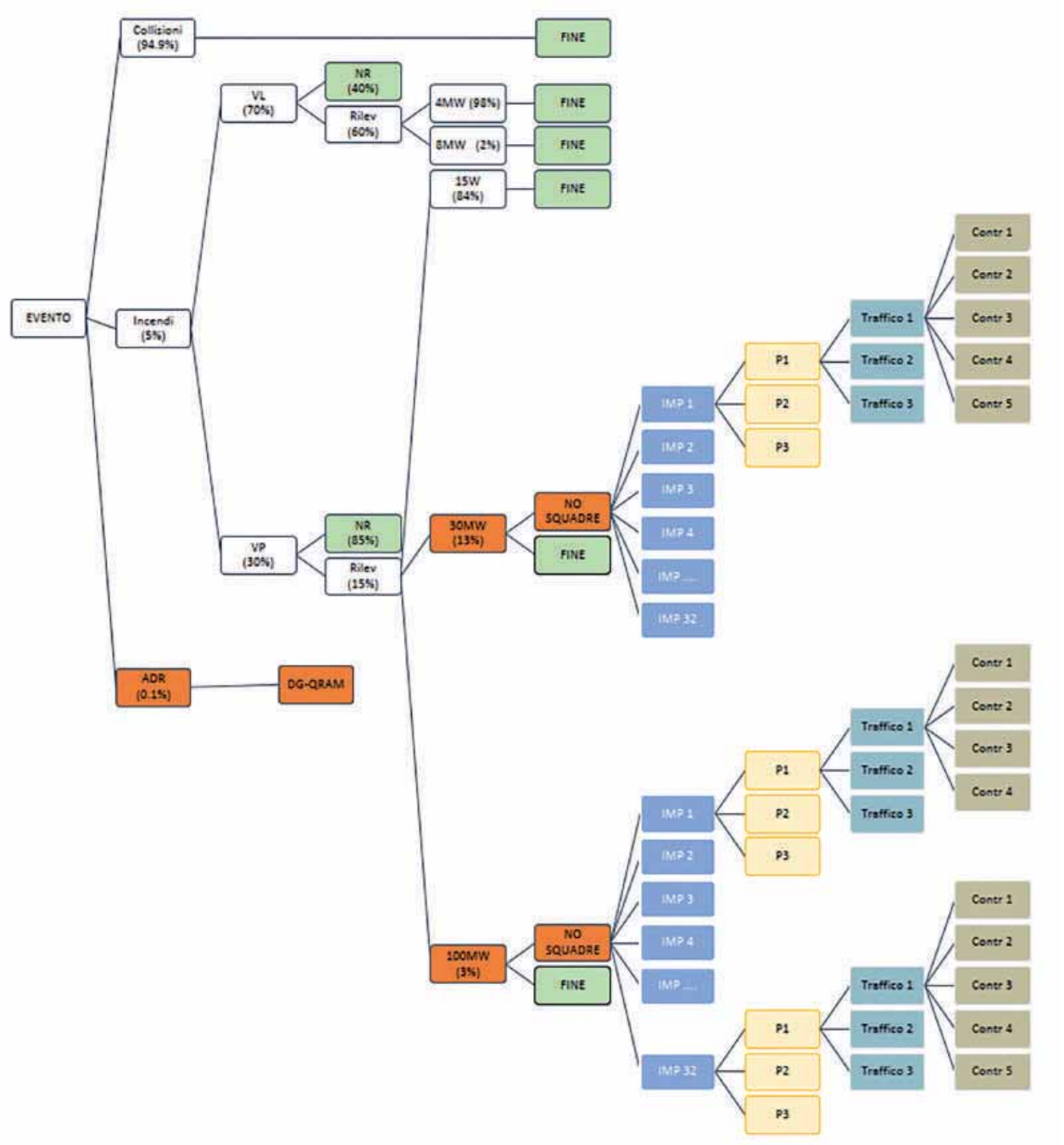


Figure 12; Overall event tree

For the Fréjus, the analysis and decomposition of the tree of events involves the definition of a rather articulated and complex tree of events. This implies a numerosity in terms of the branches of the tree and in the number of resulting scenarios. The analysis of consequences and scenarios must be carried out by considering a rationally identified number of scenarios, each of which must represent a type of event with its relative probability.

The number of branches of the tree is rather large, but the relative probabilities of occurrence rather small. In fact, the numerical development of the analysis showed that the overall probabilities at the end of the individual branches were rather small and that the numerically interesting combinations to be examined were limited. The tunnel's characteristic accident rate, the presence of first intervention teams, and safety measures with rather high levels of reliability lead to overall probabilities ranging from 5.57E-05 to 5.67E-11.

4.1. Modelling: Determining the Consequences of Fire Events

Determining the consequences for the developed event tree requires the use of fluid-dynamic simulations. The presence of the transverse smoke extraction system with longitudinal airflow control means that three-dimensional modelling is required. FDS (Fire Dynamics Simulator) software was used, with the modelled sector being 600m long centred at the fire, 10m wide and 4.5m high.

On the other hand, the risk analysis was conducted in parallel with the "Etude des Dangers", which, according to French regulations, requires the realisation of suitably identified 3D simulations. The choice of the simulations to be carried out for both studies was therefore conducted in parallel, considering on the one hand the results of the overall tree of events and the relative probabilities and on the other hand the requirements arising from the safety dictates of the French risk study.

The choice of scenarios to be simulated is not based solely on the combination of the most probable events, but rather those judged to be the most burdensome in terms of expected consequences. The scenarios identified for the simulations were defined by imposing the worst conditions for ventilation and smoke management, considering extreme conditions for counterpressures associated with normal traffic conditions. In fact, this combination associates the maximum piston effect due to heavy vehicles with a strong back pressure that tends to accentuate this effect, a combination that makes the management of the air current less easy and therefore the initial evacuation conditions more onerous.

The choices of simulations made for the ESD are consistent with the requirements of the Italian risk analysis, which, starting from the same analyses, elaborates them by associating the simulations of user exodus in that particular condition and determines the relative consequences in terms of victims. The Italian risk analysis, therefore, incorporates the ESD simulations and associates them with the relative probabilities of occurrence, making them an integral part of the analysis and its complementary cumulative curve.

The fire sources considered are:

- Classic HV fire - power 30MW
- HV fire with flammable liquid load - power 100MW

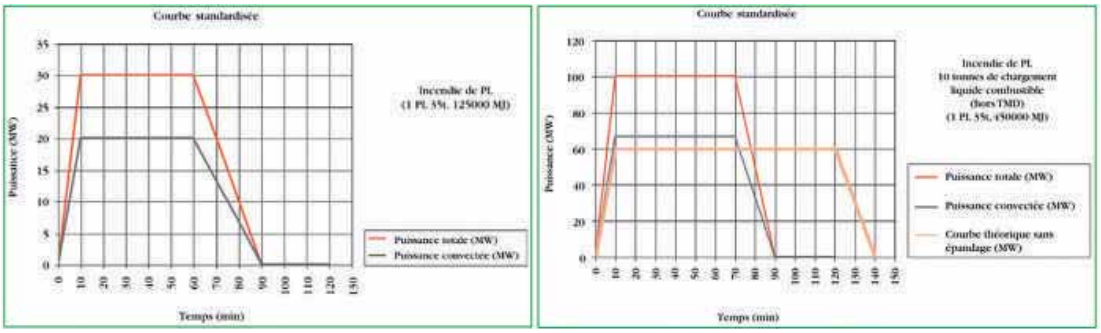


Figure 13: Fire sources

The CFD simulations carried out made it possible to quantify the consequences for the users present, by examining the escape of users and the relative parameters reached by each user and their survival thresholds. The exceeding of these thresholds defines the consequences for each user. For the Italian risk analysis, the only consequences to be considered are the exceeding of the thresholds that result in fatalities.

A total of eight scenarios were identified to be analysed for this type of fire. Since the tunnel is sized for 30MW fires, handling this type of event is not problematic. Therefore, the events that could put the system in difficulty were chosen, associating the most onerous condition for heavy traffic with a greater pressure difference and including the presence of a bus in this context, one scenario for each previously identified fire location.

In contrast to 30MW fires, the Frejus facilities are not designed to handle 100MW power. On the other hand, the Italian risk analysis expressly requires the system to be analysed as a whole according to the type of event to which it could be subjected. Although highly unlikely, such fires were therefore analysed in detail. Fourteen separate simulations were carried out to consider the different effects due to location, the operation or non-operation of the systems and the remaining parameter variations. Again, the final probability tables showed a small number of cases to be analysed with rather low probabilities.

As in the previous scenarios, not the most probable combinations of events were analysed, but those with the greatest consequences due to more severe traffic conditions combined with extreme backpressure conditions.

In addition, simulations with the presence of buses, chosen from the 3 separate locations, were also included in this case.

Le simulazioni CFD realizzate hanno consentito di quantificare le conseguenze per gli utenti presenti, esaminando l'esodo degli utenti ed i relativi parametri raggiunti dal singolo utente e le relative soglie di sopravvivenza. Il superamento di tali soglie definisce le conseguenze per ciascun utente. Per l'analisi di rischio italiana le uniche conseguenze che devono essere prese in considerazione sono il superamento delle soglie che comportano un decesso.

Figure 14: Exemple of simulation, 100MW temperature trends

Finally, for homogeneity with the remaining fire scenarios, the 200MW fire was also simulated. An event of this magnitude may be generated by vehicles transporting dangerous goods, ADR, which are subject to specific escorts.

An event of this magnitude is rather improbable but was estimated as interesting in order to evaluate the possible consequences in a homogeneous manner with the other fires simulated.

For each simulated scenario, an analysis of the exodus of users, with or without the presence of buses, determines the consequences of the scenario.

The determination of the consequences was carried out with the aid of the EVAC software directly coupled to FDS, which allows the physiological consequences for users to be evaluated through the FED (Fractional Effective Dose) and the reduction in evacuation speed of users based on visibility.

The results of the FDS+EVAC simulations are briefly described and reported in the table below. The simulations carried out for the Italian risk analysis also take into account the partial or total malfunctioning of plant families, which is not the case in the simulations carried out for the French risk study.

Table 2: Realised simulations and results

Power	Position	Trafic	Pressure	Ventilation	Barriers	Bus	Scenario	Severity side France	Severity side Italy	Severity side considered
30 MW	PM 1350	Normal	-200 Pa	OK	OK	Yes	1	0	0	0
					No	No	2	0	0	0
	PM 6530	High	+ 75 Pa	OK	OK	Yes	3	0	0	0
					No	No	4	0	0	0
	PM 8806	Normal	+380 Pa	OK	OK	Yes	5	0	0	0
					No	No	6	0	0	0
		Normal	+380 Pa	No	OK	No	7	0	0	0
		High	+ 75 Pa				8	0	0	0
100 MW	PM 1350	Normal	-200 Pa	OK	OK	Yes	9	5 (53 si bus)	9 (40 si bus)	62
					No	No	10	5	17	22
		High	+ 75 Pa	OK	OK	No	11	0	9**	9**
					No		12	0	0	0
	PM 6530	Normal	-200 Pa	OK	OK	Yes	13	14 (64 si bus)	3 (15 si bus)	67
					No	No	14	14	0	14
		High	+ 75 Pa	OK	OK	No	15	5	0	5
					No		16	3	0	3
	PM 8806	Normal	+380 Pa	OK	OK	Yes	17	0 (15 si bus)	8 (56 si bus)	56
				No			17 bis	0	20 (68 si bus)	68
				OK	No	No	18	0	6	6
		High	+ 75 Pa	OK	OK	No	19	0	0	0
				No			19 bis	0	17	17
				OK	No		20	0	0	0
200 MW	PM 6530	Normal	+ 75 Pa	OK	OK	No	21	11	11	22

The last column shows the overall consequences defined for each scenario. In the case of the scenario with the presence of buses, the position of the bus on both sides was assessed and considered for the worst-case scenario.

An initial analysis reveals the following conclusions:

- The 30MW fire scenarios do not generate any consequences even in the presence of buses.
- The 30MW fire scenarios analysed considering a complete failure of the ventilation system and therefore a total absence of the ventilation system, did not generate any consequences even under extreme traffic and backpressure conditions.
- The only events generating consequences in some cases are events with larger fires of 100 and 200MW. The greatest consequences are found in the presence of buses with a greater number of users exposed to the event.
- There remain some scenarios with fires equal to 100MW that do not involve consequences for users.

These observations allow an initial return of the simulations, while the overall data must be combined with the relative probability of occurrence to define the FN curve.

The Italian standard requires the results of the risk analyses to be represented on the ALARP acceptability diagram. The following graph shows the results of fire events only.

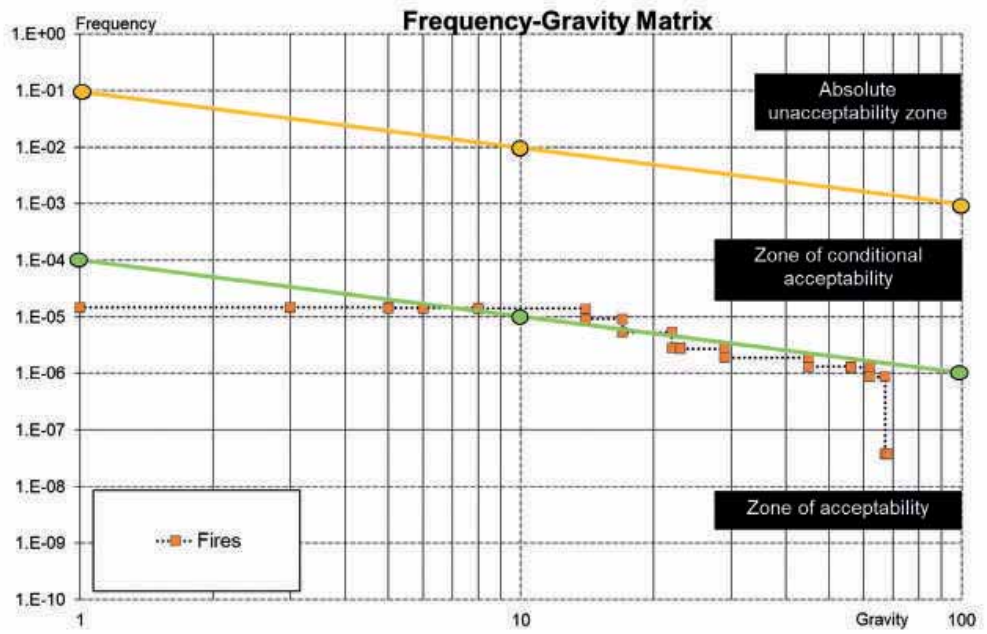


Figure 15: Frejus curve only fires

4.2. Risk Analysis: DG Qram

The estimation of risks related to the transport of dangerous goods in the Fréjus tunnel under current tunnel operating conditions is carried out with the help of the OECD QRA model and PIARC (version 4.04) in its latest version (2019). The OECD/PIARC QRA Model, is probably the most widely used model for the risk assessment of dangerous goods trans-port through road tunnels.

The Frejus tunnel is classified as category C according to ADR 2017 and the transit of ADR goods through the tunnel is escorted. The type and quantity of ADR vehicles circulating through the tunnel are recorded on a case-by-case basis, and the resulting analysis was carried out using data characteristic of the tunnel itself. The QRA model considers 13 different scenarios, but for category C of the Frejus only some of them have been considered: 3- Boiling liquid expansion vapour explosion (BLEVE) of liquefied petroleum gas (LPG) in cylinders; 4- Gasoline pool fire; 5 - Vapor cloud explosion (VCE) of gasoline; 12 - Acrolein in cylinders release; 13 - BLEVE of carbon dioxide in bulk.

The most important inputs of the model include the technical characteristics of the tunnel and the traffic data. The outcome of the model is the average annual number of fatalities caused by accidents involving dangerous goods which is called expected value (EV), as well as the relevant F/N curves which present graphically the frequency (F) of accidents with N or more fatalities.

The results for dangerous goods are shown in the figure below.

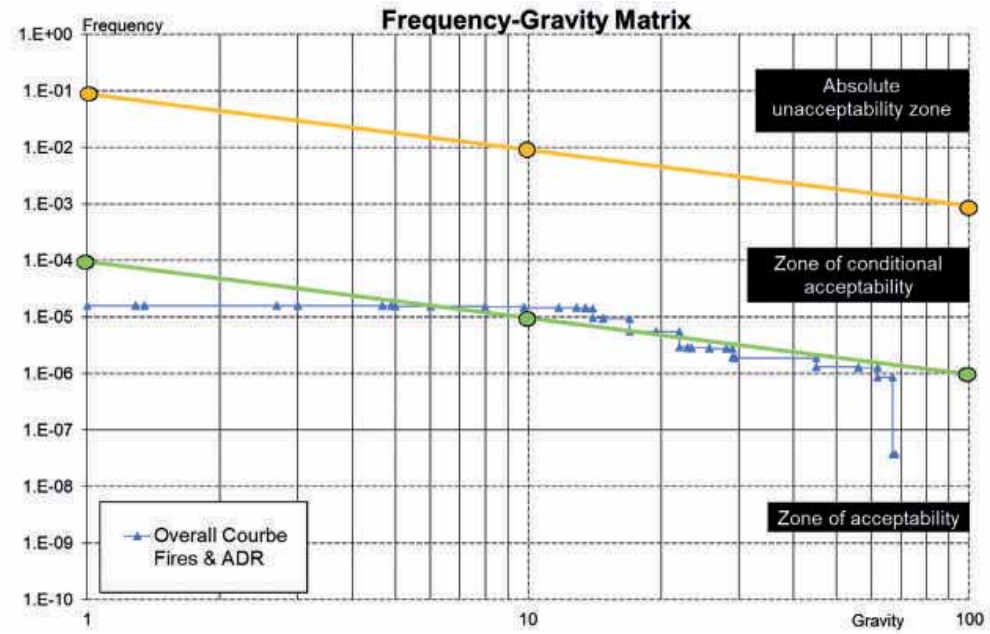


Figure 16: Frejus curve only ADR

4.3. Global Result Italian Risk Analysis

The analysis carried out led on the one hand to the definition of an event tree, the choice of a limited number of scenarios and their simulation and the construction of a cumulative curve, while on the other hand the application of QRAM led to the definition of a curve relating to the risk arising from the transit of dangerous goods.

The two previous curves were integrated to define an overall cumulative curve for the Frejus tunnel and is shown in the figure below.

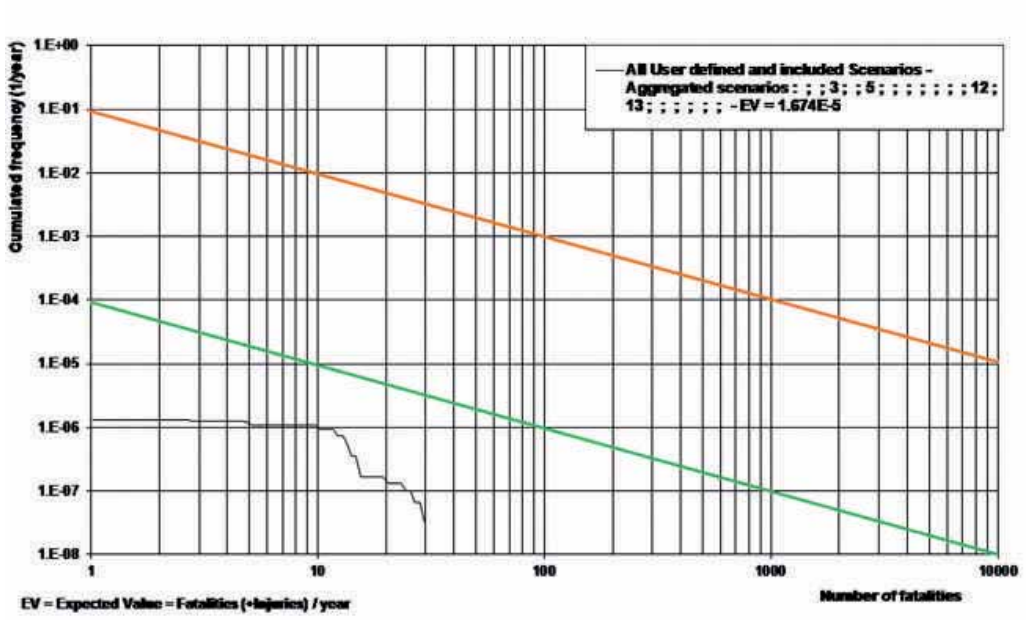


Figure 17: Frejus curve overall

The result is a curve that for some points skirts the conditional acceptance zone but remains for the majority of its course in the acceptability zone.

5. PARALLELISM BETWEEN THE TWO METHODOLOGIES AND CONCLUSIONS

The two Italian and French methodologies start from the basic definition, the contextualisation of the work and the analysis of the security measures present in it. From this point on, the two methodologies take different paths, parallel but with different assumptions.

The French methodology continues by making an analysis of the system which leads to the definition of the tunnel management criteria, the definition of the Minimum Operating Conditions and the Internal Safety Plan, while the Italian methodology includes these aspects directly in the risk analysis. Thus, in carrying out the method, the French part essentially considers the MOCs to be applied and therefore the systems are given as functioning while the Italian method acquires the data of the safety measures and by means of a probabilistic analysis attributes to the individual systems and to their management a probability of correct functioning and a probability of failure. The risk analysis therefore also considers failed systems and assesses the consequences of scenarios with degraded systems, while the scenario analysis carried out for the French method always considers all systems as functioning.

The French ESD allows a small number of scenarios to be studied in detail with the modelling of both phenomenon progress and user behaviour and quantitative assessment of consequences. This detail analysis identifies the strengths and possible weaknesses of the "tunnel" system in order to improve it. Due to this limited amount of scenarios, the French ESD provides only an overall qualitative risk assessment based on experience.

The Italian method, on the other hand, considers a larger number of scenarios that cannot all be studied in detail, but which allow a frequency/severity curve to be constructed and thus a quantified risk estimate to be made.

The two methodologies are therefore substantially different and not directly comparable. However, they provide different information on tunnel safety that is complementary. The French method provides important information on the most serious cases while the Italian method provides an overall view of the behavior of the tunnel system in different situations.

With regard to the results of the studies, it should be noted that:

- In both studies, relating to fire risk, it appears that the reference fire of 30 MW can be perfectly controlled by the technical, human and organisational devices of the structure.
- In both studies, it can be seen that fires of 100 MW, especially in the presence of buses, can have significant consequences.

In the end, therefore, we have the same type of analysis, although it differs in form: on the one hand, the French method treats them qualitatively, basing itself on the technical and operational arrangements of the GEF deduces the reduced severity of the scenarios; on the other hand, the quantification of the same operational arrangements, i.e. specifically the first intervention teams, leads to an extremely low probability of high-risk situations for users, which leads to a position of the Fréjus F / N curve on the low end of the reference curves.

A RISK-BASED APPROACH FOR DESIGN, OPERATION, AND MAINTENANCE OF ROAD TUNNELS

Søren Randrup-Thomsen
Head of Department, Risk and Safet; Ramboll Denmark

Kristina Hoffmann
Chief Project Manager, Risk and Safety; Ramboll Denmark

The EU-directive on tunnel safety from 2004 allows for performing risk analysis to demonstrate sufficient safety of road tunnels in operation. Ramboll has in this relation - as a Client Consultant for e.g., the Danish Road Directorate and Sund & Bælt A/S – prepared risk analysis studies for several road tunnels in Denmark – both as input to design of new tunnels and as input to changes in safety system and operational or maintenance procedures for tunnels already in operation.

This paper covers the basic concepts in using risk analysis as a tool for decisions of design parameters, operational procedures, and maintenance activities. This includes setting up risk targets (user safety, worker safety, tunnel availability etc.) and the establishment of quantified risk acceptance criteria related to these risk targets. Further, identification of accident scenarios and the subsequent risk modelling of these scenarios are described. For all the identified accident scenarios risk modelling are made to quantify both the probability of occurrence of the accident by use of e.g., accident statistics and the consequences if the accidents occur (by e.g., evacuation studies) such that the total risk of a specified tunnel can be determined by summing up risk contributions for all relevant scenarios.

Examples from using this risk-based approach are given for different Danish tunnels. This includes the Fehmarnbelt Tunnel (18 km immersed tunnel between Denmark and Germany) and the Nordhavn Tunnel (new tunnel in Copenhagen) where risk-based design has been used as a tool in the design phase for choosing or optimizing design parameters. Further, for the Frederikssundsvej Tunnel and the Guldborgsund Tunnel, which are tunnels that have been in operation for many years, examples are given on how to use the risk analysis to optimize operational procedures and maintenance activities.

UN ENFOQUE BASADO EN EL RIESGO PARA EL DISEÑO, LA EXPLOTACIÓN Y EL MANTENIMIENTO DE LOS TÚNELES DE CARRETERA

La directiva de la UE sobre la seguridad en túneles del 2004 permite realizar análisis de riesgo para demostrar la suficiente seguridad de los túneles de carretera en funcionamiento. Ramboll ha preparado, en relación con esto, como Consultor de cliente, por ejemplo, el Directorado Danés de Carreteras y Sund & Bælt A/S, estudios de análisis de riesgo para varios túneles de carreteras en Dinamarca, tanto como aportación para el diseño de nuevos túneles y como aportación a cambios en el sistema de seguridad y en los procedimientos operativos o de mantenimiento para los túneles en funcionamiento.

Este documento cubre los conceptos básicos a la hora de usar el análisis de riesgos como herramienta para las decisiones de los parámetros de diseño, procedimientos operativos y actividades de mantenimiento. Esto incluye establecer objetivos de riesgo (seguridad del usuario, seguridad del trabajador, disponibilidad del túnel, etc.), y el establecimiento de un criterio cuantificado de aceptación de riesgos relacionado con estos objetivos de riesgo. Además, se describen la identificación de escenarios de accidentes y el posterior modelado de riesgos de estos escenarios. Para todos los escenarios de accidente identificados, la modelación de riesgos se realiza para cuantificar la probabilidad de que se produzca un accidente mediante el uso de, por ejemplo, estadísticas de accidentes y las consecuencias si se producen accidentes (mediante, por ejemplo, estudios de evacuación) como que el riesgo total de un túnel especificado puede determinarse totalizando las contribuciones de riesgos para todos los escenarios relevantes.

Se dan ejemplos del uso de este enfoque basado en riesgos para los diferentes túneles daneses. Esto incluye el Túnel Fehmarnbelt (túnel sumergido de 18 km entre Dinamarca y Alemania) y el Túnel Nordhavn (nuevo túnel en Copenhagen) donde el diseño basado en riesgo se ha usado como herramienta en la fase de diseño para elegir u optimizar los parámetros de diseño. Además, para el Túnel Frederikssundsvej y el Túnel Guldborgsund, que son túneles que han estado en funcionamiento muchos años, se dan ejemplos de cómo usar el análisis de riesgos para optimizar los procedimientos operativos y las actividades de mantenimiento.

UNE APPROCHE FONDÉE SUR LE RISQUE POUR LA CONCEPTION, L'EXPLOITATION ET L'ENTRETIEN DES TUNNELS ROUTIERS

La directive de l'UE sur la sécurité des tunnels de 2004 permet d'effectuer une analyse des risques pour démontrer que la sécurité des tunnels routiers en service est suffisante. À cet égard, Ramboll a préparé des études d'analyse des risques pour plusieurs tunnels routiers au Danemark (en tant que consultant client pour, entre autres, la direction routière danoise et Sund & Bælt A/S) à la fois pour contribuer à la conception de nouveaux tunnels et pour contribuer à la modification du système de sécurité et des procédures d'exploitation ou d'entretien des tunnels déjà en service.

Cet article traite des concepts de base de l'utilisation de l'analyse des risques en tant qu'outil de prise de décisions concernant les paramètres de conception, les procédures opérationnelles et les activités de maintenance. Il aborde la définition d'objectifs de risque (sécurité des utilisateurs, sécurité des travailleurs, disponibilité des tunnels, etc.) et l'établissement de critères quantifiés d'acceptation des risques liés à ces objectifs de risque. En outre, l'article décrit l'identification des scénarios d'accident et la modélisation ultérieure des risques de ces scénarios. Pour tous les scénarios d'accident identifiés, une modélisation des risques est effectuée afin de quantifier à la fois la probabilité d'occurrence de l'accident (à l'aide, par exemple, de statistiques sur les accidents) et les conséquences de la survenance de tels accidents (par exemple, au moyen d'études d'évacuation) de sorte que le risque total d'un tunnel spécifié puisse être déterminé en faisant la synthèse des contributions au risque pour tous les scénarios pertinents.

Des exemples d'utilisation de cette approche fondée sur les risques sont fournis pour différents tunnels danois. Ceux-ci incluent le tunnel Fehmarnbelt (tunnel immergé de 18 km reliant le Danemark à l'Allemagne) et le tunnel Nordhavn (nouveau tunnel de Copenhague), pour lesquels la conception basée sur les risques a été utilisée en tant qu'outil dans la phase de conception pour choisir ou optimiser les paramètres de conception. En outre, pour le tunnel Frederikssundsvej et le tunnel Guldborgsund, qui sont en exploitation depuis de nombreuses années, l'article fournit des exemples d'utilisation de l'analyse des risques visant à optimiser les procédures opérationnelles et les activités de maintenance.

INTRODUCTION

There has historically been a strong focus on safety related to tunnel operation. History has shown numerous examples of accidents in tunnels with very severe outcome and for this reason it is obvious that there is a strong focus on the safety of tunnels in operation. Hence, the need of procedures to document if safety is sufficiently handled is evident and the EU-directive on tunnel safety from 2004 allows for performing risk analysis to demonstrate sufficient safety of road tunnels in operation.

The following sections go through the basic concepts in using risk analysis (ORA – Operational Risk Analysis) as a tool for decisions of design parameters, operational procedures, and maintenance activities. This includes setting up risk targets (user safety, worker safety, tunnel availability etc.) and the establishment of quantified risk acceptance criteria related to these risk targets. Further, identification of accident scenarios and the subsequent risk modelling of these scenarios are described. Finally, evaluation of the calculated total risk against established acceptance criteria are discussed and examples of the procedure for tunnels in design phase and in operational phases are given.

METHOD FOR THE ORA

As described in the previous section, the EU-directive allows the use of risk analysis to document that the risk of human safety for users of a tunnel is at an acceptable low level. However, no specific methods for applying risk analysis are given in the directive. Hence, the following descriptions is a proposed method for applying risk analysis both in early design phases and during the daily operation of the tunnel.

General risk analysis approach

The overall purpose of using risk analysis is to identify risks related to the given situation, to quantify the risks and to identify risk reducing measures aiming at maintaining the overall risk at an acceptable level. This is sketched in Figure 1 below.

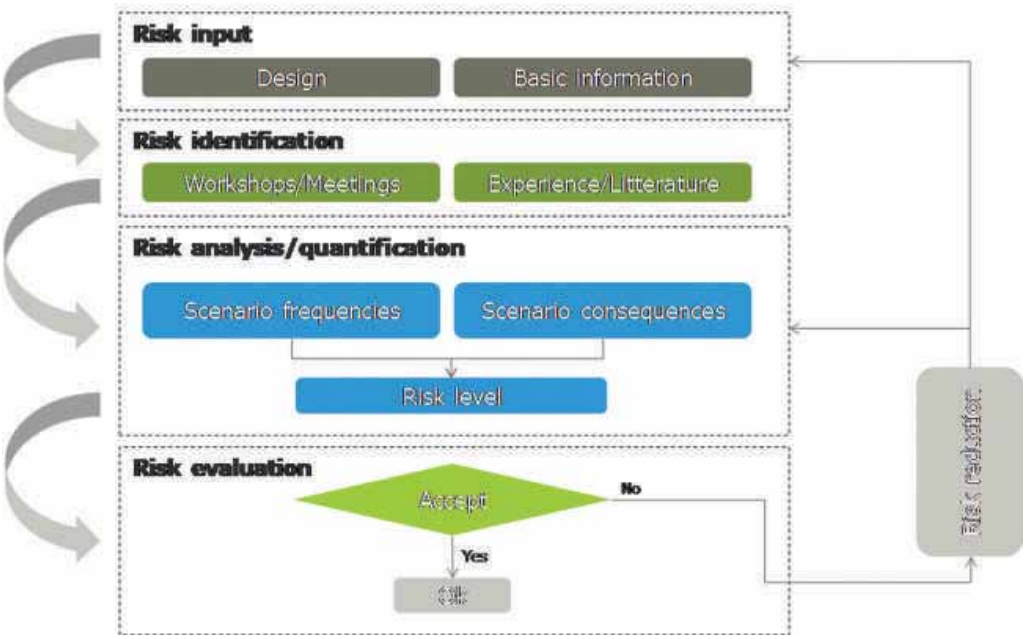


Figure 1 Procedure for evaluating risks

As seen from the sketched procedure, it is relevant to establish the background information to be used in the risk analysis - both in terms of the given design of the tunnel (cross sections, ventilation principles, operational rules, installed safety equipment etc.) and in terms of the traffic composition in the tunnel (total traffic volume, traffic composition, extend of dangerous goods transports etc.).

Based on the established background information the operational risk analysis procedure includes as a very basic step with identification of hazards - events that under various circumstances can lead to accidents in terms of human injuries/fatalities and/or total or partly closure of the tunnel in a period. The risk identification activity must hence cover all imagined types of accidents and should include considerations related to ordinary operation, planned and unplanned maintenance, accident situations etc. For this reason, the identification process often includes workshops with experts within various fields - designers, fire experts, operational staff, emergency response staff.

When hazards are identified and systematically described, the risk analysis part is initiated. This includes analysis of the identified hazards to determine how often the hazard will occur (often based on statistics and presented as occurrences per year) and modelling of the consequences if the hazard appears. Consequences will be expressed as number of fatalities or number of down time hours of the tunnel given the accident. The consequence modelling part may also be based on statistics, but often more detailed models are used (e.g., computational models to estimate fires and toxic releases, structural models to estimate damages due to collisions). By combining the frequency and the consequence for a given hazard, a risk contribution in terms of number of fatalities per year or number of disruption hours per year is estimated.

The final risk is then calculated by summing up all risk contributions and afterwards compared to an established risk acceptance criterion. This criterion may be given by national authorities setting the limit for annual number of user fatalities for the considered structure. However, often such criteria are not available and may be set when starting up the project. A commonly used approach is to allow the same number of annual fatalities as seen for comparable projects - or to strengthen requirements just a little compared to similar projects to increase safety. When looking at disruption periods this may be more locally determined and depends very much on the traffic patterns close to the tunnel and the consequence for the users not being able to use the tunnel and hence must take other delaying routes.

An overview of the described activities is shown below in Figure 2.

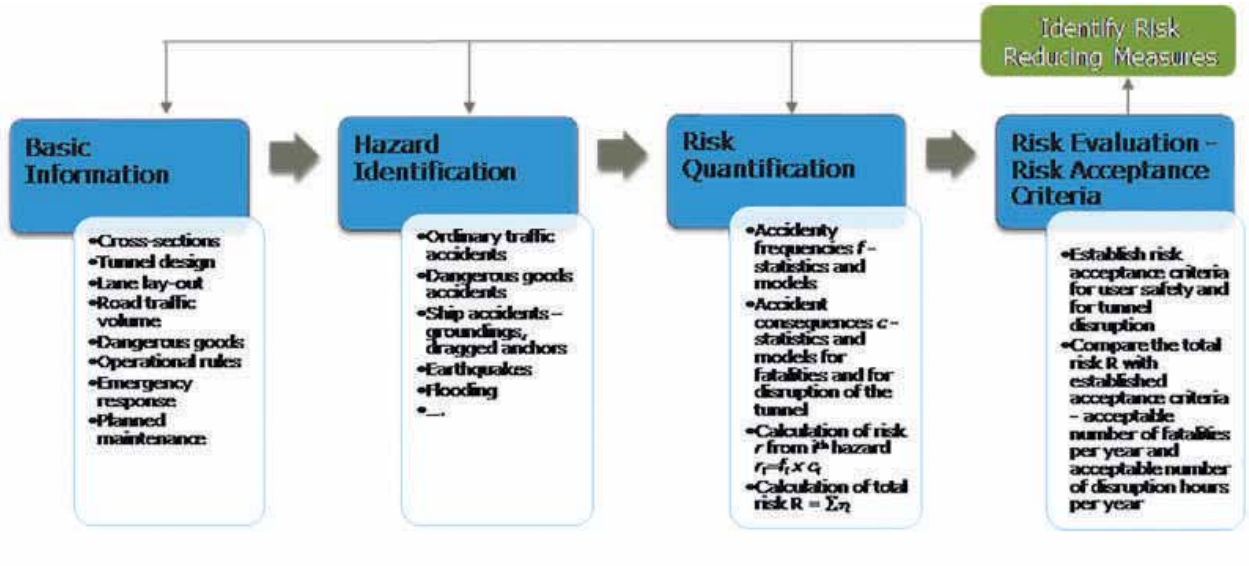


Figure 2 Detailed description of content in risk analysis procedure

It is emphasized that the whole purpose of using this procedure is not simply to prove that a given design of a tunnel and set of related operational rules satisfies given requirements for safety of the tunnel. The procedure must be seen as a tool to be used for optimizing design parameters and operational parameters. In this way, the risk analysis will show how risk is changing when changing input parameters. Hence, the procedure becomes an efficient tool for designers to choose between different design options and for operators selecting the optimal maintenance strategy. Examples in design phases includes e.g., determination of emergency door distances, choice of emergency lane versus lay-by, selection of transverse or longitudinal ventilation. In operational phases this may include e.g. speed limits in given periods, closing of one or more lanes during maintenance, choice of time periods for doing maintenance.

All these examples changes some of the risk contributions when selecting alternative parameters and the balancing of various risk contributions (ordinary accidents, fires, dangerous goods accidents, external accidents) changes. The principle is sketched in Figure 3.

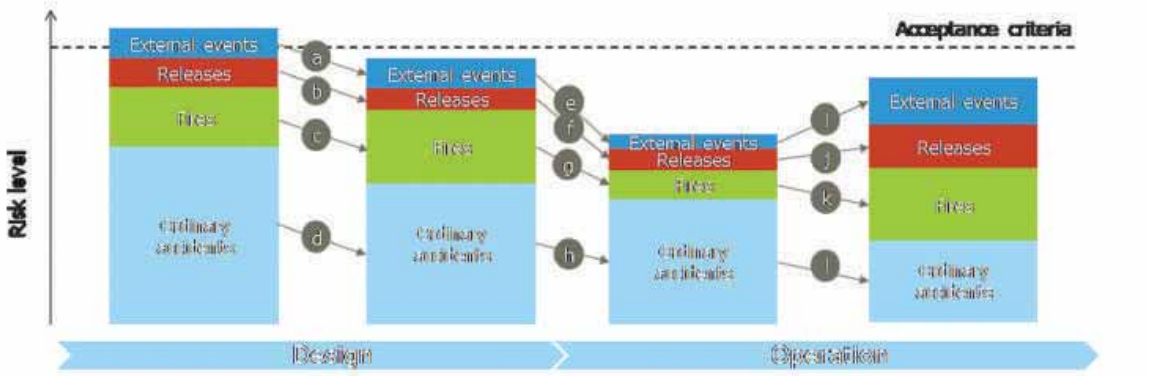


Figure 3 Balancing risk during lifetime of the tunnel.

From Figure 3 it is seen that the risk is changing over time because of changes in design or operational parameters. It should in this relation be emphasized that the proportion of the various risk contributions is only indicative. In fact, it turns out that the risk related to ordinary traffic accidents by far constitutes the largest part of the risk – in examples shown in later sections this is much more than 95% of the total risk.

Figure 3 shows examples of changes in different phases, the design phase, transition from design to operation and operational phase. Examples of these changes in risk are given in the following.

Change in risk during design phase

During design phase several different designs are eventually investigated. These different design proposals are brought into consideration for many different reasons – they may be better financially, structurally or may be considered to increase traffic flow and capacity. Examples of design changes for changing risks related to external event a), to release b), to fires c) and to ordinary traffic d) may be:

a) Strengthening dikes in portal areas to lower probability of flooding

b) More efficient drainage to lead spilled material into dedicated zones

c) Increased efficiency of ventilation systems to ventilate smoke from accident areas

d) Widen cross section of tunnel to allow for emergency lanes

These design changes may have a financial effect but will on the same time be lowering the risk, so it will always be a balancing of safety and economy. The risk-based approach ensures however, that the final design solution will not jeopardize the risk acceptance criteria.

Change in risk when going into operation

When a tunnel goes into operation, various operational procedures and systems are provided to ensure safety for the users and/or to manage daily maintenance situations most effective. Examples of this may be:

e) Flooding detection systems

f) Heat detection

g) Restrictions on dangerous goods

h) Speed limitations

The effect on risk will depend on the effectiveness of the systems and the system availability, but these are all quantifiable and hence applicable in assessing the risk.

Change in risk in operational phase

During the operational phase, changes in use of systems, installation of new and better systems, replacements etc. will be carried out. The tunnel operator will naturally gain experience in the daily operation and will ensure to operate the tunnel in the most effective way and hence introduce methods and procedures to support this. Examples of this may be:

i) Removing detection systems never into use

j) Relaxing restrictions on dangerous goods

k) Lowering capacity on ventilation systems

l) Ensuring that bidirectional traffic is not applied in maintenance situations

Some of the changes in parameters are made to bring the risk down to a sufficient low level not violating the acceptance criteria, whereas other changes may simply be made to have a more efficient way of handling daily operation. But the procedure ensures that the effect of making changes is transparent and it documents if this will have any influence on the overall safety of the tunnel.

In the following sections, examples on use of this procedure are given for several tunnels in Denmark. Two examples are given for tunnels in the design phase (the Fehmarnbelt Tunnel and the Nordhavn Tunnel), and two examples are given for tunnels in operation (the Frederikssundsvej Tunnel and the Guldborgsund Tunnel).

EXAMPLES

Fehmarnbelt Tunnel

The Fehmarnbelt Tunnel will be an 18 km long tunnel between Denmark and Germany under the Fehmarnbelt. The construction started in 2021 and the tunnel is expected to open in 2029. The tunnel is part of the future European transportation network, and it will connect Scandinavia and Central Europe with a more direct route. The tunnel will be the world's longest immersed tunnel.

The tunnel will consist of 4 tubes: 2 road tubes (one in each direction) and 2 rail tubes (one in each direction). For each road tube there is two driving lanes plus an emergency lane of width 2.5 m. Each rail tube has one track. In Figure 4 a sketch of the cross section of the Fehmarnbelt Tunnel is shown.

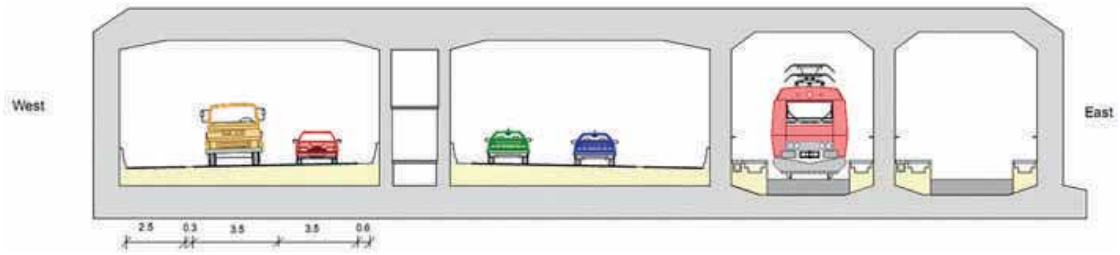


Figure 4 Cross section of the Fehmarnbelt Tunnel

Safety for the users of the tunnel has from the beginning of the project been considered in the design of the tunnel. Some of the safety measures in the tunnel are:

- Road:
  - One directional traffic
  - Emergency lanes
  - Constant lighting
  - Maximum distance of 110 meters between emergency exits
  - Ventilation system which can supplement the natural ventilation in case of heavy traffic or fire – the ventilation system can control the direction of smoke in case of fire
  - Abnormal traffic situations are automatically detected
  - Variable traffic signs with speed limit and traffic information
- Rail:
  - Sidewalks
  - Protection system to avoid derailment
  - European Railway Traffic Management System (ERTMS)

In the beginning of the project an initial Operational Risk Assessment (ORA) was prepared. During the design phases the ORA has been updated several times.

All the above safety measures are directly or indirectly included in the ORA for the Fehmarnbelt Tunnel. Some of the safety measures have been in the project and in the ORA from the beginning and other have been added to the design during the development of the project with the risk-based design approach.

The ORA for the Fehmarnbelt Tunnel has also been used to verify if the impact to the risk level of certain restrictions for dangerous goods on the railway tunnel.

The impact from the following restrictions on the railway tunnel is tested in the ORA:

- Freight trains with RID-classified goods are only allowed in the tunnel if there are no passenger trains at the same track.
- Freight trains with dangerous goods classified as RID class 1 or RID class 1.5 or 1.6 are only allowed in the tunnel, when no other trains are in the tunnel, irrespective of tunnel tube.
- Freight wagons with dangerous goods classified as RID class 1 are only allowed to transport 1000 kg explosive goods per train wagon.

The assessment of the restrictions showed that restrictions to dangerous goods transportation in the railway tunnel only have an insignificant impact on the safety and hence no restrictions are planned.

Another example from the Fehmarnbelt Tunnel is the assessment of risk of flooding of the tunnel which at fist was made separately and afterwards added to the sum of risks in the ORA for the tunnel to evaluate the contribution from flooding compared to the total risk in the ORA.

Nordhavn Tunnel

The Danish Road Directorate is building a tunnel at Østerbro in Copenhagen. The tunnel will be 1.4 kilometer long and is planned to open in last part of 2027. The tunnel will be connected to the existing Nordhavnsvej Tunnel, and the total length of the connected tunnel will be 2 kilometers.

The tunnel will have two tubes with 2 lanes in each and in addition to the lanes there will be 1 meter of emergency rebate in each tube.

The tunnel is equipped with mechanical and electrical installations in the form of traffic control systems and monitoring systems, lighting, ventilation, water mist systems, emergency doors, and more.

The tunnel will connect Nordhavn (a new city part of Copenhagen) with Østerbro and the rest of Copenhagen, see Figure 5.

Figure 5 Location of the Nordhavn Tunnel in Copenhagen.

In the opening year it is expected that the traffic volume in the Nordhavn Tunnel will be 8200 vehicles per day.

The tunnel project will be prepared for a future Eastern Ring Road. If the Eastern Ring Road is constructed it is expected that the traffic volume in the Nordhavn Tunnel will increase to 70.600 vehicles per day.

In the ORA the high number of vehicles per day is used to ensure that the Nordhavn Tunnel can contain this high number of vehicles per day when keeping the risk level below the acceptance criteria.

The above-mentioned safety measures are directly or indirectly included in the ORA for the Nordhavn Tunnel.

The ORA for the Nordhavn Tunnel has been used to calculate the requirements for the reliability of the ventilation system and the water mist system in the tunnel. The analysis also showed that the total risk level is more sensitive to changes in the reliability of the ventilation system than to changes in the reliability of the water mist system. Hence, more effort could be used a reliable ventilation system.

In the early design phases of the tunnel many advanced simulations of the ventilation system were made to make sure that the ventilation could handle both normal operation, and smoke from fires of different sizes.

Frederikssundsvej Tunnel

The Danish Road Directorate operates several smaller tunnels in Denmark and has decided that all tunnels must comply with requirements from the EU-directive – also if they are not actually required to do so because being below minimum requirements – length below 500 m.

The Frederikssundsvej Tunnel in Copenhagen is 367 m long and directs road traffic through two tunnel tubes. The tunnel's two tunnel tubes carry outward traffic away from Copenhagen City and inward traffic towards Copenhagen City. In each tunnel tube there are two lanes, an emergency lane, and a narrow emergency pavement on each side of the lanes. Pedestrians and cyclists do not have access to the tunnel.

The tunnel work was put out to public tender in December 1967, and the construction time was set at one and a half years. Construction began in the spring of 1968, and the tunnel was opened in October 1969. The tunnel is constructed as a cut-and-cover tunnel.

Operational Risk Analysis of the tunnel was carried out 10 years ago, and as a result some issues came up around the tunnel ventilation – both in terms of ventilation during self-evacuation phases of the tunnel, but also for smoke dispersion out of the tunnel effecting 3rd party in housing areas nearby. For this reason, consequence assessments for road users and for 3rd party were carried out in terms of detailed CFD (Computatinal Fluid Dynamics) simulations of smoke dispersion.

For the risk for users of the tunnel these CFD-simulations were combined with emergency evacuation simulations in order to compare Available Safety Egress Time (ASET) with Required Safe Egress Time (RSET) to determine estimated number of fatalities if a fire accident should occur. Combined with statistics for annual fire frequencies per driven kilometer, the risk contribution from fire accidents is calculated. Illustrations of CFD-simulations and evacuation simulations are shown in Figure 6.

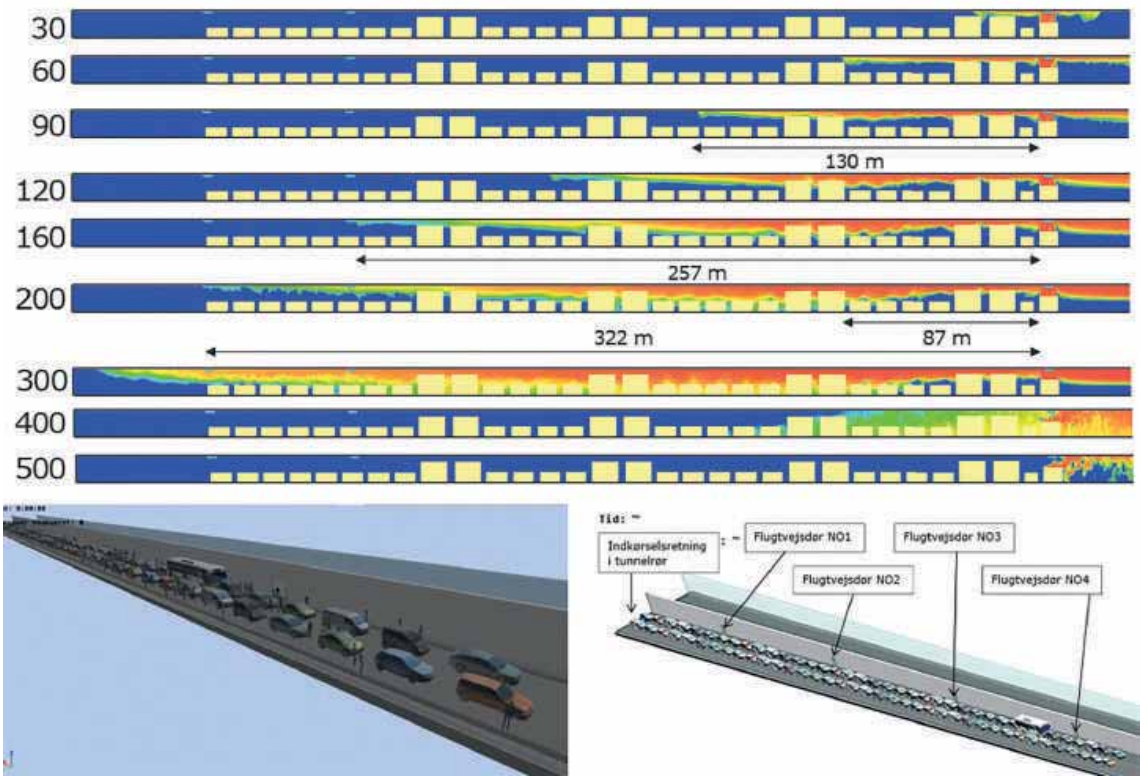


Figure 6 CFD-simulations and emergency simulations for the Frederikssundsvej Tunnel.

The risk calculations did show that the risk contribution from the fire scenario did only take up a very small proportion of the total risk and did hence not pose any unacceptable risk for the road users.

The ORA usually include risk for users and maintenance personnel, but for this specific tunnel risk for 3rd party was examined separately for a scenario were smoke and eventually toxic releases affects nearby housing areas. The CFD-simulations showed that housing areas were only affected to a minor degree. Further, the low frequency for the scenario combined with unfavorable wind directions resulted in a risk contribution far below acceptance criteria for 3rd party set up by environmental authorities in Denmark.

Guldborgsund Tunnel

The Guldborgsund Tunnel is an immersed tunnel, with a length of 460 meters, under Guldborg Sound in the southern part of Denmark. The tunnel connects two small islands: Lolland and Falster. The tunnel has two tunnel tubes with two lanes in each.

The tunnel forms an important connection on Sydmotorvejen which is part of the European Road E47. The general speed limit on Sydmotorvejen is 110 km/h, but the speed limit in the Guldbordsund Tunnel is 90 km/h due to the lack of emergency lanes.

The Guldborgsund Tunnel consists of two elements, each 230 meters long. The tunnel elements were built in a dry dock on Lolland. The first element was sailed out of the dry dock in November 1986. Almost a year later in September 1987, the second element was sailed out into place. The tunnel elements were then cast together and connected to the landside facilities, and the tunnel opened in June 1988.

During operation of the tunnel, it turned out that the ventilation system did not work as effectively as expected. In relation to risk for the users of the tunnel during a fire scenario, it turned out that the tunnel would be filled with smoke quite fast and evacuation analysis indicated that RSET/ASET times were at critical levels during a fire scenario with larger fires (>20 MW). Hence, CFD models were established to analyze the efficiency of the ventilation systems, especially the location of the ventilators very close to the tunnel openings combined with winds from unfavorable directions. Examples of CFD-simulations are given in Figure 7, where the smoke development over time is shown for a case with a 5 MW fire combined with low wind speed – 5m/s - (left) and a 20 MW fire combined with medium wind speed – 10m/s - (right).

It is seen from Figure 7 that the ventilation system for smaller fires and low wind speed would be able to ventilate the tunnel and push the smoke towards the wind direction. The smoke direction is reverted after approximately 300 s (all ventilators are activated after approximately 270 s) and smoke is pushed out of the tunnel toward the wind direction. For the 20 MW fire with medium wind speed, it is seen that the ventilation system is not able to push the smoke towards the wind not even when all ventilators are activated after 290 s.

Since the fire scenario with smoke filled tunnel tubes did give unacceptable risk contributions, new locations of the ventilators were examined to ensure that the ventilators would be able to turn the smoke also at higher wind speeds. The new ventilation design did hence reduce the fire risk contributions significantly and ensured that the total risk – including fire risk scenarios – was brought to an acceptable level.

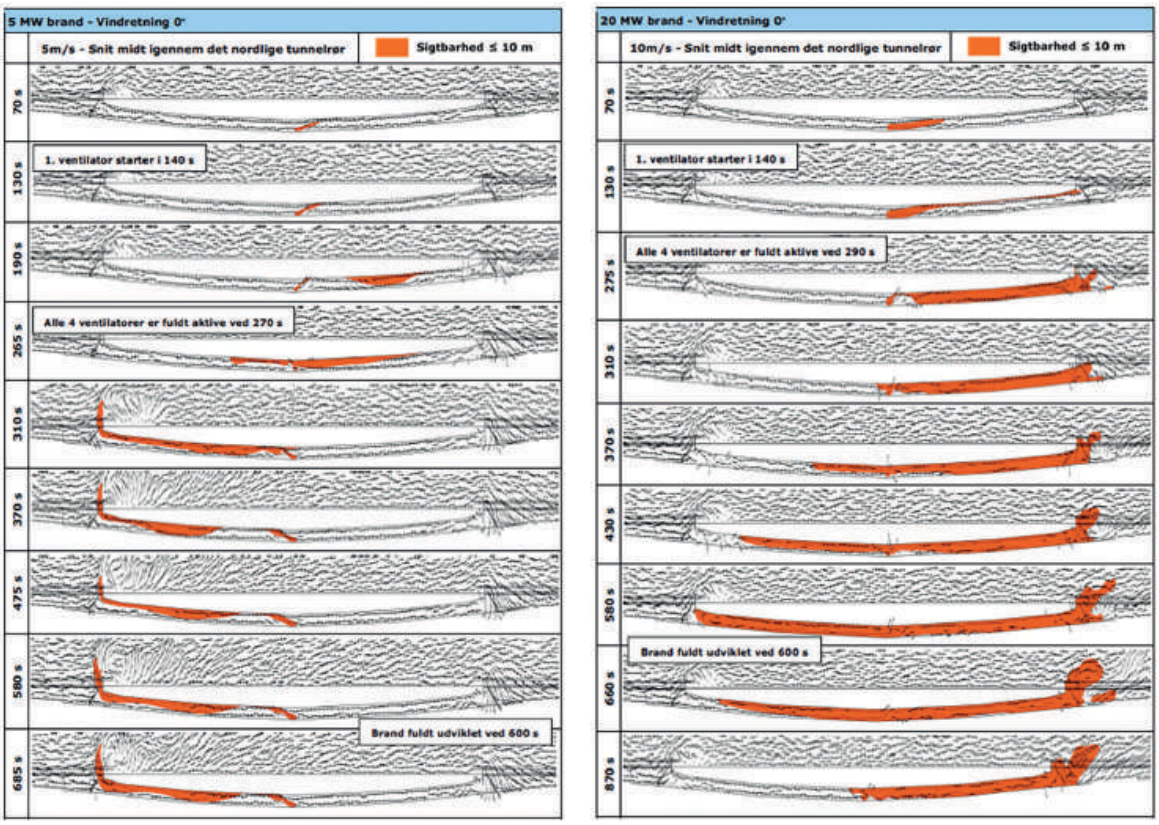


Figure 7 Smoke development over time for 5 MW fire and low wind speed (left) and 20 MW fire and medium wind speed (right).

CONCLUSION AND DISCUSSION

A risk-based approach for designing and operating tunnels is presented. The risk-based approach aims at ensuring that the tunnel owner in a transparent way is able to demonstrate that the overall tunnel safety for users and personnel is at an acceptable level. Further, the risk risk-based approach clearly determines risks from different scenarios and hence enables the owner to implement measures related to lowering the risk for specified scenarios. In this way the owner has a tool for determining which measures to implement in the tunnel to ensure the safety most effectively for the users.

The risk-based approach is in line with the descriptions in the EU-directive allowing for the use of risk analysis for demonstrating sufficient safety for the tunnel users.

SCOPING CROSS PASSAGE ESCAPE DOORS IN NEW TUNNEL WORKS

Basil Fuller
Smoke Control Systems

There really is no (One fits all) solution to this heading statement. Many factors affect the door type, style, and dimension in the operation of a tunnel cross passage fire escape door. Nevertheless, recognizing what the impact factors are, can lead to a fit for purpose specification and subsequent solution. The first point of note is to remember that a fire incident is in a confined space, the tunnel. The direction of attack is always from the tunnel traffic tube side and as such the fire ferocity and re-radiated heat is much higher than a conventional open-air fire, temperatures can reach their peak in a matter of minutes. It is also important to look at this protection measure (the door) from a human life perspective primarily, and an asset protection measure as secondary. For one to escape, the door must work. It is also important to keep in mind that people are not only trying to find a way of escaping the danger. But that firefighters and emergency services are travelling in the opposite direction trying to reach the incident point to save lives and mitigate the incident. Fixed Fire Systems, whilst essential as active sprinkler, mist, or deluge, are there to suppress, and not necessarily to extinguish these fires. So, it is the whole tunnel climate and incident environment that we are trying to manage by design. This short paper focuses on the cross passage escape door Styles.

ESTUDIO DE LAS PUERTAS DE EVACUACIÓN DE LOS PASILLOS TRANSVERSALES EN LAS OBRAS DEL NUEVO TÚNEL

Realmente no hay una solución (una para todos) para esta declaración de título. Muchos factores afectan el tipo de puerta, el estilo y la dimensión en el funcionamiento de una puerta de escape de incendios de paso transversal de túnel. Sin embargo, reconocer cuáles son los factores de impacto puede conducir a una especificación adecuada para el propósito y la solución posterior. El primer punto para tener en cuenta es recordar que un incidente de incendio ocurre en un espacio confinado, el túnel. La dirección del ataque siempre es desde el lado del tubo de tráfico del túnel y, como tal, la ferocidad del fuego y el calor Re irradiado es mucho mayor que un fuego al aire libre convencional, las temperaturas pueden alcanzar su punto máximo en cuestión de minutos. También es importante considerar esta medida de protección (la puerta) principalmente desde la perspectiva de la vida humana, y una medida de protección de activos como secundaria. Para que uno escape, la puerta debe funcionar. También es importante tener en cuenta que las personas no solo están tratando de encontrar una forma de escapar del peligro. Pero que los bomberos y los servicios de emergencia estén viajando en dirección contraria tratando de llegar al punto del incidente para salvar vidas y mitigar el incidente. Los sistemas fijos contra incendios, si bien son esenciales como rociadores activos, niebla o diluvio, están ahí para suprimir, y no necesariamente para extinguir, estos incendios. Por lo tanto, es todo el clima del túnel y el entorno de incidentes lo que estamos tratando de administrar por diseño. Este breve artículo se centra en las operaciones de las puertas de escape de paso transversal

ÉVALUATION DES PORTES D'ÉVACUATION DES PASSAGES TRANSVERSAUX DANS LES NOUVEAUX TRAVAUX DE TUNNELS

Il n'y a vraiment pas de solution (une pour tous) à cette déclaration de titre. De nombreux facteurs affectent le type, le style et la dimension de la porte dans le fonctionnement d'une porte de secours coupe-feu à passage transversal de tunnel. Néanmoins, reconnaître quels sont les facteurs d'impact peut conduire à une spécification adaptée à l'objectif et à une solution ultérieure. Le premier point à noter est de rappeler qu'un incendie se produit dans un espace confiné, le tunnel. La direction d'attaque est toujours du côté du tube de circulation du tunnel et, en tant que telle, la férocité du feu et la chaleur reradiée sont beaucoup plus élevées qu'un feu conventionnel à ciel ouvert, les températures peuvent atteindre leur apogée en quelques minutes. Il est également important de considérer cette mesure de protection (la porte) du point de vue de la vie humaine principalement, et une mesure de protection des biens en second lieu. Pour que quelqu'un puisse s'échapper, la porte doit fonctionner. Il est également important de garder à l'esprit que les gens n'essaient pas seulement de trouver un moyen d'échapper au danger. Mais que les pompiers et les services d'urgence voyagent dans la direction opposée en essayant d'atteindre le point d'incident pour sauver des vies et atténuer l'incident. Les systèmes d'incendie fixes, bien qu'essentiels en tant que gicleurs actifs, brouillard ou déluge, sont là pour supprimer, et pas nécessairement pour éteindre ces incendies. C'est donc l'ensemble du climat du tunnel et de l'environnement incident que nous essayons de gérer dès la conception. Ce court article se concentre sur les opérations de porte de secours de passage croisé.

Xp door types.

Simply there are only two types of doors that are specified, swing and sliding door styles, however, they must both meet the fire safety standard of the project and also the mechanical requirements of operation.

Sliding doors

Are to a point pressure nuetral and can be any reasonable size, space allowing.

Swing doors

Are subject to pressure effects and minimal dimensions. Only likely to be easier in operation if kept to very minimal dimensions

Incident types, approx. Fire size & temperatures as tested

Car fire	- 5mw	450° c
Truck fire	- 20 -30 mw	1,000° c
Petrol tanker fire	- 100 mw +	1,300° c.
Metro rail fire	- 10 – 30 mw	1,000° c
Deisel train fire	- 75 mw	1,200°c

All occuring in the tunnel space

Regulations codes safety standards

Most countries have different levels of protection and prescriptive standard

Requirements. Also, whilst debatable, in many countries, tunnels are not governed by a building code. Whilst the engineering fraternity strive for best practice and related experiences. This is where the challenge also is between graduate engineers, estimators and manufacturer salesmen. Knowledge and experience must be handed down. The process of learning from mistakes while very true, should never be the norm.

Australian standards

The australian building code or national construction code: (ncc)

Australian standards relevent to tunnels and fire doors:

As4825

As2419

As1851

As1905

As1530

In australia as an example, the main standard is as4825- a performance standard, this standard provides a generic framework in achieving fire safety in tunnels.

It mainly takes guidance from nfpa130. There are however, system and materials standards cross referanced and to follow, as well as the local fire brigade preferances. Further however, active fire safety systems and location of deluge or mist sprinkler cover placement as well as the incident location play a big part in the passive door performance requirement.

Ventilation impact on xp doors

Not always, but generally ventillation is longtitudonal within the tunnel main traffic tubes, metro, rail or road. The issue here is that ventilation causes a significant degree of pressure differences between the main traffic tubes and the ventilated cross-passage tubes. Creating significant pressure differences.

In addition, as you know ventilation fans also manage smoke during a fire incident, so that the backlayer of smoke ingress down stream is reduced. All these precoutionary steps result in significant pressure differemtials which in turn can also result in door operational issue's. Metro & rail tunnels have the added impact of the regular piston effect resulting in high dynamic pressures on the door mechanicals. In choosing the door type, it is therefore essential to understand these pressure forces during normal operation and at crucal event times. Again, this is more critical in metro tunnels where space volume is limited.

Tunnell style & design issue's

Escape tunnel build intrados & or space proofing on different cross tunnel corridor sections can be problematic. Particularly in metro / rail tunnels, and often will only allow the one design style option in doors normally swing type only. This offcourse plays havoc with the size requirement verses the various pressure influences and force requirements of operation. So, a statement of "less is better or cheaper" does not apply in these circumstances. As it is likely that one would need to use electric drives to operate the doors, a significant cost impost.

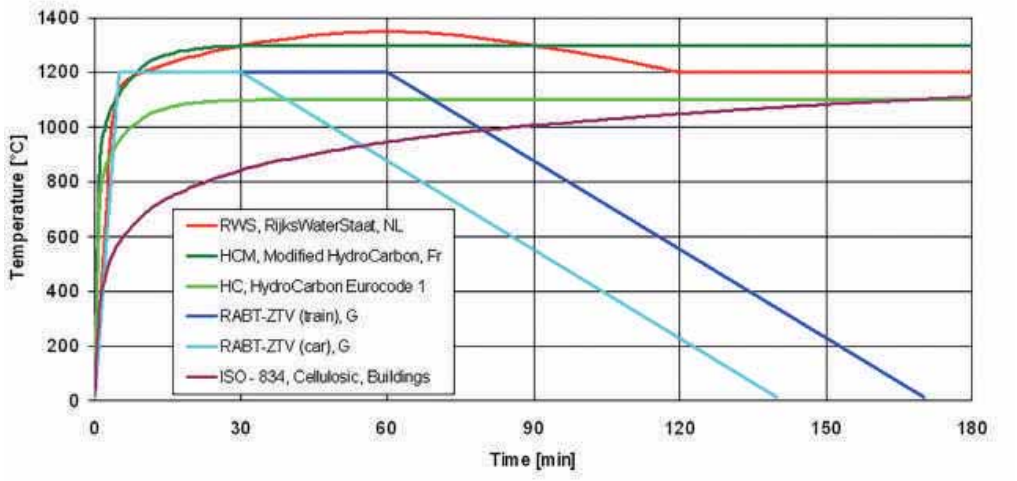
A tunnel project total cost is heavily driven by the type and size of build cost, which inturn influences available space for doors and space in the cross-passageway tube wall. With this in-mind consideration should be given to the internal wall opening space size allowed to accommodate the prefered door type, the fire ferocity, and the doors' ability to operate when needed, safely whilst at the same time protecting lives and assisting emergency services. Escape door location, relative to incident ground zero distance should also be contemplated.

Eg: next to roadway lane or track say within 2 mtrs
Behind road barrier only
Behind road barrier and recessed in
Behind road barrier, recessed in and shield protected from lane

And understanding how this relates to the risk factor in material of construction.

Materials of construction

Often simply refered to as fire doors to a fire code and a rating, doors and material of construction are normally left to supplier decission. This must be assesed by the design engineers. The type of tunnel and likely ferocity of a possible fire incident. It is prudent to consider a worst-case scenario and specify the burn curve that would apply.



The below graph is the result of extensive testing by various authorities and promat Ltd. It indicates the various curves proven in fullsize testing by independent and expert bodies globally.

Door core, materials and finishes need to be tested & proven to these curves.

This is a critical part of the risk analysis that needs consideration and this needs to be applied to probable future traffic type allowed in the tunnel, this really underpins life safety in a tunnel fire incident, we need to anticipate a worstcase scenario at the very early design stage of a tunnel.

HELPFUL INFORMATION FOR DESIGN TEAMS

Swing doors

As mentioned, pressure and force are related, and as you know, you can calculate one if you know the other by using the basic physics equation, p = f/a.

Now because pressure is force divided by area, it is expressed as metres-kilogram-second (mks) units which are newtons per square meter, ie: n/m2. So, the doors physical area size influences the operational force. We all know that to open a door against a pressure force or a pressure differential is much harder than going with the pressure direction. "Nfpa will solve that problem you say" but no it will not. The american standard nfpa 130 will tell you that the door must operate at an exserted 130n force. Even that i think is a little too heavy for frail little old ladies who have been stressed and terrified by the events leading up to this 'particular door opening.' In australia, our national construction code calls for 110n force, and you know how big and strong australian guys are after all that beer! But seriously we need to think of all the probable scenarios and yes, accidents are more prolific in road tunnels than rail tunnels, but the confines of a metro tunnel make it that a much more difficult. With a swing fire door, the ability of being able to meet the requirement clauses of the various codes which require a door to be operated by exserting a certain newton force. It is very unlikly for a swing doors larger in size than 2045mm x 900mm. And a pressure differential bigger than 100 pascals to operate.

The added requirement offcourse is the best practice requirement for doors to swing in the direction of exit when forming part of a required exit path. For example, the doors leading into and out of the fire-isolated passageway. Railway tunnel xp doors will often only lead to the non-incident tunnel. It is therefore impossible to know which direction the door should swing. Door companies will sometimes claim that two way swing fire doors are the solution. But off course that is not so. The required operating force is affected by the tunnel fan pressure when switched on in response to an incident.

Here once again we are aware that metro type tunnels are probably more efficiant at air pressure transmission and accuracy due to their compact design whilst road tunnels have more space leway. Fire brigades do have a preferance for larger door widths to pass equipment through. Also, during a build fit out, and depending on equipment size - usually switch gear - tunnel designers may require doorways big enough to pass this equipment through into place within the cross passage.

What should never be considered is the two-way fire door. They by design are very gappy. They rely on gap tolerances for the swing action, and intumescent seals for the fire seal so as a consequence of these tolerances, smoke sealing becomes increasingly difficult. And offcourse when one applies fan pressure, leaking is quite significant. This type of door though if considered a solution to space & eagres direction is also subjected to the high-pressure forces of metro piston effect, latching the swing doors becomes another issue, the leaf size and pressure differential subjects the latch points to a number of stresses, and particularly with the train cushion piston effect of the passing rail car pressure, the fan force and door mechanical tolerances are stressed to extreme.

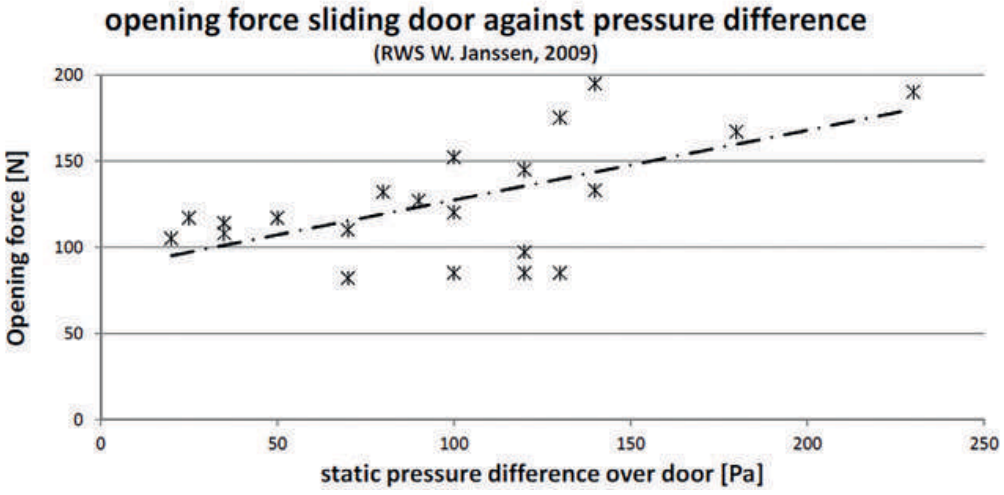
By far the best and commercially cost-effective solution at fit out stage is to have sufficient space for a manual sliding fire door. But, should that not be possible and swing type fire doors of 1000mm width and 2100mm height may have to be the solution, the only way to conform to best practice requirement is to automate the doors and have electrical control drives that when one panic push is activated it would simultaniously signal the down stream door to open inward thus having a clear pathway through to the safe platform side. Closing and or restoring of the doors woud be by way of timed electronics and push buttons locally.

Sliding fire doors

As previously mentioned, sliding doors are less impacted by pressure differential primerally due to the introduction of a mechanical assistant such as a spring or weight counterbalance. Additionally, a sliding door is a friction calculation that reaches equalibrium very soon in its aperture and handle pull action to operate.

Following is a graph showing average opening torque against a static pd. And note

This is without a counterweight assisting.



Reducing risk through design – vision

Vision is often considered as a mitigating ability in the tunnel tube, but not considered so when it comes to xp doors. Non the less this sense can be of enormous advantage to the fire brigade pesonnel, in being able to see through the safety of a passive fire door vision panel before operating it. It is after all an incident safety door, and whether it is safe to open or not may be of great assistance to the men & women on the ground. Also, consider trumatised pedestrians or passangers that would also find it beneficial when approaching the other door during an escape in a cross-passage set.

We must also remember that deluge and mist systems are mostly reliant on manual activation by the tunnel operator, and this can take a period of time at best approx. 5 Minutes for the fixed fire systems activation and approx. 20 Minutes for the fire brigade to arrive on site. Whilst the sprinkler standard and dimensional distances of fixed fire systems positioning relative to the doorways are mostly uncovered, it would certainly make sense to be able to glimps the tunnel climate and eliminate another risk factor.

Sliding fire doors in tunnel escape doors are really the best solution in handling the high-pressure differentials that can exist in a tunnel micro cossom. Vision panels in these escape doors adds a further safety dimension.

So, what should we be bringing to the drawing board?

Recalling the narrative statement "many factors effect the door type, style and dimension in a tunnel environment" whilst many tests have taken place on different aspects and products at an incident point. The important thing to do is to plan. That is why we should start at the drawing board.

- Information on the fire ferosity anticipated whilst also considering future allowable traffic.
- Advice on compatible materials of door construction.
- Differential, piston and make up air pressures & timing.
- Style of door -swing / slide-verses allowable space.
- Risk mitigating factors such as ease of operation
- And remembering vision for safety.

Armed with this knowledge xp and other doors can be fit for purpose, cost effective and safe on your planned project.

IMPACTO DEL USO DE TELÉFONOS MÓVILES EN LA SEGURIDAD VIAL DEL TÚNEL DE ORIENTE

Ricardo Smith Quintero, Rafael Nanclares Ospina, Juan David Naranjo Sierra
Consultores independientes
Medellín, Colombia

A nivel mundial existen regulaciones que limitan el uso de los teléfonos móviles mientras se conduce. El uso de teléfonos móviles mientras se conduce representa un factor importante de riesgo de accidentalidad, llegando a incrementar el riesgo de accidentalidad hasta en 4 veces más. La actividad de conducir y simultáneamente usar teléfonos móviles representa un importante factor en la accidentalidad vial a causa de la disminución de la atención del conductor al entorno de la vía. En Colombia está incrementando de manera importante la construcción de túneles de gran longitud (mayores a 4 Km) y hay una gran preocupación sobre la afectación de la seguridad vial sobre la operación de estos túneles. Actualmente hay construidos más de 30 Km. De túneles de gran longitud y se encuentran en construcción más de 20 Km. La mayoría de estos túneles se desarrollan en el marco de una concesión vial privada. En este estudio se estiman las afectaciones que pudiesen presentarse en la operación del túnel que conecta a la ciudad de Medellín con el aeropuerto de la ciudad, con una longitud de 8,2 kilómetros y llamado Túnel de Oriente, como consecuencia de facilitar a los usuarios de esta vía operar teléfonos móviles dentro del todo el trayecto del túnel. El estudio se apoya en dos fuentes de información: la literatura relacionada con el uso de teléfonos móviles durante la conducción, las regulaciones existentes y el uso de estos dispositivos específicamente dentro de túneles; y la segunda, los reportes de accidentalidad obtenidos en el túnel analizado y de otro con similares características de operatividad ubicado dentro del área de estudio. Como resultado se logró estimar preliminarmente que la accidentalidad dentro del túnel podría verse aumentada entre un 17% y un 30% al permitir el uso de teléfonos móviles dentro del túnel. Igualmente se estiman posibles pérdidas económicas para el operador del túnel por cada hora de cierre parcial o total de la vía en función de los posibles accidentes. Se presentan los resultados de este estudio y sus principales conclusiones y recomendaciones.

IMPACT OF MOBILE PHONE USE ON ROAD SAFETY IN THE ORIENTE TUNNEL

Worldwide there are regulations that limit the use of mobile phones while driving. The use of mobile phones while driving represents an important risk factor for accidents, increasing the risk of accidents up to 4 times more. The activity of driving and simultaneously using mobile phones represents an important factor in road accidents due to the reduction of the driver's attention to the road environment. In Colombia, the construction of long tunnels (greater than 4 km) is increasing significantly and there is great concern about the impact of road safety on the operation of these tunnels. There are currently more than 30 km of long tunnels built and more than 20 km are under construction. Most of these tunnels are developed within the framework of a private road concession. This study estimates the effects that could occur in the operation of the tunnel that connects the city of Medellín with the city's airport, with a length of 8.2 Km and called Túnel de Oriente, as a consequence of facilitating users to operate mobile phones within the entire tunnel path. The study is supported by two sources of information: the literature related to the use of mobile phones while driving, existing regulations and the use of these devices specifically within tunnels; and the second, the accident reports obtained in the analyzed tunnel and another with similar operating characteristics located within the study area. As a result, it was possible to estimate preliminarily that the accident rate inside the tunnel could be increased between 17% and 30% by allowing the use of mobile phones inside the tunnel. Likewise, possible economic losses are estimated for the tunnel operator for each hour of partial or total closure of the road based on possible accidents. The results of this study and its main conclusions and recommendations are presented.

IMPACT DE L'UTILISATION DU TÉLÉPHONE PORTABLE SUR LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE DANS LE TUNNEL D'ORIENTE

Dans le monde entier, il existe des réglementations qui limitent l'utilisation des téléphones portables au volant. L'utilisation des téléphones portables au volant représente un facteur de risque d'accident important, augmentant le risque d'accident jusqu'à 4 fois plus. L'activité de conduite et d'utilisation simultanée de téléphones portables représente un facteur important dans les accidents de la route en raison de la réduction de l'attention du conducteur à l'environnement routier. En Colombie, il se construit de plus en plus de tunnels longs (supérieurs à 4 km). C'est pourquoi, l'impact de la sécurité routière sur l'exploitation de ces tunnels suscite de vives inquiétudes. Actuellement, plus de 30 km de tunnels longs sont construits et plus de 20 km sont en cours de construction. La plupart de ces tunnels sont aménagés dans le cadre d'une concession routière privée. Cette étude estime les effets qui pourraient survenir dans l'exploitation du tunnel qui relie la ville de Medellín à l'aéroport de la ville, d'une longueur de 8,2 kilomètres et appelé Túnel de Oriente. Pour faciliter la vie des utilisateurs, il est prévu de permettre l'utilisation des téléphones portables dans tout le chemin du tunnel. L'étude s'appuie sur deux sources d'information : la littérature relative à l'utilisation des téléphones portables au volant, la réglementation en vigueur et l'utilisation de ces appareils spécifiquement dans les tunnels ; et le second, les rapports d'accidents obtenus dans le tunnel analysé et un autre avec des caractéristiques d'exploitation similaires situé dans la zone d'étude. En conséquence, il a été possible d'estimer à titre préliminaire que le taux d'accidents à l'intérieur du tunnel pourrait être augmenté entre 17 % et 30 % en permettant l'utilisation de téléphones portables à l'intérieur du tunnel. De même, les pertes économiques éventuelles sont estimées pour l'exploitant du tunnel pour chaque heure de fermeture partielle ou totale de la route en fonction des accidents possibles. Les résultats de cette étude et ses principales conclusions et recommandations sont présentés.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de teléfonos móviles mientras se conduce hace parte de una serie de factores que se agrupan dentro del término de "distracción al conducir". La OMS entiende distracción al conducir como el desvío de la atención de todas aquellas actividades esenciales para una conducción segura hacia otra actividad diferente (OMS, 2011). Las principales fuentes de distracción en la conducción al interior del vehículo incluyen: manipular el aparato de radio o de CD, marcar un número o enviar un mensaje de texto en un teléfono celular, comer o beber, mover un objeto en el interior del vehículo, hablar con los ocupantes del vehículo, fumar, hablar por el teléfono celular, utilizar el computador, otros (OMS, 2011).

Conducir y realizar varias de las tareas anteriores, significa que la persona está realizando múltiples tareas al mismo tiempo. Las personas no pueden realizar más de una tarea cognitivamente exigente en el mismo período de tiempo con un enfoque y eficacia óptimos para cada tarea. Los conductores totalmente enfocados en la tarea de conducir tienen más posibilidades de evitar un choque con otro conductor o peatón distraído (NSC, 2020). El desempeño al intentan realizar dos tareas que exigen atención al mismo tiempo se reduce de manera drástica y la única solución es fácil: hacer de la conducción el enfoque principal y realizar otras tareas exigentes de atención solo cuando esté detenido de forma segura (NSC, 2020).

En general, en el levantamiento de los accidentes de tránsito no se notifica de manera sistemática si el conductor estaba realizando alguna actividad distractora en particular, como por ejemplo el uso del teléfono celular y tampoco los conductores aceptan que estaban utilizando el celular ya que ello conlleva la aceptación de su culpabilidad en el accidente. Es entonces difícil estimar en qué medida las distracciones contribuyen a los accidentes de tránsito, lo cual, aunado a la dificultad para detectar cuándo un conductor usa el celular mientras conduce, se considera que las cifras de uso del celular mientras se conducen y su relación con los accidentes viales se han subestimado de manera importante.

El uso del teléfono mientras se conduce tiene muchas consecuencias sobre la conducción y la seguridad de los conductores y ninguna de ellas debe subestimarse, incluyendo: mayor tiempo de reacción, mayor tiempo de frenado, reducción de la distancia de seguridad, dificultad para mantener el vehículo en el carril de tráfico, dificultad para mantener una velocidad adecuada, reducción del campo de visión, reducción de la percepción del conductor de lo que ocurre en su entorno, otros. El teléfono inteligente es el único dispositivo que combina varias fuentes de distracción que pueden afectar a los conductores. Dentro de los 7 factores de riesgo más importantes al conducir, identificados por la Organización Mundial de la Salud, se encuentra el uso de dispositivos móviles al conducir.

Durante los últimos 35 años, los teléfonos móviles se han convertido en una importante fuente de comunicación y un dispositivo esencial para muchas personas. El número de usuarios únicos de telefonía móvil alcanzó los 5.190 millones en el mundo al finalizar 2017[1] , lo que supone un grado de penetración del 66 %, aunque el número de tarjetas SIM usadas por personas (excluyendo las que usan máquinas entre sí) se elevó a 7.800 millones, el 103 % de los habitantes del planeta, superando así por primera vez la población mundial (7.600 millones de personas)[2] . En el año 2019 Colombia alcanzó a tener más de 60 millones de líneas de telefonía móvil registradas[3] , alcanzado el 119% de la población del país. Aunque las cifras sobre el uso de celulares a nivel global cambian entre los diferentes estudios lo que si es cierto es que son enormes. El crecimiento del número de abonados a líneas de telefonía celular es más rápido en los países de ingresos bajos y medios, donde actualmente existen el doble de abonados a líneas celulares que en los países con ingresos altos.

[1] https://branch.com.co/marketing-digital/estadisticas-de-la-situacion-digital-de-colombia-en-el-2019-y-2020/

[2] Diario El País. https://elpais.com/tecnologia/2018/02/27/actualidad/1519725291_071783.html

[3] Diario la República. https://www.larepublica.co/especiales/especial-de-la-decada-2019/el-numero-de-lineas-aumento-mas-de-60-en-lo-corrido-de-la-ultima-decada-2946335

Investigaciones han mostrado las consecuencias dañinas de la distracción del conductor asociada con el uso teléfonos móviles en los automóviles por parte de los conductores, ya sea con teléfonos móviles de mano o de "manos libres". La mayoría de los estudios indican que el uso de teléfonos "manos libres" causa tanta distracción al conductor como el uso de celulares con la mano. El riesgo de colisión aumenta drásticamente, hasta cuatro veces más, cuando un conductor está usando un teléfono celular, sin que se observe una diferencia significativa entre los teléfonos de mano y "manos libres".

Diferentes estudios informan diferentes efectos del uso de teléfonos móviles mientras se conduce sobre el riesgo de accidentes. Uno de ellos, de carácter epidemiológico, encontró que las conversaciones por teléfono móvil aumentan el riesgo de accidentes en un factor de cuatro. Las probabilidades de un accidente aumentan en un 70% cuando el conductor está usando un teléfono móvil.

Cuando se producen accidentes de tránsito en espacios confinados, como es el caso de los túneles carreteros, estos tienden a ser más graves debido al poco espacio de maniobrabilidad que tiene el conductor cuando reacciona ante la causa del accidente. Además, se puede producir el efecto "rebote" cuando el vehículo choca contra las paredes del túnel y es devuelto a la vía, incluso a los carriles de sentido contrario, involucrando más vehículos y agravando el accidente. La combinación entonces del uso de teléfonos móviles mientras se conduce en túneles puede llegar a producir accidentes más graves que cuando se producen fuera de los túneles, en vías a cielo abierto. En este informe se presentará un análisis detallado sobre el uso de los teléfonos móviles y la seguridad vial, en términos generales y específicamente en túneles carreteros, incluyendo una revisión de estudios y regulaciones sobre el tema, la seguridad en túneles carreteros, cifras sobre el uso de celulares mientras se conduce y la posición de los concesionarios viales en Colombia sobre el uso de celulares en túneles. Finalmente se presentarán las conclusiones y se harán recomendaciones.

2. REGLAMENTACIÓN INTERNACIONAL Y NACIONAL SOBRE EL USO DE CELULARES MIENTRAS SE CONDUCE

A medida que los teléfonos móviles comenzaron a proliferar a finales de la década de 1990, varios estudios experimentales encontraron disminuciones en el rendimiento de la conducción (simulado o instrumentado) asociado con el uso del teléfono (McCartt el al., 2006), y un estudio epidemiológico muy publicitado encontró un aumento de cuatro veces en el riesgo de un accidente de daños a la propiedad asociado con el uso de celulares mientras se conduce (Redelmeier y Tibshirani, 1997). Fortalecidas por estas investigaciones, las preocupaciones sobre los riesgos del uso de teléfonos celulares durante la conducción llevaron a la aprobación de leyes que limitan su uso.

El uso de teléfonos móviles en automóviles mientras se conduce es ilegal en la mayoría de los países del mundo, incluidos la Unión Europea, Australia, Latinoamérica y en partes de Canadá y EE.UU., entre otros. En varios países se pueden encontrar diferentes políticas sobre la introducción de prohibiciones sobre el uso de teléfonos "manos libres" y la conducción. En este sentido un aspecto clave para resaltar es la Convención de Viena sobre la Circulación Vial de 1968, modificada en 2006 para incluir una prohibición sobre el uso del teléfono celular durante la conducción. En varias resoluciones de las Naciones Unidas se ha instado a los Estados Miembros a que adopten disposiciones para prohibir totalmente el uso de teléfonos móviles mientras se conduce.

El International Transport Forum (ITF) realizó un benchmarking sobre la seguridad vial en 10 países de América Latina sobre Seguridad Vial (ITF, 2017). En este estudio se encontró que existe un marco jurídico razonable para muchas medidas legislativas importantes relativas al comportamiento de los conductores en esos países, incluyendo el uso de teléfonos celulares. En la Tabla siguiente se muestra el año de aprobación de las normas que prohíben el uso de celular mientras se conduce en cada uno de los países analizados.

Tabla 1. Existencia de Leyes Latinoamérica

País	Año de aprobación
Argentina	1995
Brasil	1997
Chile	2005
Colombia	2002
Costa Rica	2012
Cuba	2010
Ecuador	2014
México	2003
Paraguay	2008
Uruguay	2013

Fuente: International Transport Forum (ITF).

Las decisiones reglamentarias en Europa con respecto al uso de teléfonos móviles durante la conducción fueron tomadas por varios países europeos a fines de la década de 1990 o principios de la de 2000. En la actualidad en 27 Estados miembros de la Unión Europea está prohibido el uso de teléfonos móviles con la mano. En España y Francia, desde el año 2015, también está prohibido el uso de auriculares al conducir. En India, Rusia y China los teléfonos de mano están prohibidos mientras se conduce. En la mayoría de estos países las sanciones por uso de los teléfonos móviles mientras se conduce han ido aumentando, como un reconocimiento a su relación directa con los accidentes de tránsito.

En Estados Unidos la prohibición de uso de teléfonos móviles mientras se conduce varia de estado a estado. La Junta Nacional de Seguridad en el Transporte (NTSB) ha estado pidiendo una prohibición total de hablar y enviar mensajes de texto mientras se conduce, incluso con dispositivos de "manos libres". El Departamento de Transporte emitió regulaciones federales para abordar la conducción distraída en todos los modos de transporte, sin embargo, mientras 41 estados y D.C. aprobaron prohibiciones de mensajes de texto, solo doce estados y D.C. aprobaron prohibiciones de teléfonos celulares mientras se conduce.

En Colombia, La Ley 769 del 2002, por la cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre, establece que será sancionado el conductor de un vehículo que incurra, entre otras, en usar sistemas móviles de comunicación o teléfonos instalados en los vehículos al momento de conducir, exceptuando si éstos son utilizados con accesorios o equipos auxiliares que permitan tener las "manos libres".

Finalmente, un punto importante sobre el cual hay que llamar la atención es la efectividad de las normas que prohíben el uso de teléfonos móviles mientras se conduce. Si las normas son poco efectivas esto significa en general que las personas tienden a tener una sensación de impunidad sobre la aplicación de la norma y a violarla de manera más reiterada. En la mayor parte de los estudios de evaluación realizados en ese campo señalan que, en muchos países, los efectos legislativos no han sido eficientes para reducir de forma estable las tasas de uso del teléfono celular mientras se conduce y que la adopción de leyes no es suficiente en sí misma para modificar el uso del celular por los conductores.

La regulación sobre el uso de celulares en túneles

En términos generales, la legislación internacional no distingue los túneles frente a tramos a cielo abierto de carretera en la aplicación de las normas sobre los factores de riesgo en la conducción. No hay una regulación específica para túneles.

En cuanto la toma de decisión que se plantea sobre permitir el uso de los celulares por parte de los pasajeros de los vehículos, que en la práctica supondría garantizar la continuidad de la señal celular dentro de los túneles, es preciso indicar que la Unión Europea ha reconocido la importancia que la digitalización y conectividad puede suponer para la movilidad, confiando en los beneficios que ambas pueden aportar para la seguridad vial. En el caso de los túneles, en España, por ejemplo, esto se concreta en que desde la Dirección General de Tráfico considera que tanto la conectividad como el geo-posicionamiento son capacidades que se deben mantener en las secciones en túnel. Se considera que son mayores los beneficios de garantizar la señal en los túneles y se debe continuar aplicando en estos tramos las mismas estrategias para evitar el uso del móvil por parte de los conductores, especialmente la vigilancia y la concientización.

Aunque la Directivas sobre seguridad en túneles de la Unión Europea no incluye medidas sobre el uso de teléfonos móviles en túneles, hay un reconocimiento de que el uso de celulares mientras se conduce es un factor de riesgo importante de accidentes, los cuales en caso de ocurrir dentro de túneles tienen consecuencias mayores sobre las personas involucradas en los mismos debido a que es un especio confinado. En un estudio realizado por PRIAC sobre seguridad en túneles, al analizar casos de accidentes en túneles se indica que el manejo descuidado peligrosos como la causa más importante de los accidentes en los túneles, incluyendo el uso de teléfonos móviles mientras se conduce (Safe Tunnel, 2007). PRIAC recomienda como medida de seguridad en los túneles que se les indique a los conductores que suspendan toda conversación con celulares antes de entrar a los túneles (1 o 2 kilómetros antes), inclusive el uso de "manos libres" (PRIAC, 2007). Proponen que en los cursos de conducción se incluya la seguridad en túneles y se indique esta restricción de uso de teléfonos móviles en los mismos por parte de los conductores.

En Colombia no hay regulación que obligue al suministro de conectividad en las vías del país, incluyendo los túneles, lo cual significa que un operador de un túnel podría no dar conectividad dentro del mismo y sería una manera de evitar el uso de celulares mientras se conduce en el túnel.

3. ALGUNAS CIFRAS SOBRE EL USO DE TELÉFONOS MÓVILES MIENTRAS SE CONDUCE Y SU RELACIÓN CON LOS SINIESTROS DE TRÁNSITO

Las investigaciones realizadas en el área de seguridad vial indican que aproximadamente el 25 % de los accidentes automovilísticos han sido causados por la distracción del conductor. Además, este problema se ve agravado por el uso de nuevas tecnologías y la prestación de nuevos servicios durante la conducción. Hoy en día, los teléfonos móviles se han utilizado en gran medida durante la conducción, y teniendo en cuenta que los operadores de redes móviles buscan constantemente mejorar los servicios existentes y desarrollar nuevos que puedan resultar útiles a los conductores (navegación web, envío, recepción o lectura de mensajes de texto, etc.), aumenta el tiempo total y la exposición al riesgo del uso del teléfono móvil mientras se conduce. Así, por ejemplo, alrededor del 85% de los conductores estadounidenses y dos tercios de los conductores finlandeses utilizan teléfonos móviles mientras conducen (Lipovac et al., 2017).

Muchos estudios iniciales sobre el impacto del uso del celular mientras se conduce se concentraron en mostrar la contribución de la distracción en los accidentes, por ejemplo, un estudio mostró que en Australia esa contribución era del 14% de los casos (McEvoy y Stevenson, 2007), según estudios realizados en Nueva Zelandia, la distracción es un factor importante al menos en el 10% de los accidentes mortales y en el 9% de los accidentes con heridos (NRSC, 2011). Las compañías de seguros colombianas informaron de que en 2006 el 9% de todos los accidentes de tránsito fueron provocados por distracciones del conductor, y en el 21% de todos los casos en que un peatón fue atropellado por un automóvil fue debido a una distracción del conductor

(FPV, 2006). En España, se estima que el 37% de los accidentes de tránsito que se produjeron en 2008 estaban relacionados con distracciones del conductor (DGT, 2008). En los Países Bajos, el uso del teléfono celular durante la conducción fue responsable del 8,3% por ciento del número total de víctimas mortales y de heridos en carretera en 2004 (Leidschendam, 2008). En Canadá, según las estadísticas nacionales de 2003-2007, el 10,7% de los conductores que perdieron la vida o resultaron heridos estaban distraídos en el momento del accidente (Transport Canada, 2007). En los Estados Unidos, se estima que el 11% de los accidentes ocurridos entre 2005 y 2007 se debió a distracciones del conductor y en 2008, la distracción del conductor fue un factor confluente en el 16% de los accidentes mortales (NHTSA, 2009).

Como se puede ver la distracción mientras se conduce (en donde el uso del celular es un actor principal) fue responsable de una manera importante en la accidentalidad vial con el 8 % o más de los casos. Además, se debe tener en cuenta la dificultad para determinar que la causa de un accidente de tránsito fue una distracción en la conducción, lo cual se refleja en un porcentaje excesivamente bajo de los casos reportados de accidentes causados por la distracción del uso del celular mientras se conduce (Department for Transport, 2008).

Los estudios muestran que los conductores que usan con frecuencia sus teléfonos móviles mientras conducen son propensos a un mayor riesgo relativo de verse involucrados en un accidente de tráfico, donde el valor del riesgo relativo es al menos 2 veces mayor en comparación con los conductores que utilizaron mínimamente sus teléfonos móviles mientras conducían o no lo utilizaban (Lipovac et al., 2017).

No se reporta mucha información en la literatura académica sobre el grado con que se envían mensajes de texto durante la conducción, debido, en parte, a la dificultad para observar esa conducta en un vehículo. Sin embargo, algunos estudios indican que un porcentaje significativo de conductores (más del 20% en el Reino Unido, Australia y Estados Unidos) realizan esta práctica mientras conducen.

4. SEGURIDAD Y USO DEL CELULAR EN TÚNELES

La operación o funcionamiento de túneles como infraestructuras destinadas a solucionar problemas de movilidad, ha representado un reto de seguridad por cuanto sus características exacerban los riesgos, ya que la movilidad se da en un entorno de carretera cerrada (Queensland Government, 2020) en la que se considera de alto riesgo la circulación (FIA, 2018). Mientras en una vía a cielo abierto, los accidentes tienden a disiparse (los vehículos pueden salir de la vía), los accidentes en túneles, ocurren en un especio confinado con dos únicas salidas en una sola dirección, haciendo que eventualmente los involucrados en un accidente sean muchos más.

Es por este hecho que operadores, administraciones locales y gobiernos definen a los túneles como una infraestructura con un capítulo aparte del resto, sobre los cuales recaen una serie de medidas que los cobijan de acuerdo a su tipología. Un caso concreto es la Directiva Europea 2004/54/EC, en la que se exponen los requisitos mínimos de seguridad para los túneles de la red transeuropea de carreteras. Esta legislación, permite la creación de unas condiciones aplicables a todos los túneles de los estados miembro, pertenecientes a la red TEN-T (por sus siglas en inglés Trans-European Transport Network), que armonicen las medidas y características de estas infraestructuras a lo largo de Europa.

Las medidas de seguridad para los túneles en esta clasificación, se enfocan en los siguientes aspectos: número de tubos y carriles, vías de evacuación y salidas de emergencia, acceso de servicios de emergencia, bahía de estacionamiento, drenajes (en caso de circulación de vehículos de carga y de mercancías peligrosas), iluminación, ventilación, estaciones de emergencia, abastecimiento de agua, señales de vía, centro de control, sistemas de vigilancia, equipos para el cierre del túnel, sistemas de comunicación y suministro de electricidad. Existen además otras medidas que serán emprendidas por los administradores de los túneles en conjunto con los servicios de emergencia para garantizar el buen funcionamiento y la vida de los usuarios y se refieren a la planificación de emergencias, obras de los túneles, y respuesta a accidentes e incidentes.

En Colombia, el "Manual de diseño, construcción operación y mantenimiento de túneles de carretera" (2015) es la guía regulatoria para los túneles en el país, y contempla una clasificación de los túneles en 5 tipos con muchas similitudes con la clasificación europea (INVIAS, 2015).

En la tabla a continuación se presenta el grupo de túneles en Colombia con longitudes mayores a 1.000 metros.

Tabla 2. Lista de los túneles a nivel nacional con longitud mayor a 1 km

Nombre	Longitud (m)
Túnel del Toyo	9840
Túnel de La Línea	8652
Túnel de Oriente	8229
Túnel de Occidente	4603
Túnel de Buenavista	4520
Túnel Renacer	4333
Túnel del Sumapaz	4186
Boquerón	2405
Túnel de Daza	1710
Túnel 5	1655
Túnel Polvorín	1640
Túnel 3	1441
Túnel Guacapate	1258

Fuente: INVIAS

Las medidas dispuestas para los túneles en Colombia son similares a las presentadas en las normativas europeas, especialmente en el tema de seguridad en los túneles. En Colombia existe entonces un robusto esquema técnico y normativo que permite garantizar condiciones de funcionamiento seguro en los túneles. En esas normas no se hace referencia explícita a la prohibición del uso de celulares mientras se conduce en túneles. Pese a estas medidas, es común que se presenten accidentes por impericia, uso de elementos distractores (celulares, equipos de radio y entretenimiento, equipos de climatización) e incluso conversaciones con los pasajeros del vehículo.

Las formas de colisión están estrechamente relacionados con el tipo de túnel (unidireccional o bidireccional). Las colisiones traseras y laterales se presentan con mayor frecuencia en túneles unidireccionales, como consecuencia de frenadas bruscas o maniobras de esquiva de elementos presentes en la vía (FIA, 2018). Las que predominan en túneles bidireccionales son de tipo frontal (sin excluir a las demás) al hacer adelantamientos o al no mantener el carril.

Si bien las colisiones dentro de túneles responden a una cantidad nada despreciable de causas, una de ellas y que incrementa hasta en cuatro veces la ocurrencia de colisiones es el uso del celular durante la conducción (Brace et al., 2007). El uso de celular en las vías por parte del conductor resulta una actividad de alto riesgo indistinto de donde se realice, en los túneles los efectos pueden ser mucho más devastadores.

Un estudio realizado en Australia, comparó el comportamiento de un grupo de 24 conductores con edades entre 22 y 50 años al usar el celular para recibir y enviar mensajes de texto en ambientes simulados de túnel y autopista. El resultado de esta prueba indica que los conductores descuidaron el entorno de conducción una quinta parte del tiempo, para atender la tarea de recibir/enviar mensajes.

5. CIFRAS EN EL TÚNEL DE ORIENTE SOBRE EL USO DE TELÉFONOS MÓVILES MIENTRAS SE CONDUCE Y ACCIDENTALIDAD EN TÚNELES

El Túnel de Oriente es un túnel de 8.229 metros de longitud es un túnel bidireccional cuyo objetivo principal es conectar a la ciudad de Medellín con el aeropuerto internacional que sirve esta ciudad y que se encuentra localizado al oriente de la misma. Igualmente, su uso aumenta considerablemente los fines de semana al ser la zona servida por el túnel una zona de recreo para los habitantes de la ciudad. Es un túnel construido y gestionado por un operador privado (Concesión Túnel Aburrá Oriente) que tiene un peaje para cada vehículo que lo utiliza de $18.300 pesos colombianos (aproximadamente USD$ 4,5). Este túnel se tomó como caso de estudio para tratar de evaluar la incidencia de permitir el uso del celular sobre la accidentalidad en el túnel.

Como una de las únicas fuentes para obtener cifras sobre este tema se tiene en Colombia la serie histórica de multas del SIMIT (Sistema Integrado de Información sobre multas y sanciones por infracciones de tránsito de Colombia). El SIMIT registra desde el año 2003 la información del número de multas impuestas por la infracción No. C-38 - Utilizar el teléfono al conducir. Se destaca la participación de esta infracción en el total de multas nacionales, logrando en algunos años (posteriores a 2010), participaciones de más del 3%. El número de multas por utilizar el celular mientras se conduce, experimentó un aumento progresivo desde el año 2003.

Tabla 3. Número de comparendos impuestos por utilizar el teléfono al conducir a nivel nacional

Año	Número de multas C-38
2003	18310
2004	35020
2005	35281
2006	34756
2007	38682
2008	50835
2009	58512
2010	74211
2011	64366
2012	56981
2013	50164
2014	42733
2015	37796
2016	36249
2017	42720
2018	49854

Fuente: SIMIT, elaboración propia

La tendencia creciente llegó a su punto más alto en el año 2010, año en que se presentó un máximo histórico para el comparendo C-38. Al año siguiente estas cifras empezaron a reducirse, lo que se debe en parte a la dificultad de identificar la infracción y a la falta de seguimiento sistemático por parte de las autoridades. A partir del año 2017 las cifras volvieron a incrementar experimentando un crecimiento sostenido de alrededor del 16% anual.

Solo se conoce un estudio realizado en Colombia sobre sobre factores de distracción de conductores (FPV, 2006). De este estudio se tienen las siguientes conclusiones:

- Los conductores que reportan haber tenido accidentes durante el último año (16%), mencionan que el 23% de estos, están asociados a distracciones.
- Hablar por celular es la principal distracción que afecta la conducción.

No existen cifras en Colombia que relacionen el uso del celular durante la conducción con accidentalidad en Colombia. Solo se tienen los registros de multas por esta infracción del SIMIT. El subregistro según algunas investigaciones puede llegar a representar el 200% de las cifras reportadas.

Para aproximarnos a las cifras de accidentalidad en túneles en Colombia, los reportes de accidentalidad del Túnel de Occidente (túnel de 4,6 Km que une a Medellín con el occidente de la región) para los años 2017, 2018, 2019 y 2020 (mayo) (Concesionario Vía al Mar, 2020) y del Túnel de Oriente en el periodo comprendido entre agosto de 2019 y enero de 2021 (Concesionario Túnel de Oriente, 2021). El consolidado de accidentes se presenta a continuación:

*Tabla 4. Relación accidentes de tránsito por año**

Año	# de accidentes	
	Túnel de Occidente	Túnel de Oriente
2017	43	--
2018	32	--
2019	31	26 (desde agosto)
2020	22 (hasta mayo)	23
2021	--	3

Fuente: International Transport Forum (ITF).

** Los accidentes presentados en la tabla solo hacen referencia a los ocurridos al interior de los túneles en mención, sin tener en cuenta accidentes en carretera a cielo abierto de las concesiones. La información del año 2021 es insuficiente para ser evaluada en este análisis.*

Desagregando esta información, es posible identificar que los meses con mayor índice de accidentalidad en los túneles de Occidente y Oriente son los siguientes (se debe tener en cuenta que las estadísticas de accidentalidad para el Túnel de Occidente solo llegan hasta el mes de marzo de 2020 y que las del Túnel de Oriente van desde agosto de 2019 hasta enero de 2021).

Tabla 5. Relación accidentes de tránsito por mes por año

Año	Túnel de Occidente	Túnel de Oriente
2017	Julio (10)	--
2018	Octubre (7)	--
2019	Junio (7)	Septiembre (10)
2020	Enero (7)	Enero (5)
2021	--	--

Fuente: International Transport Forum (ITF).

** Los accidentes presentados en la tabla solo hacen referencia a los ocurridos al interior de los túneles en mención, sin tener en cuenta accidentes en carretera a cielo abierto de las concesiones. La información del año 2021 es insuficiente para ser evaluada en este análisis.*

Dentro de estas cifras consolidadas por la concesión vial del Túnel de Occidente, se destaca que, del global de 127 accidentes de tránsito, 74 accidentes (que representan el 58,27%), corresponden a accidentes en los que está relacionada de alguna manera la motocicleta, (este fenómeno no se presenta en el Túnel de Oriente, ya que la circulación de motos está restringida por esta vía), el restante 41,53% corresponde a accidentes en los que se involucran carros y vehículos de carga en colisiones frontales o múltiples. En el caso del Túnel de Oriente, los accidentes reportados en las estadísticas corresponden en un 75% a choques simples sin lesionados (39) y un 19,2% a accidentes de tránsito con al menos un lesionado (10). El restante 5,8% corresponde a accidentes relacionados con vehículos quemados (2 casos) y colisiones con objetos en la vía (1 caso). Este primer grupo de cifras muestra que las motocicletas son el actor vial de mayor índice de accidentalidad en el túnel de Occidente (convirtiéndose en un vector de accidentalidad).

El promedio de la duración de los eventos de accidentes solo se pudo obtener de las estadísticas del Túnel de Oriente, ya que este cuenta con hora de inicio y fin del evento. En promedio cada accidente/colisión dura 40 minutos mientras se levanta y resuelve totalmente el accidente.

La operación de un túnel es especialmente susceptible a la ocurrencia de accidentes de tránsito, ya que conlleva al cierre parcial o total de la vía por periodos, afectando los ingresos de la concesión del túnel. Esta afectación es significativamente mayor en el caso de que existan vías alternas, ya que los usuarios, si tienen esta alternativa, generalmente no esperan y toman la vía alterna. Estos cierres parciales o totales, tienen una repercusión directa en los ingresos percibidos por parte de la concesión Túnel de Oriente por cuenta de una disminución en el pago del peaje, debido a la existencia de vías alternas. En el mejor de los casos, cuando se decreta un cierre parcial, los ingresos se reducen en una fracción de lo habitual, mientras que, durante un cierre total, los ingresos son de cero pesos durante el cierre.

6. POSICIÓN DE LAS CONCESIONES VIALES Y ALGUNOS EXPERTOS SOBRE PERMITIR LA CONEXIÓN DE TELÉFONOS MÓVILES EN LOS TÚNELES

Se realizaron entrevistas con 15 expertos y operadores de vías que incluyen túneles de gran longitud sobre permitir la conexión de celulares dentro de los túneles. Las principales observaciones y opiniones resultantes de estas entrevistas son las siguientes:

- La Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV) no ha adelantado ningún estudio en Colombia sobre la distracción al conducir (incluyendo el uso del celular al conducir) y su impacto en la seguridad vial.

No hay registros en los organismos de tránsito del país sobre accidentalidad debido a la distracción del conductor.

- Algunos túneles en Colombia ya permiten la conexión de los celulares. El operador de estos túneles (Boquerón y Buenavista) manifiesta que no encuentra motivo de preocupación adicional por permitir el uso de celulares en los túneles.
- Con la puesta en operación del túnel de Oriente para la conexión de Medellín con el aeropuerto José María Córdova, la accidentalidad se ha reducido en un 47% comparativamente con el uso de la vía anterior a cielo abierto para hacer esa conexión.
- Hay un consenso de que el control sobre la infracción de distracción mientras se conduce, por parte de las autoridades de tránsito, es muy difícil, por lo tanto, se considera que hay una subestimación importante en la estadística de ocurrencia de esta infracción.
- Los accidentes en los túneles tienden a ser más graves que en las vías a cielo abierto debido a que ocurren en espacios confinados. Cuando los túneles son bidireccionales el riesgo de accidente se aumenta de manera importante. El riesgo de accidentes en túneles bidireccionales es el doble que en túneles unidireccionales.
- En los manuales de los túneles de Colombia, y en los análisis de riesgo allí incluidos, no se tiene en cuenta el riego del uso del celular mientras se conduce.
- La gran mayoría de los expertos y operadores recomiendan que en el caso de túneles bidireccionales no se debe permitir la conexión de los celulares. Si los túneles son unidireccionales (flujo separado en las dos direcciones) no ven inconveniente en que se haga o se permita la conexión de los dispositivos móviles.
- Se considera que los ingresos por permitir la conectividad dentro del túnel a los operadores de celular no compensan el costo del incremento de la accidentalidad por uso del celular mientras se conduce (levantamiento, demandas, otros).
- Es más importante (disminuye los riesgos de accidentes) una adecuada señalización en los túneles y que los usuarios la conozcan, que permitir el uso de los celulares dentro de los túneles.
- En túneles con buenas vías alternas, cuando se presenta un accidente con cierre del túnel, tiene consecuencias sobre el flujo vehicular por la concesión y un impacto económico sobre la misma.

7. INFERENCIAS SOBRE EL USO DE CELULARES MIENTRAS SE CONDUCE Y LA SEGURIDAD VIAL EN EL TÚNEL DE ORIENTE

A pesar de la innegable capacidad de respuesta con la que son atendidos los accidentes de tránsito al interior de los túneles, la operación de estos se ve seriamente comprometida por cuenta de cierres parciales o en el peor de los casos totales, que se prolongan incluso por horas. El análisis de estas condiciones de operación atípicas, permite identificar la afectación económica a la que se ve expuesta el operador de un túnel, el cual percibe ingresos en función del flujo vehicular que transite por sus infraestructuras.

La inferencia que se presenta a continuación sobre el impacto de los accidentes de tránsito (específicamente de los accidentes debidos al uso de celular mientras se conduce) es más un análisis de cómo se podría calcular ese impacto. Hay que tener en cuenta que no se tienen datos reales de accidentes en túneles por el uso de celulares mientras se conduce, ni en Colombia ni en túneles específicos. Igualmente hay que tener en cuenta que la tipología de tránsito vehicular en los diferentes túneles del país, tal como se explicó anteriormente, es muy diferente, lo cual limita posibles extrapolaciones de información entre los túneles. Este ejercicio es entonces un ejercicio aproximado cuyos resultados solo deben considerarse como una guía.

De acuerdo con la información suministrada por el concesionario del Túnel de Oriente, el mayor volumen de vehículos transitando por el túnel se da entre las 7:30 y 8:30 de la mañana y entre las 5:00 y 6:00 de la tarde (horas pico), recibiendo 1.200 vehículos en ese lapso. Se asume que el volumen de vehículos movilizados en horas valle representa el 40% de los vehículos en horas pico, lo que representa 480 vehículos por hora en ambos sentidos.

Con los datos anteriores, que son conservadores, es posible estimar el valor de cada una de las horas de operación del Túnel de Oriente, si se tiene en cuenta que estos vehículos movilizados pagarán un valor de peaje de $18.300. Así, el valor de los ingresos percibidos por el operador del túnel de acuerdo con los anteriores supuestos son en hora pico son COP$21.960.000 y COP$8.784.000 en hora valle.

Las horas del día en que se presentan con mayor frecuencia los accidentes son en los horarios entre las 4 y las 5 de la tarde, a las 6 de la tarde y entre las 9 y las 10 de la mañana. De esta información, destaca el hecho de que el mayor número de accidentes se presenta en el horario de la tarde en hora pico.

Los accidentes que predominan dentro del Túnel de Oriente son colisiones simples, en las que se involucra un vehículo automotor que colisiona con la estructura o elementos adicionales del túnel, representando el 68% de los accidentes. En este caso la afectación sobre la operación del túnel es generalmente parcial, ya que el vehículo siniestrado queda en una de las dos calzadas de la vía, permitiendo la utilización de la calzada libre y evitando el cierre total del túnel.

Para efectos de este análisis, se entiende que una colisión simple (la que se presenta con mayor frecuencia en el túnel), representa una disminución máxima del 20 % con relación a la operación normal del flujo de vehículos transitando por el túnel (cifra definida a partir de la experiencia del concesionario), lo cual significa que la afectación económica en hora pico es de COP$4.392.000 por hora y en el caso de hora valle es de COP$1.756.800.

Como se ha ilustrado a lo largo de este informe, el uso del celular es un factor de riesgo para la ocurrencia de accidentes de tránsito, indistinto del entorno en que se dé la conducción, reconociendo los riesgos significativamente mayores cuando ocurre en un túnel. Estas implicaciones aumentan si se pone en consideración que el Túnel de Oriente es bidireccional, especialmente cuando en las investigaciones revisadas se reporta que el riesgo de accidentes se incrementa en un factor de hasta cuatro (Brace y otros, 2007) con el uso del celular por parte del conductor. No obstante, este factor es aplicable a vías a cielo abierto. Los conductores que circulan dentro de túneles son menos propensos a sufrir un accidente, específicamente se habla de que en túneles hay 3 veces menos accidentes que en vías a cielo abierto , lo que significa un riesgo de accidente asociado al uso del celular dentro de túneles de 1,33. Según información del Túnel de Oriente se reporta, al comparar la accidentalidad en el túnel con la accidentalidad en la vía a cielo abierto usada anteriormente para ir al aeropuerto, la accidentalidad en el viaje al aeropuerto se redujo en un 47%, indicando en este caso que el riesgo de accidentes en general en el túnel es aproximadamente la mitad del riesgo en una vía a cielo abierto.

Estudios sobre las implicaciones del uso del celular en la accidentalidad (OMS, 2011), refiere que el 26% del total de accidentes son ocasionados por distracción del conductor y que el 68% de ese porcentaje, corresponde a accidentes producidos por distracción a causa de la manipulación de celulares. Lo anterior implica que el 17,7% de los accidentes de tránsito son a causa del uso del celular mientras se conduce, con lo cual se pueden estar subestimando la estadística real al día de hoy. En Colombia se puede llegar a una conclusión similar con el estudio realizado por el Fondo de Prevención Vial en el año 2006, en el cual se concluye que el 23% de los accidentes ocurren por distracción y el uso del celular mientras se conduce es la causa del 61% de esas distracciones, lo cual implica que el 14% de los accidentes de tránsito son a causa del uso del celular mientras se conduce. Igualmente, no se debe perder de vista, tal como se ha dicho anteriormente, que hay una aceptación general en el mundo de que todos estos registros están subestimados debido a la dificultad de identificar este tipo de infracciones.

Si tenemos en cuenta el número de accidentes dentro del Túnel de Oriente, es posible lograr un análisis en dos vías:

- Caso 1: Aplicando como promedio anual de accidentes de tránsito (a pesar de que el año 2020 estuvo atravesado por la pandemia del coronavirus) el número de accidentes ocurridos durante el 2020 (23).
- Caso 2: Partiendo de los datos del año 2019 (agosto - diciembre) y los meses de enero y febrero de 2020 (prepandemia), logrando un modelado de cifras para periodos normales.

Caso 1 (año atípico)

En el año 2020 ocurrieron en total 23 accidentes de tránsito dentro del túnel. En este primer caso se consideran dos escenarios.

- Escenario 1: Este primer escenario se refiere a la posibilidad de que se puedan incrementar hasta en un factor de 1,33 el número de accidentes dentro del Túnel de Oriente por uso del celular mientras se conduce, lo cual da un total de 30,6 accidentes por año (7,6 de ellos por uso de celular mientras se conduce).
- Escenario 2: El segundo escenario (más conservador) considera que el total de accidentes en el túnel se incrementará en un 17,7% debido a permitir el uso del celular en el túnel. En este sentido se estima que se presentarán en este escenario un total de 27,1 accidentes anuales (4,1 de ellos por uso del celular mientras se conduce).

Caso 2 (año con normalidad)

Entre agosto de 2019 y febrero de 2020, y proyectando las cifras para 5 meses adicionales para hacerlas comparables entre los dos casos, se obtuvo un total de 54,7 accidentes de tránsito en ese periodo. Para el cálculo de las cifras de accidentalidad para el caso 2 (año con normalidad), se recurrió a un modelo de regresión lineal para calcular los 5 meses sin información. La ecuación obtenida para calcular los datos faltantes es: $y = -0,1786x + 5,7143$, en donde y representa y x es. Los escenarios considerados son los mismos que para el caso 1, en cuyo caso se obtienen los siguientes resultados:

- Escenario 1: Un total de 72,8 accidente por año (18,1 accidentes adicionales por permitir el uso del celular en el túnel)
- Escenario 2: Un total de 64,4 accidentes anuales (9,7 accidentes adicionales por permitir el uso del celular en el túnel)

Se puede ver que hay una gran diferencia entre los dos escenarios considerados en los dos casos propuestos, lo cual se debe a la falta de información real sobre la accidentalidad en el Túnel de Oriente, especialmente a la relacionada con el uso del celular mientras se conduce. Debido a esta falta de información se han tenido que hacer muchos supuestos que llevan a estos niveles de incertidumbre. Esta información se debe tomar solo como referencia.

Para los dos casos anteriores es posible hacer un estimado del perjuicio económico que se causaría a la concesión, teniendo en cuenta la tipología de los accidentes de tránsito que regularmente se presentan en el túnel. Con base en la limitada información disponible consideramos que el 68% de los accidentes que se presentan en el túnel son colisiones simples (cierre parcial del túnel), siendo el restante 32% accidentes múltiples (cierre total del túnel).

Los resultados muestran para los escenarios del primer caso se presentan pérdidas que varían entre 271 y 316 millones de pesos colombianos (USD$68.000 y USD$79.000) por año por la accidentalidad en el túnel, de los cuales entre 41 y 76 millones de pesos colombianos (USD$10.000 y 19.000) se deberían a permitir el uso del celular en el túnel. En el caso del escenario 2 se tendrían pérdidas que varían entre 645 y 730 millones de pesos colom-

bianos (USD$161.000 y USD$182.500) por año por la accidentalidad en el túnel, de los cuales entre 97 y 181 millones de pesos colombianos (USD$24.250 y USD$45.250) se deberían a permitir el uso del celular en el túnel.

Hasta la fecha no se ha presentado ningún accidente vial en el túnel de Oriente, lo cual, de ocurrir, tendría implicaciones jurídicas para la concesión. En caso de que se origine un accidente mortal, la concesión estaría expuesta a la presentación de demandas civiles individuales o colectivas, tendientes a buscar una compensación económica frente a la perdida humana ocurrida tras un accidente. Estas situaciones en la idiosincrasia colombiana son muy recurrentes y es inadecuado que no se preste atención a este riesgo jurídico.

Para ilustrar esta situación, en Colombia a mayo de 2020 estaban en curso más de 1.500 demandas civiles con pretensiones que ascienden a más de 2 billones de pesos, del orden de 500 millones de USD (Agencia Nacional de Defensa Jurídica del Estado, 2020), por accidentes de tránsito, en las que el demandado generalmente es la Nación junto con entidades del orden territorial, INVIAS, la ANI, el Ministerio de Transporte o las concesiones viales. En promedio cada proceso que se pierde en los tribunales representa una pérdida económica que puede ir desde los $400 millones de pesos (accidentes con lesionados, heridos y pérdidas materiales), hasta los $1.100 millones (cuando hay mortalidad) (Agencia Nacional de Defensa Jurídica del Estado, 2020), sin contar con los gastos del proceso, que son asumidos generalmente por la parte perdedora.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Sobre los análisis realizados se pueden hacer las siguientes conclusiones:

- Hay muy pocas investigaciones sobre el uso de celulares en túneles y su impacto sobre la seguridad vial. No se ha encontrado literatura que trate este problema de seguridad vial, celulares y túneles a profundidad. Solamente se logró encontrar un par de artículos o documentos sobre el asunto.
- Hay un reconocimiento general que cuando ocurren accidentes similares en vías a cielo abierto o en túneles, estas son mucho más graves cuando ocurren en túneles debido a que es un espacio confinado, que exacerba los efectos de los accidentes. Igualmente, estos accidentes tienden a ser más graves en túneles bidireccionales que en túneles unidireccionales. Según la literatura internacional, en túneles bidireccionales ocurren hasta tres veces más accidentes que en túneles unidireccionales.
- Los estudios son contundentes en señalar que el uso de celulares durante la conducción afecta drásticamente el rendimiento de los conductores y por consiguiente su capacidad para reaccionar ante una situación imprevista.
- Hay un reconocimiento generalizado a nivel mundial de que las cifras sobre las colisiones debidas al uso de teléfonos celulares mientras se conducen son subestimadas de manera importante.
- En Europa y USA la reglamentación sobre el uso de celulares se aplica de igual manera en vías a cielo abierto y en túneles. No hay regulación específica para túneles.
- El incremento esperado de accidentes por permitir el uso de celulares en túneles unidireccionales se estima de manera aproximada entre un 14 % y un 33 %, con las respectivas consecuencias económicas por la falta de flujo vehicular en los peajes.
- No hay ninguna regulación en Colombia que obligue a suministrar conectividad a los teléfonos móviles en las vías del país, incluyendo los túneles.
- Es necesario que se realice un estudio más riguroso en esta índole, para sopesar las implicaciones que tendría permitir el uso de celulares dentro del Túnel de Oriente, con miras a identificar los potenciales escenarios en los que se podría ver involucrada la concesión y las posibles pérdidas económicas a las que se vería expuesta. Cálculos hechos en este estudio indican un incremento en las pérdidas por ingresos al concesionario podrían llegar a ser del orden de USD$ 45.000.

Como recomendaciones se tienen:

- Sí se permite el uso de celulares en el túnel, toda medida que se pueda tomar para mitigar el impacto del uso de celulares durante la conducción en la accidentalidad debe ser implementada. Es mandatorio que se dispongan de más elementos activos y pasivos para la prevención, mitigación y atención de accidentes dentro del Túnel, así como implementar estrategias educativas y de sensibilización frente a la accidentalidad. Inicialmente, a falta de estudios más detallados se recomiendan las siguientes medidas de mitigación:
- Recordar frecuentemente a los usuarios de que no deben usar el celular mientras conducen en los paneles informativos al interior del túnel.
- Entrega de volantes en los peajes sobre este tema.
- Campañas educativas al final del recorrido del túnel con las cámaras para detectar infractores (comparendos pedagógicos y sancionatorios).
- Articulación con las autoridades de tránsito para implementar frecuentes, constantes y, recurrentes campañas de control – sanción por el uso de celulares en el túnel con la policía o agentes de tránsito.
- Revisar permanentemente los equipos del túnel para atender emergencias por accidentes. Realizar simulacros.
- Revisar que la señalización en el túnel siempre este en óptimas condiciones y sea la adecuada.
- Implementar un sistema en el túnel que permita enviar a los radios de los vehículos mensajes indicando que la señal de celulares es solo para los acompañantes y que está prohibido el uso por parte de los conductores.
- Sí se llega a colocar la señal para celulares en el túnel, se recomienda que se hagan estudios y mediciones periódicas controladas en el túnel para evaluar el impacto de permitir el uso de celulares en el túnel con la seguridad vial.

9. REFERENCIAS

- Agencia Nacional de Defensa Jurídica del Estado – Reporte a mayo de 2020.
- AXA Prévention, En 15 ans, le téléphone rejoint les grands risques routiers, 2019
- Brace C.L., K.L. Young and M.A. Regan, Analysis of Literature: The use of mobile phones while driving, Monash University Accident Research Centre, 2007
- Caird J.K., K.A. Johnston, C.R. Willness, M. Asbridge, and P. Steel, A meta-analysis of the effects of texting on driving, Accident Analysis and Prevention 71 (2014) 311–318
- Canadian Council of Motor Transport Administrators CCMTA, Use of Electronic Communication Devices by Canadian, 2018
- Canadian Council of Motor Transport Administrators CCMTA, Distracted Driving White Paper, 2018
- Centre for Accident Research & Road Safety CARRS, Mobile phone use & distraction, 2018
- Centre for Accident Research & Road Safety CARRS, Scoping Study of Mobile Phone Use While Driving, 2017
- Choudhary P. and N.R. Velaga, Modelling driver distraction effects due to mobile phone use on reaction time, Transportation Research Part C 77, 2017

- Choudhary P. and N.R. Velaga, Driver behaviour at the onset of yellow signal: A comparative study of distraction caused by use of a phone and a music player, Transportation Research Part F 62, 2019
- Concesionario Vía al Mar, Reporte de Accidentalidad en el Túnel de Occidente en el periodo 2017-2020, 2020
- Concesionario Túnel de Oriente, Reporte de Accidentalidad en la Concesión vial Túnel de Oriente periodo 2019-2021, 2021.
- Department for Transport, Reported Road casualties Great Britain, London, 2008
- DGT Dirección General de Tráfico de España, Anuario Estadístico de Accidentes, 2008
- European Commission, Cell Phone Use While Driving, European Commission, Directorate General for Transport, 2015.
- European Transport Safety Council, Position on Revision of the Road Infrastructure Safety Management Directive 2008/96 and Tunnel Safety Directive 2004/54, 2018
- FIA Fédération Internationale de l'Automobile. Policy Position on Road Infrastructure and Tunnel Safety, 2018.
- FPV Fondo de Prevención Vial. Factores de distracción entre conductores, 2006
- Hargan K. and Morrison C., Calling time on hands-free? Government considers blanket ban on mobile phone use while driving, Clyde & Co LLP, 2019
- Hosking S., K. Young and M. Regan, The effects of text messaging on young novice driver performance. In: Faulks I.J. et al, eds. Distracted driving.
- Horsman G. and Conniss L. R., Investigating evidence of mobile phone usage by drivers in road traffic accidents. Digital Investigation, 12, 2015
- House of Commons, Transport Committee, UK, Road safety: driving while using a mobile phone: Government Response to the Committee's Twelfth Report of Session 2017–19, 2019
- INVIAS Instituto Nacional de Vías, Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento para túneles de carretera en Colombia, 2015
- Insurance Institute for Highway Safety, Distracted Driving, 2020, https://www.iihs.org/topics/distracted-driving#overview
- International Transport Forum ITF, Benchmarking de la Seguridad Vial en América Latina
- Leidschendam, Netherlands, Use of mobile phone while driving [fact sheet]. SWOV, 2008
- Lipovac K., M. Đeric´, M. Tešic´, Z. Andric´ and B. Maric, Mobile phone use while driving-literary review, Transportation Research Part F 47, 2017
- McCartt A.T., Hellinga L.A. and Bratiman K.A., Cell phones and driving: review of research. Traffic Injury Prevention. 7 (2), 2006
- McCartt A.T., D.G. Kidd and E.R. Teoh, Driver Cellphone and Texting Bans in the United States: Evidence of Effectiveness, Engaged Driving Symposium, Annals of Advances in Automotive Medicine, 2014
- McEvoy S and M Stevenson. An exploration of the role of driver distraction in serious road crashes. In: IJ Faulks et al, eds. Distracted driving. Sydney, Australasian College of Road Safety, 2007
- Ministère de L'écologie, du Développement Durable et L'énergie, France, Textes Législatifs et Réglementaires sur la Sécurité des Tunnels Routiers, 2016

- National Safety Council. Crashes Involving Cell Phones; Challenges of Collecting and Reporting Reliable Crash Data. 2012
- National Highway Traffic Safety Administration NHTSA, Distracted Driving 2013. Traffic Safety Facts Research Note. Available from: http://www.distraction.gov/downloads/pdfs/Distracted_Driving_2013_Research_note.pdf.
- National Highway Traffic Safety Administration NHTSA, Distracted Driving 2013. Traffic Safety Facts Research Note. Report number: DOT HS 812 132.Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- National Highway Traffic Safety Administration NHTSA, Traffic safety facts: an examination of driver distraction as recorded in NHTSA databases. Research Note, DOT HS 811 216, 2009
- NHTSA National Highway Traffic Safety Administration. What is Distracted Driving? Facts and Statistics, 2015. Available from: http://www.distraction.gov/stats-research-laws/facts-and-statistics.html.
- NHTSA National Highway Traffic Safety Administration. Traffic Safety Facts, Distracted Driving in Fatal Crashes 2017
- NHTSA National Highway Traffic Safety Administration. Driver Electronic Device Use in 2017, DOT HS 812 665, 2019
- NSC National Safety Council. Understanding Driver Distraction, 2020.
- NSC National Safety Council. Understanding the distracted brain White Paper, 2012
- NRSC National Road Safety Committee, Ministry of Transport. Safer Journeys. New Zealand's road safety strategy 2010-2020.
- Nikolaev A.G., M.J. Robbins and S.H. Jacobson, Evaluating the impact of legislation prohibiting hand-held cell phone use while driving, Transportation Research Part A 44, 2010
- Observatoire national interministériel de la sécurité routière, La sécurité routière en France, Bilan de l'accidentalité de l'année 2018
- Organización Mundial de la Salud, Uso del celular al volante: un problema creciente de distracción del conductor, 2011
- Organización Mundial de la Salud, Salve Vidas: Paquete de medidas técnicas de seguridad vial, 2017
- Oviedo-Trespalacios O., Md.M. Haque, M. King and S. Washington, Understanding the impacts of mobile phone distraction on driving performance: A systematic review, Transportation Research Part C 72, 2016
- PIARC Asociación Mundial de la Carretera, Recomendación de PIARC sobre el enfoque a seguir para considerar la Directiva 2008/96/EC en el ámbito de los túneles de carretera, 2013
- PIARC Asociación Mundial de la Carretera, Human Factors and Road Tunnel Safety Regarding Users, 2008
- PIARC Asociación Mundial de la Carretera, Prevention and Mitigation of Tunnel-Related Collisions, 2019
- Queensland Government, Department of Transport and Main Roads, Tunnel safety, 2020
- Redelmeier D.A. and R.J. Tibshirani. Association between Cellular Telephone Calls and Motor Vehicle Collisions. N Engl J Med 336, 1997
- Rudin-Brown C.M., K.L. Young, C. Patten, M.G. Lenné and C. Ruggero, Driver distraction in an unusual environment: effects of text- messaging in tunnels. Monash University Accident Research Centre (MUARC), Clayton, Australia, 2018
- Safe Tunnel, Guidelines for Tunnel Safety, 2007

- Sécurité Routière, Smartphone au volant, 2015
- Sécurité Routière, Prévalence de l'usage du téléphone au volant et accidents
- Sécurité Routière, Le téléphone et la conduite
- Sécurité Routière, Mesures de sécurité routière sur le téléphone au volant en France et à l'étranger
- Swedish Road Administration, Cooperative ITS for Safer Road Tunnels: Recommendations and Strategies, 2014
- The Royal Society for the Prevention of Accidents RoSPA, The Risk of Using a Mobile Phone While Driving
- The Royal Automobile Club Foundation RAC Foundation, International Review of Road Collision Investigation Approaches, 2020
- The Royal Automobile Club Foundation RAC Foundation, Roads policing review: call for evidence, 2020
- Transport Canada. National Collision Database (NCDB). 2007
- Unión Europea, Road infrastructure safety management, 2020
- Unión Europea, Directiva (UE) 2019/1936 del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2019 por la que se modifica la directiva 2008/96/CE sobre gestión de la seguridad de las infraestructuras viarias
- Urie, Y., Velaga, N.R. and A. Maji. Cross-Sectional Study of Road Accidents and Related Law Enforcement Efficiency for Ten Countries: A Gap Coherence Analysis. Traffic Inj. Prev. 17 (7), 2016
- Vägverket, Analysis of Literature: The use of mobile phones while driving, 2007
- Zendrive Research, Largest Distracted Driving Behavior Study, 2017

SÉCURITÉ DES TRAVAUX DE RÉPARATION DU TUNNEL EFFONDRÉ DE JEBEL EL OUAHCH-CONSTANTINE

Said Sitayeb
Directeur du Laboratoire central des matériaux Groupe COSIDER Algérie
Nadjim Boumezoued
Directeur du projet Groupe COSIDER Algérie
Mahmoud Arslane
Directeur Technique Groupe COSIDER Algérie

Le présent article fournit une description des événements et de l'état des fouilles, des revêtements et de la zone endommagés du tunnel T1, liées aux phénomènes d'effondrement et les endommagements qui ont eu lieu le 01/01/2014. Le tunnel se trouve sur l'Autoroute Est-Ouest à hauteur de la ville de Constantine, à l'Est de l'Algérie. L'ouvrage traverse la montagne « Djebel El Ouahch », située au Nord Est de la ville de Constantine. En termes dimensionnels, le tunnel est un bitube de longueur 1 909m environ, avec une section en forme de voûte surbaissée avoisinant 190 m2. La couverture maximale du tunnel est de 140 m.

Un éboulement a eu lieu au tube gauche entre le PK206+160 et le PK206+265 sur une longueur de 105 m (ce dernier PK correspond au front d'élargissement au jour de l'effondrement). L'effondrement avait endommagé, et d'une façon grave, le tube droit déjà achevé (ouvert à la circulation) en causant la rupture du revêtement définitif du tube droit. La longueur totale de la zone abimée est de 125 m environ et elle comprend les plots numérotés de 63 (côté Sud) à 72 (côté Nord).

SEGURIDAD DE LAS OBRAS DE REPARACIÓN DEL TÚNEL COLAPSADO DE JEBEL EL OUAHCH-CONSTANTINE

Este artículo proporciona una descripción de los hechos y el estado de las excavaciones, los revestimientos y la zona dañada del túnel T1, relacionados con los fenómenos de derrumbe y los daños producidos el 01/01/2014. Se produjo un deslizamiento en el tubo izquierdo entre PK206+160 y PK206+265 en una longitud de 105 m (este último PK corresponde al frente de ensanche el día del hundimiento). El hundimiento había dañado gravemente el tubo recto ya terminado (abierto al tráfico) al provocar la rotura del revestimiento final del tubo recto. La longitud total del área dañada es de aproximadamente 125 my comprende las parcelas numeradas 63 (lado sur) a 72 (lado norte).

Se produjo un deslizamiento en el tubo izquierdo entre PK206+160 y PK206+265 en una longitud de 105 m (este último PK corresponde al frente de ensanche el día del hundimiento). El hundimiento había dañado gravemente el tubo recto ya terminado (abierto al tráfico) al provocar la rotura del revestimiento final del tubo recto. La longitud total del área dañada es de aproximadamente 125 my comprende las parcelas numeradas 63 (lado sur) a 72 (lado norte).

SAFETY OF THE REPAIR WORKS OF THE COLLAPSED TUNNEL OF JEBEL EL OUAHCH-CONSTANTINE

This article provides a description of the events and the condition of the excavations, the linings and the damaged area of the T1 tunnel, related to the phenomena of collapse and the damage that took place on 01/01/2014. A landslide took place in the left tube between PK206+160 and PK206+265 over a length of 105 m (this last PK corresponds to the widening front on the day of the collapse). The collapse had seriously damaged the straight tube already completed (open to traffic) by causing the rupture of the final coating of the straight tube. The total length of the damaged area is approximately 125 m and it includes plots numbered 63 (south side) to 72 (north side).

A landslide took place in the left tube between PK206+160 and PK206+265 over a length of 105 m (this last PK corresponds to the widening front on the day of the collapse). The collapse had seriously damaged the straight tube already completed (open to traffic) by causing the rupture of the final coating of the straight tube. The total length of the damaged area is approximately 125 m and it includes plots numbered 63 (south side) to 72 (north side).

1. PRÉSENTATION DU PROJET

Le tunnel se trouve sur l'Autoroute Est-Ouest dans la wilaya de Constantine. L'ouvrage traverse la montagne « Djebel El Ouahch », située au Nord Est de la ville de Constantine.

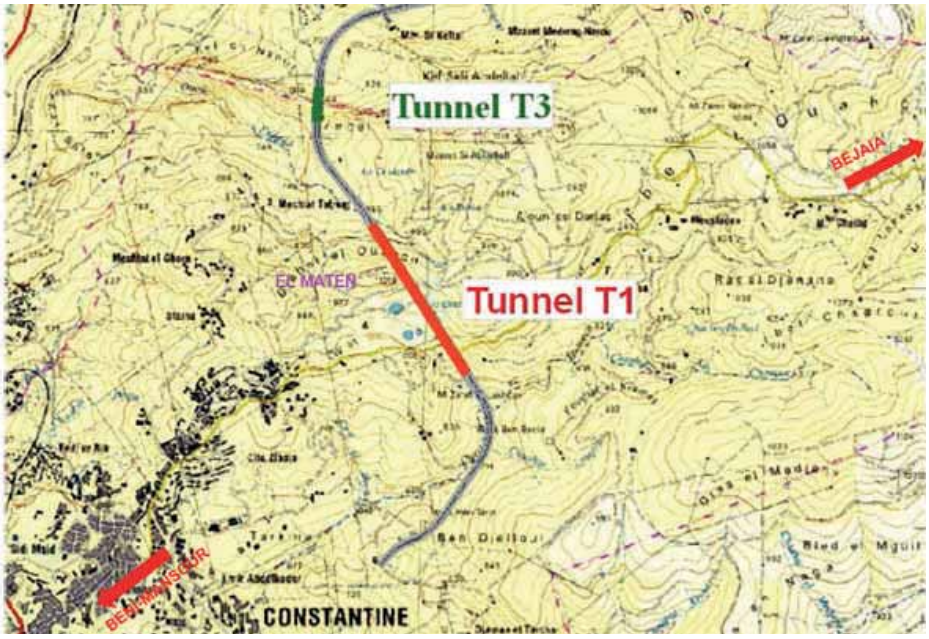


Fig 1. : emplacement du tunnel

En termes dimensionnels, le tunnel est un bitube de 1 909 m de longueur, avec une section de 190 m2 en forme de Voûte surbaissée. L'emplacement des tubes gauche et droit du tunnel T1 ainsi que leur longueur sont indiqués dans le tableau suivant. :

Tableau 1 : Coordonnées kilométriques des deux tubes du Tunnel T1

Pk au début		**Pk à la fin**		**Longueur totale**	
Tube Gauche	**Tube Droit**	**Tube Gauche**	**Tube Droit**	**Tube Gauche**	**Tube Droit**
205+393	205+407.5	207+302	207+316.5	1909	1909

En termes dimensionnels, le tunnel est un bitube de longueur 1 909m environ, avec une section en forme de voûte surbaissée avoisinant 190 m2. La couverture maximale du tunnel est de 140 m. La largeur de la section d'excavation est égale à environ 18m et la largeur du pilier central est de 17 m environ. La pente longitudinale du tunnel étant de 4%. Des galeries d'interconnexion y sont conçues tous les 380 m environ.

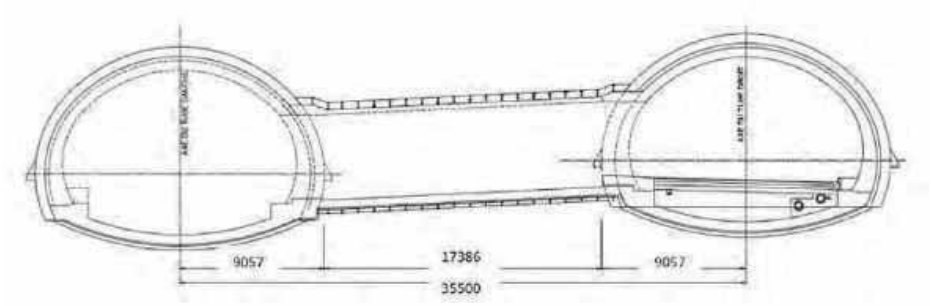


Figure 2 : Coupes-types

2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

2.1. Géologie régionale

Du point de vue géomorphologique, le tunnel T1 traverse la zone montagneuse boisée du Djebel Ouahch. La carte géologique d'El Aria aux 1/50 000 ème, montres une structure complexe (Figure 3). Les grands ensembles lithologiques sont représentés par des nappes de charriage où dominent les unités marneuses et marno-calcaires à la base, d'âge crétacé. Ces unités sont recouvertes, dans la région du Djebel Ouahch, par la nappe numidienne (oligocène) formée par des grès grossiers, massifs, au sommet et des argiles à la base. Des colluvions épaisses, de plusieurs dizaines de mètres, grossières, à blocs gréseux et à matrice sableuse, d'âge quaternaire, recouvrent largement les formations allochtones.

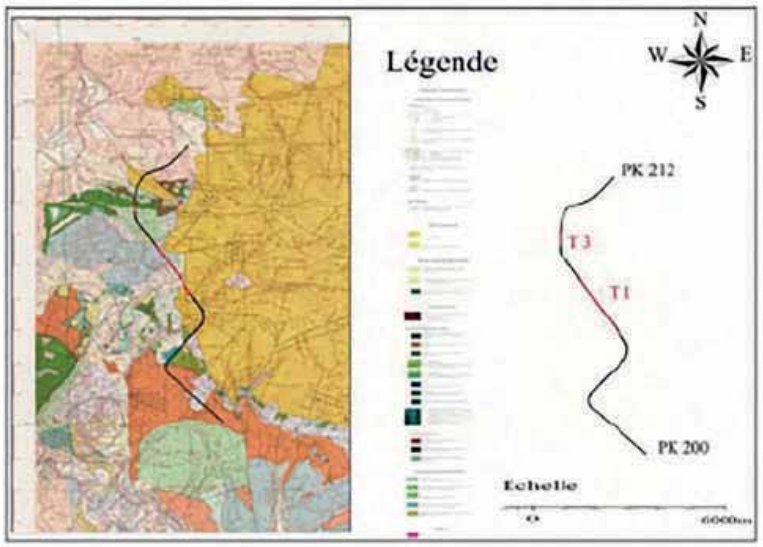


Figure 3 : La superposition du tracé sur la carte géologique d'El-Aria

Sur la base du modèle géologique conçu dans le Dossier d'Exécution, on peut observer que dans la zone d'intervention :

- le tunnel se situe entièrement dans la formation marneuse et marno-calcaire correspondant à la nappe tellienne d'âge campanien – maastrichtien et en particulier dans l'unité géologique des argilites du crétacé (Figure 6-4) ;

- en surface, la formation lithologique des colluvions quaternaires affleure localement. Les colluvions grossières sont représentées par des éléments gréseux hétérométriques : galets et blocs anguleux enrobés dans une matrice limoneuse rousse ;
- au côté du tunnel, les relevés géophysiques ont montré la présence d'une zone de faible résistivité électrique étendue, le long du tube gauche, entre le PK 205+900 et le PK 206+550 environ.

2.2. Conditions hydrogéologiques

Le long du tunnel, le niveau d'eau dans le sondage LT-04 a été mesuré à 91 mètres de profondeur, soit au sein de l'horizon gréseux qui est sous-jacent aux argilites. L'horizon gréseux agit ainsi comme couche drainante sous les argilites. Alors que les sondages LT-05NB ont révélé de l'eau en surface. La nature argileuse des formations rencontrées pourrait ainsi former une barrière étanche aux eaux infiltrées.

3. CHRONOLOGIE DES ÉVÈNEMENTS

Le premier janvier les opérations d'excavation ont été à l'arrêt en raison des festivités du nouvel an. Entre 16 heures et 16.30, un éboulement a eu lieu au tube gauche entre le PK206+160 et le PK206+265 sur une longueur de 105 m (ce dernier PK correspond au front d'élargissement au jour de l'effondrement). L'effondrement avait endommagé, et d'une façon grave, le tube droit déjà achevé (ouvert à la circulation) en causant la rupture du revêtement définitif du tube droit. La longueur totale de la zone abimée est de 125 m environ et elle comprend les plots numérotés de 63 (côté Sud) à 72 (côté Nord). Heureusement que personne n'a été blessé, cependant, le tube droit avait été réputé en danger pour le risque d'un affaissement total.

A la fin du mois de janvier et en février, le tunnel gauche est mis en sécurité par remplissage latéral en béton massif, adossé le long des piédroits en préservant, un passage longitudinal en correspondance de la calotte, ouvert.

4. CAMPAGNE D'INVESTIGATIONS APRÈS L'ÉBOULEMENT

Au cours des premiers mois successifs à l'effondrement (janvier - février), des investigations ont été effectuées, afin d'estimer :

- la distribution de la zone de décompression et des cavités produites autour des tubes droit et gauche
- l'extension de la zone d'effondrement du tube gauche ;
- l'état des dommages produits sur le revêtement du tube droit ;
- les causes et le mécanisme d'apparition de cet éboulement.

Les investigations effectuées comprennent :

- Investigation géophysiques ;
- Investigation par sondage depuis le sol de surface ;
- Investigation par sondage depuis l'intérieur du tunnel :
- Sondage horizontal depuis le tube droit
- Carottage du béton de revêtement du tube droit
- Forage d'exploration depuis le front d'éboulis Sud du tube gauche

- Observation par caméra dans le trou de forage et dans la galerie pilote du tube gauche
- Forage d'exploration depuis le tube droit
- Essais en laboratoire sur les matériaux ;
- Mesures de convergence ;

5. DESCRIPTION DES EFFETS DE L'ACCIDENT

5.1. Extension de la zone de décompression

Afin d'investiguer l'extension de la zone de décompression induit par l'effondrement, 22 sondages verticaux ont été effectués à la profondeur de tunnel. L'état de déformation des matériaux a été investigué enregistrant les diagraphies et mesurant la vitesse de propagation des ondes sismiques. Toutefois, seulement la mesure des pertes d'eau de forages a permis la définition de la zone décomprimée, par contre il n'était pas possible de définir une corrélation entre la vitesse des ondes S avec la densité des argilites.

Seulement 8 forages entre le 22 effectuées ont présentés de fortes pertes d'eau et 7 se situent sur l'axe du tube gauche. La cloche semblerait présente en correspondance du tube gauche, comme montré par les investigations transversales à l'axe du tube gauche depuis le tube droit (sections individués par les forages destructifs A-A,B-B, C-C).

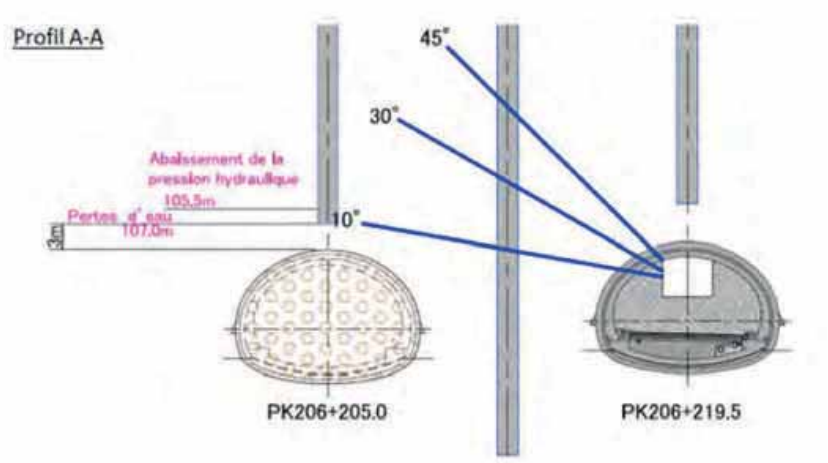


Figure 4. Sections individués par les forages destructifs A-A

Le niveau de la cloche le long du tube gauche est matérialisé par la ligne rouge dans la Figure 5. Les caisses des carottes du V1, l'unique carottée, confirment cette géométrie et ils ne montrent pas une diminution de la compacité du terrain encaissant du tunnel en fonction de la profondeur. Au moment de l'éboulement tout le terrain décomprimé entre dans le tunnel et la cloche se forme ; la hauteur de la cloche donne une appréciation d'un niveau de décompression du terrain encaissant juste avant l'éboulement. On constate que la hauteur maximale de la cloche détectée par les sondages se situe en correspondance la galerie de passage des piétonnes CP2.

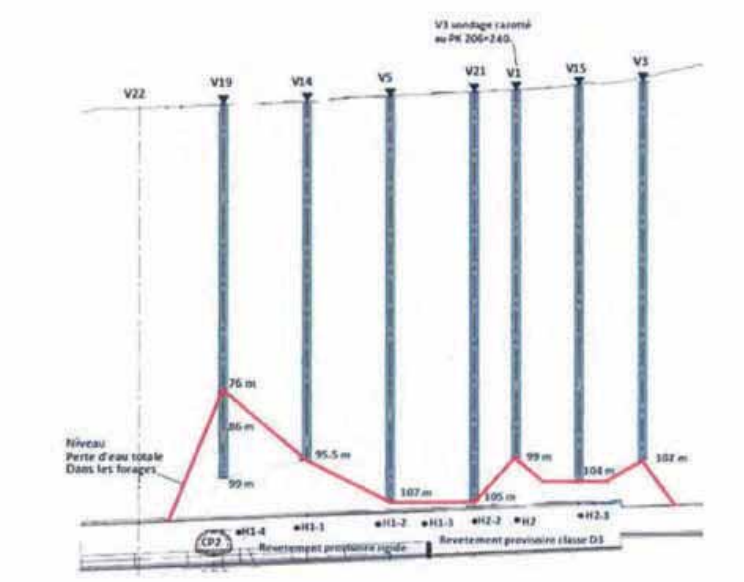


Figure 5. Profil de la cloche en axe au tube gauche

5.2. Situation au tube gauche

Les carottes obtenus par les forages horizontaux (H) effectuée à partir du tube gauche jusqu'au le tube droit, montrent clairement que l'éboulement a engendré l'effondrement du sol à l'intérieur de l'excavation dans la zone compris entre le plot 62 et le plot 71 (Figure 6). Ce phénomène est confirmé par les sondages à partir du front de taille sud. En effet, les 4 forages effectués en avant (aussi bien à l'axe du tube que latéralement) indiquent que les colluvions sont présentes jusqu'au 40 m au-delà du front de taille (environ pk 206+150) et que les cintres sont effondrées (les forages ont interceptés parties de ces soutènements au centre de la section jusqu'au 33m au-delà du front de taille. De plus, les deux forages inclinés avec peinte 30° ont individué des colluvions aussi au-dessus de la clé du tunnel, en accord au schéma décrit dans le paragraphe précédent.

Figure 5. Profil de la cloche en axe au tube gauche

Au côté nord, l'effondrement du tube gauche touche la gallérie pilote au plot 71, avec en conséquence le soulèvement de la contre voûte (Figure 7).

Figure 7. Photo du front d'éboulement nord depuis le pk 206+330

Une vidéo camera introduite à l'intérieur du sondage H 2.3.montre l'etat du tube gauche dans la zone au PK206+255. Les images (Figure 8) montrent que :

- une partie du revêtement est encore en place ;
- le tube gauche continue encore à collapser, 5 mois après l'éboulement, en indiquant l'absence de consolidation du terrain.

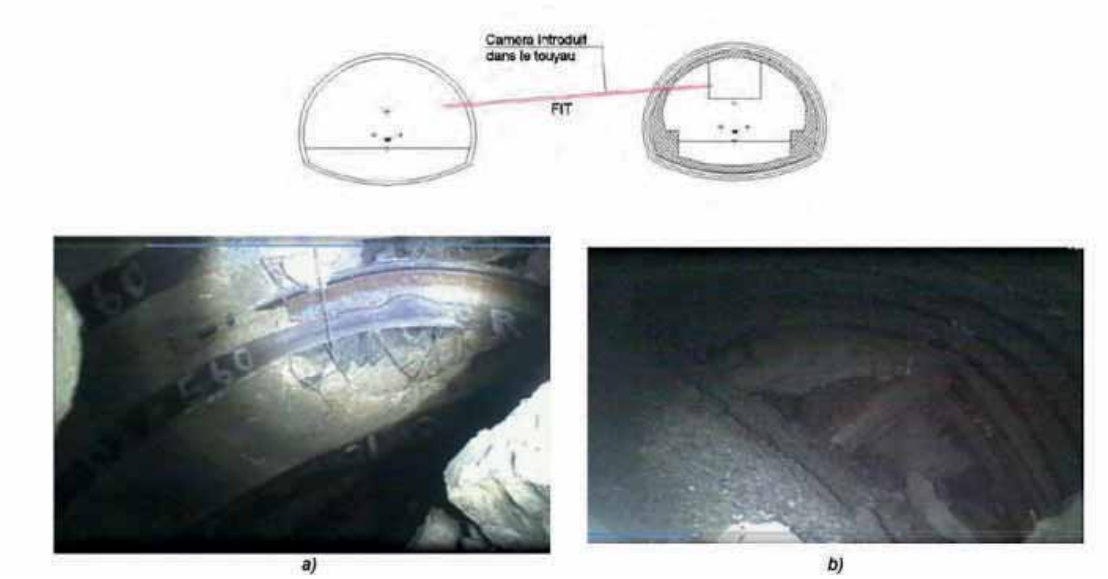


Figure 8. Situation côte gauche (a :vers le Sud ; b : vers le Nord)

5.3. Situation au CP2

Le front d'éboulement est arrivé jusqu'au plot 61 gauche et la CP2 est en partie remplie. Les 4 forages effectués au-dessus de la clé du CP2 (1 depuis le front d'éboulement sud du tube gauche et 3 depuis le tube droit) confirment le bon état du terrain naturel au-dessus de la galerie piétonne.

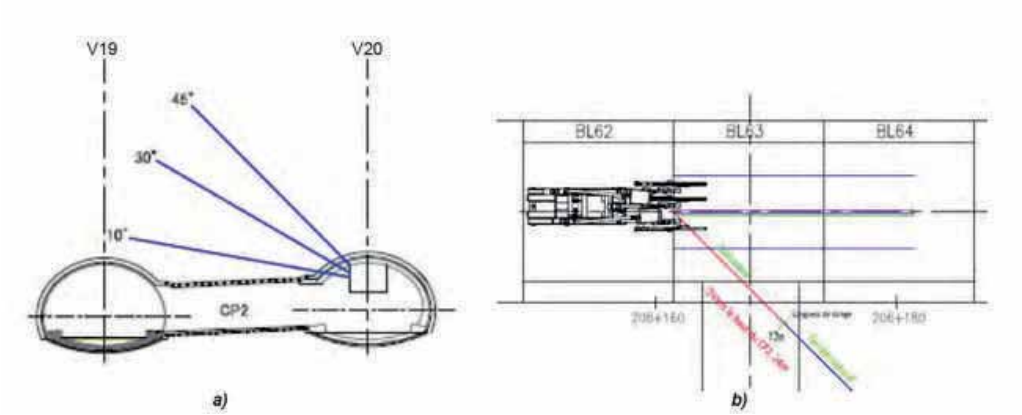


Figure 9. Forages effectués au-dessus du toit du CP2

5.4. Situation au tube droit

L'éboulement a engendré une incidence importante au niveau du tube droit déjà terminé et ouvert à la circulation. La comparaison entre les mesures de convergence du revêtement du tube droit avant et après éboulement permettent de comprendre que le tube a subit un tassement et que il se déplace vers le tube gauche, jusqu'au 0.3-0.4m au maximum dans la section PK220÷260 du tube gauche. La Figure 10 montre clairement le décalage progressif entre la banquette gauche et la chaussée.

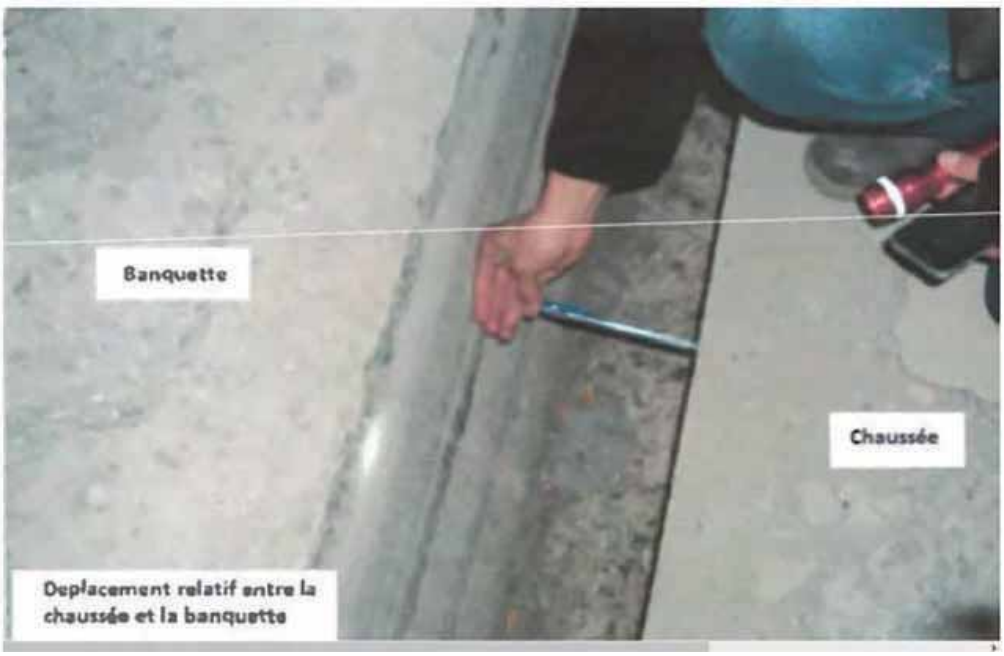


Figure 10. Décalage progressive entre la banquette gauche et la chaussée

Dans l'état actuel, une rupture du revêtement définitif du tube droit a été relevée entre les PK 206+182.25 (localisation du portail de CP2) et 206+300. La longueur totale de la zone abimée est de 118 m environ et elle comprend les plots du numéro 63 (côté Sud) au numéro 72 (côté Nord). Au contraire, les voûtes 61, 62, 73 et 74 du tube droit sont légèrement fissurées. Les revêtements auprès du portail de la CP2 montrent une rupture évidente par cisaillement (Figure 11).

Figure 11. Présence d'éclatement du béton définitif et de flambement du ferraillage dans le tunnel

Figure 12. Les dégâts au revêtement du tube droit (vue vers le sud).

5.5. Situation de la galerie pilote T1 Sud

Les dégâts (destruction) montrés par les photos et par le plan de déformation du béton projeté de la galerie pilote se résument comme suit:

- Détachement du béton définitif de la calotte et des piédroits du tunnel pour 20 m à partir du front de taille sud de l'éboulement ;
- Soulèvement du radier à partir du PK206+320 avec une longueur de 35m vers le sud (Figure 7.)

5.6. Effets produits en surface

L'effondrement du tunnel a induits un tassement en surface, dommages à un bâtiment et fissurations de traction et compression dans la chaussée du parking (Figure 13). Un mappage détaillé de ces fissures est montré dans le plan des fissures. Durant 5 mois après l'effondrement, le tassement du terrain atteint valeurs d'environ 20 mm.

Figure 13. Ouvrages dans les avoisinant de la zone effondrée et détail des fissures de compression dans la chaussée

6. CONCEPTION ET SOLUTION

6.1. Identification des zones d'intervention

Le tunnel à une section principale effondré de tube gauche (sur 125 ml) est divisé en trois zones :

- première zone entre le plot 62 et 64 : radier définitif déjà réalisé (Non en place) avec le plot 63 connecté rigidement avec le radier du CP2 et du tube droit et hauteur de la cloche plus importante;
- deuxième zone entre le plot 65 et 67 : radier définitif déjà réalisé (Non en place), avec hauteur de la cloche moyenne et la présence des engins ensevelies ;
- troisième zone entre le plot 68 et 72 : l'absence du radier définitif en béton armé avec hauteur de la cloche qui remonte, présence des engins et une zone très« sensible» au niveau des plots 70 ,71,72.

6.2. les Critères de développement de la solution adoptée

La conception de réparation du tube gauche dans la zone d'effondrement a été développée à travers les critères suivants :

- la caractérisation des masses rocheuses, au moyen de l'identification des caractéristiques géologiques, lithologiques et géomécanique et par la rétro-analyse effectuée sur la base des données d'auscultation ;
- la prédiction du comportement de l'excavation en l'absence d'interventions ;
- l'identification des sections de type excavation, support et revêtement en fonction des conditions géotechniques supposées ;
- vérification du comportement par analyse numérique.

6.3. Les principaux risques

En particulier, il est prévu que la réduction des risques liés au contexte de fragilité de la zone effondrée est confiée à l'adoption des facteurs de sécurité plus élevés que ceux des autres zones d'excavation concernant les seuils de surveillance, afin d'augmenter le temps disponible pour la mise en œuvre de contre-mesures et observation précise du gradient de déformation, afin d'anticiper tout phénomène lié à de grandes déformations. Les risques identifiés sont liés aux éléments suivants :

6.3.1. Instabilité du front de taille

Le front d'excavation est très grand, à la fois en largeur et en hauteur. Dans ce cas, le problème est lié à la présence de matériaux affaissés qui présente des vides importants à l'intérieure, avec des caractéristiques d'hétérogénéité locale plus un soutènement existant effondré composé de cintre en HEB et Béton Projeté, et la présence d'engins emprisonnées à l'intérieur de la section qui doivent être enlevés au cours de l'excavation ainsi que les radier existants qui sont des facteurs stabilisant au cours de creusement mais doivent être démolis après éloignement du Front d'excavation. Ces critères donnent des caractéristiques inférieures par rapport au matériau d'origine. Par conséquent, l'état d'effort est inférieur à celui d'une excavation vierge dans une masse rocheuse compétente.

6.3.2. Capacité portante de la section

Une forme particulière d'instabilité est relative à la capacité portante de la section, qui en cas de charges excessives peut conduire à l'abaissement de la section avec une contrainte mayeur sur les supports et sur le pilier entre les deux tunnels.

6.3.3. Effets induits sur le pilier

Le Pilier entre les tunnels et effets sur le tube droit déjà gravement endommagé, afin d'éviter la possibilité d'un effondrement complet. La stabilité du pilier est un aspect particulièrement important. Le pilier a subi des déplacements lors du phénomène d'effondrement, et il faut prendre en compte qu'il est nécessaire d'élargir la galerie de gauche puis de restaurer le tunnel droit, il est donc nécessaire augmenter la résistance et la rigidité.

Pour cette raison, des interventions de consolidation de la cloche sur le tube gauche et le pilier entre les deux tubes ainsi que la zone au contour de la section de tube droit ont été prévues, avec des confortement au front de taille par des tubes en acier en voute parapluie et des fibres de verres au front, pour que la contribution du front et le terrain éboulé dans la stabilité générale de l'excavation est réduite, de sorte qu'aucun mou-

vement d'extrusion excessif ou instabilité de terrain encaissant ne soit généré et que le matériau reste en place jusqu'à la phase d'installation des nouveaux supports, avec le revêtement définitif.

6.4. Consolidation de la partie effondrée du tube gauche à partir de tube droit

La consolidation de la partie effondrée est divisée sur trois parties :

6.4.1. Consolidation du Pilier entre les deux tubes

La consolidation du pilier a été faite par des forages a partir de tube droit vers le tube gauche et l'introduction des éléments structurels en fibres de verres en Tri-Lames avec des injections en pression de 15 bars de coulis de ciment avec des critères d'arrêt selon la méthode GIN.

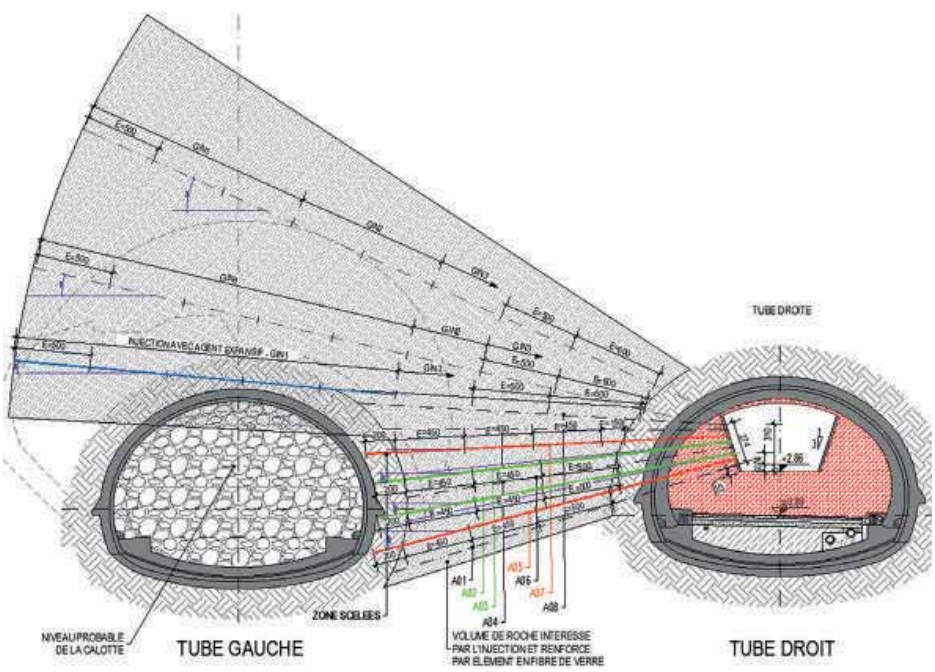


Figure 14. Renforcement du Pilier par éléments structurels et injections

6.4.2. Consolidation de la partie Calotte de tube Gauche

La consolidation de la calotte de tube gauche est faite par des forages à partir de tube droit avec l'introduction des éléments structurels en tri-lames de fibre de verre et des injections en pression de 20 bars de coulis de ciment avec des critères d'arrêt selon la méthode GIN.

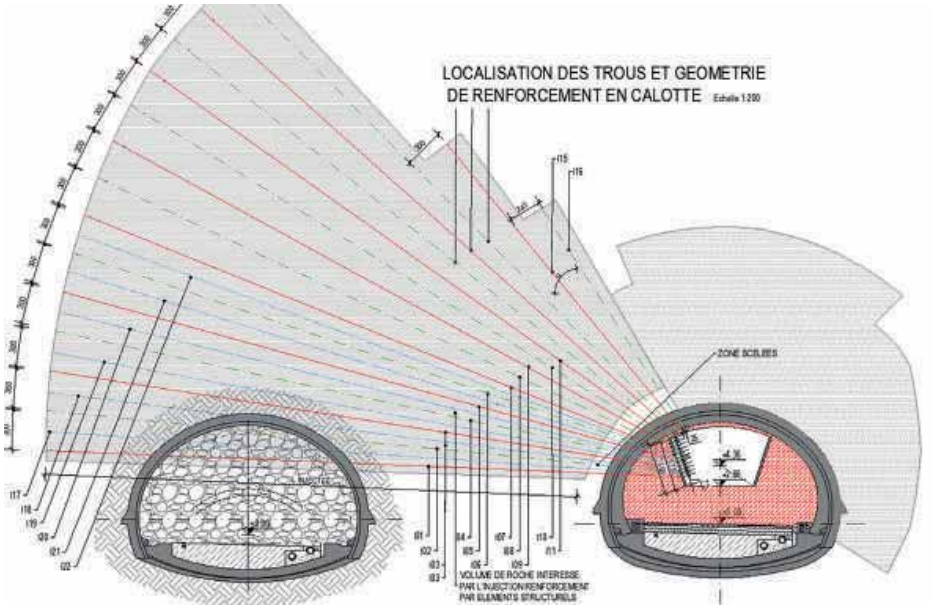


Figure 15. Renforcement de la calotte de tube gauche par éléments structurels et injections

6.4.3. Consolidation de la partie droite de tube Droit

La consolidation de la partie droite de tube droit est faite par des forages à l'intérieur de la butée de tube droit avec l'introduction des éléments structurels en fibre de verre 40/60 et des injections en pression de 15 bars de coulis de ciment avec des critères d'arrêt selon la méthode GIN.

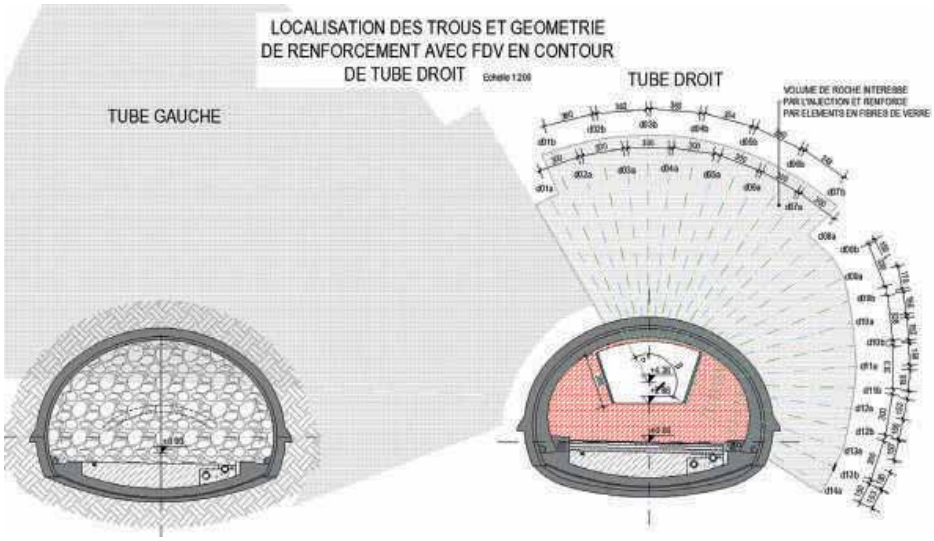


Figure 16. Renforcement du contour de tube droit par éléments structurels et injections

Le Linéaire total de l'ensemble des consolidations (Pilier, calotte et contour) de la zone d'effondrement est de : 69 769 ml

7. LES TRAVAUX DANS LA ZONE D'EFFONDREMENT

7.1. Confortement de la section éboulée

Le confortement de la section éboulée se fait par champs (travées) de 6.75ml avec un ensemble de pré-soutènement de voute parapluie en tubes pétroliers (Φ127mm ;10mm d'épaisseur) de longueur unitaire de 18ml et un confortement du front et du contour de la section par des tubes en Fibres de verre (40/60) de 18ml de longueur unitaire avec injection de coulis de ciment pour scellement et remplissage des vides probables dans la section de tunnel effondré. Tous les forages sont réalisé à sec, afin d'éviter la dégradation du matériau (l'argilite) lié a l'utilisation de l'eau pour la perforation ; Le linéaire de confortement pour chaque champ d'avancement (Travée) est de 792 ml pour les tubes pétroliers et de 2 520 ml pour l'ensemble des Fibres de verre 40/60.

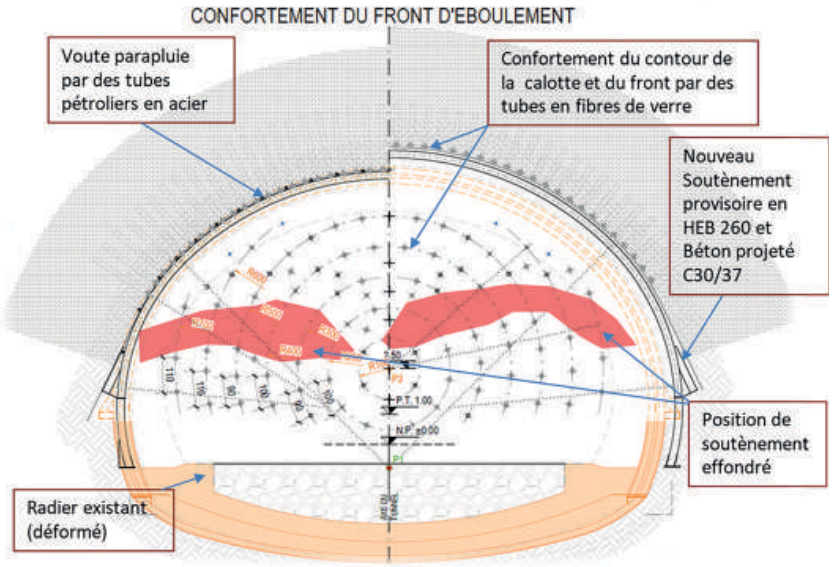


Figure 17. Front d'excavation de la section d'éboulement

Figure 18. Remplissage des Vides et des cavités par coulis et mortier de ciment

7.2. Excavation de la section éboulée

Le creusement de la partie effondrée se fait suivant la méthode classique à l'aide des "pelles tunnel" sur un champ (Travée) de 6,75 ml avec un phasage qui consiste à excaver en première phase, la partie calotte avec la mise en place d'un soutènement composé de: cintre en HEB 260, béton projeté c30/37 de 35cm d'épaisseur, et deux nappes de treillis soudés tout en profitant de la structure existante (radier) comme facteur stabilisant.

Figure 19. Excavation de la partie calotte avec pelle tunnel

La deuxième phase, consiste a démolir les radiers existants déformés, et compléter le soutènement en stross et en contre voute avec la même composition des cintres HEB 260 et Béton projeté avec Treillis soudés.

Figure 20. Démolition des Radiers existants déformés

7.3. Extraction des engins enfoncés

L'extraction des engins enfoncés à l'intérieur de zone effondrée nécessite une attention particulière, premièrement dans la phase de confortement du front pour détecter et identifier la nature des obstacles soit un soutènement ou bien une machine, ainsi que leurs position dans la section et la distance approximative à l'intérieur du front éboulé ; deux (2) machines ont été extrait jusqu'à présent, avec un nombre de deux (2) autres engins qui reste a extraire.

Figure 21. Engin enfoncé dans le front au cours d'extraction

8. RISQUES ET CONTRES MESURES

Les travaux de réparation de ce tunnel effondré ont des risques importants sur les travailleurs ainsi que la structure elle-même, Les principaux risques figurants dans la partie éboulée du tunnel T1 et leurs mesures préventives sont comme suit :

8.1. Instabilité du front de taille

Les causes probables sont la présence des vides importants ou bien un terrain décomprimé avec une Variabilité de formation géologiques ou un excès de charges sur le soutènement provisoire. Les conséquences probables de l'instabilité de front de taille se résument dans des convergences excessives, des déformations de soutènement provisoire, des dommages au tube droit ainsi que l'extrusion important et éboulement du front. Pour cela nous avons appliqué des contre-mesures préventives avec un système d'auscultation et une surveillance rigoureuse afin de réduire les risques engendrée par une instabilité probable du front de taille comme la localisation et remplissage des vides à l'intérieur du tube gauche, et la Consolidation de la partie éboulée à partir de tube droit, ainsi qu'une classe de soutènement renforcée.

8.2. Enlèvement des engins

L'existence des engins enfoncés dans la partie éboulée et l'incertitude sur la position de ces engins ainsi que le type d'engins qui est inconnu, sont la cause de plusieurs risques notamment l'Interférence avec l'excavation et la difficulté des travaux d'extraction au front éboulée, ainsi que le non achèvement de confortement du

front (arrêt à l'obstacle) et donc risque d'instabilité du front. Des mesures appliqués pour pallier aux risques liés a l'enlèvement des engins comme le changement de la position des trous de confortement et le remplissage du maximum de vides, l'arrêt de creusement et découpage des parties qui apparaissent au front de taille et de prendre des mesures de sécurité stricts pour les travailleurs lors de découpage des éléments d'engins.

8.3. Démolition des Radiers existants déformés

la déformation des radiers existant dans la zone effondré à cause de l'éboulement est irréversible, donc aucune possibilité pour récupérer et réparer la structure endommagée et ces radiers , utilisés déjà comme facteur stabilisants dans la phase de creusement de la calotte présentes des risques d'instabilité crée par l'effet de vibration (démolition par brise roche), convergence excessives et chute des blocs du béton projeté du nouveau soutènement. Les mesures appliqués sont des confortement supplémentaires autour du radier , un pas de démolition réduit de 1ml, Possibilité de bétonnage par partie et rapprochement de revêtement définitif (voute) toute en augmentation de surveillance et de fréquence d'auscultation.

PIARC
2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROAD TUNNEL OPERATIONS AND SAFETY
&
VIII SPANISH TUNNELS SYMPOSIUM

SIXTH SESSION:

Ventilation and Lighting

Topic: "Ventilation"

SUSTAINABLE TUNNEL VENTILATION

Fathi Tarada
Mosen Ltd

Sustainability is a critical aspect to consider in all stages of the lifecycle of tunnel infrastructure, including the design, construction and operation. The use of mechanical ventilation affects the sustainability of tunnels in many ways, with earlier intervention (preferably during the design stage) typically having a greater impact than later changes. A consideration of the embodied carbon within the tunnels to accommodate the ventilation system and in the manufacture of the ventilation system, the operational carbon that is expended during the lifetime of the tunnel, and the user carbon of those who will be using the tunnel, is an essential part of holistic sustainability considerations.

VENTILACIÓN DE TÚNEL SOSTENIBLE

La sustentabilidad es un aspecto crítico a considerar en todas las etapas del ciclo de vida de la infraestructura del túnel, incluido el diseño, la construcción y la operación. El uso de ventilación mecánica afecta la sostenibilidad de los túneles de muchas maneras, y la intervención temprana (preferiblemente durante la etapa de diseño) suele tener un impacto mayor que los cambios posteriores. Una consideración del carbono incorporado dentro de los túneles para acomodar el sistema de ventilación y en la fabricación del sistema de ventilación, el carbono operativo que se gasta durante la vida útil del túnel y el carbono de uso de aquellos que utilizarán el túnel, es una parte esencial de las consideraciones holísticas de sostenibilidad.

VENTILATION DURABLE DES TUNNELS

La durabilité est un aspect essentiel à prendre en compte à toutes les étapes du cycle de vie de l'infrastructure du tunnel, y compris la conception, la construction et l'exploitation. L'utilisation de la ventilation mécanique affecte la durabilité des tunnels de plusieurs manières, une intervention précoce (de préférence pendant la phase de conception) ayant généralement un impact plus important que des modifications ultérieures. Une prise en compte du carbone incorporé dans les tunnels pour accueillir le système de ventilation et dans la fabrication du système de ventilation, le carbone opérationnel qui est dépensé pendant la durée de vie du tunnel et le carbone utilisateur de ceux qui utiliseront le tunnel, est une partie essentielle des considérations holistiques de durabilité.

1. INTRODUCTION

There is increasing interest in the application of sustainability concepts to tunnel ventilation design, installation and operation. This is due to the need to reduce energy consumption as a means of minimising carbon footprint, the commercial imperative to reduce costs at all stages of the infrastructure lifecycle, and the requirement to enhance equipment availability.

The World Road Association (PIARC) has published a report on "road tunnel operations; first steps towards a sustainable approach" (Ref. 1), which contains a survey of existing frameworks for sustainability, including various national regulations and guidelines. The report also includes chapters on identifying and reducing costs associated with tunnel civil works and equipment. This paper includes a summary of the PIARC report in the areas pertinent to tunnel ventilation and the recommendations of the PAS 2080 (Ref. 6) standard on carbon management in infrastructure. Two case studies which illustrate recent projects which have improved tunnel sustainability are presented, and certain challenges to improving sustainability are identified.

2. SUSTAINABILITY CONCEPTS

Ref. 1 provides an overview of sustainability concepts and their application to tunnel design, construction and operation. The "sustainable development" concept may have a slightly different meaning from one country to another, and its scope may vary. Nevertheless the Brundtland Report (Ref. 2) and the 1992 Rio Summit (Ref. 3) have provided the first rules, set a general framework, and established globally-recognised principles.

According to the Brundtland Report (Ref. 2), sustainable development is the kind of development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.

The sustainable development concept is based on three main pillars:

- Social: meeting needs in terms of health, education, housing, employment, etc.;
- Economic: creating wealth and improving living standards;
- Environmental: preserving species, natural resources and energy resources.

In the different fields or areas where this concept can be applied, the end-goal of a sustainable development approach is to find a balance between the three pillars and preserve this balance over the long term.

Contrary to certain common beliefs, the concept of sustainable development does not solely rest on the objective of preserving the environment. It also aims to meet social needs and economic requirements. It is thus generally represented by three pillars which should roughly have the same weight (Fig. 1).

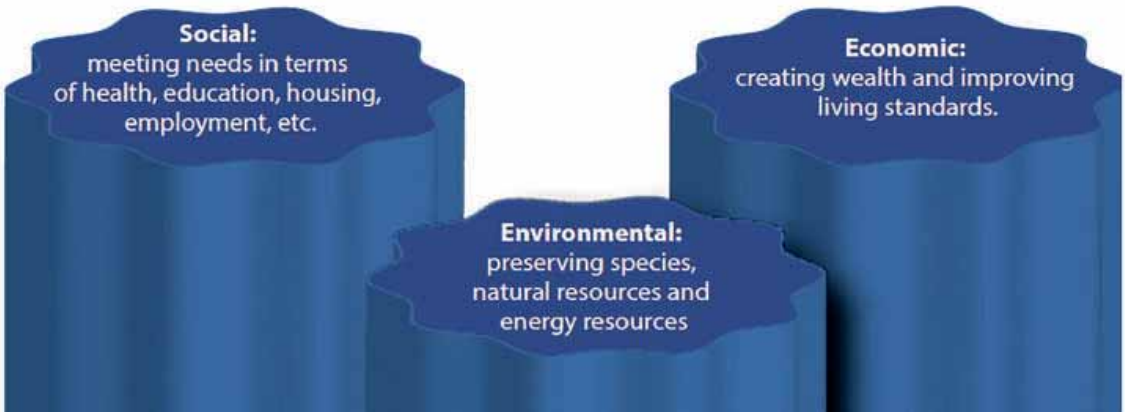


Fig. 1: The Three Pillars of Sustainable Development (Ref. 1)

Sustainable development represents a holistic approach of the whole lifecycle of a project, and requires a balance to be struck between economic, social and environmental objectives. A sustainable design must recognise the integrated nature of human activities and must therefore include a commitment to coordinate planning and design amongst all relevant sectors, disciplines and groups.

With regards to safety, consideration must be given to the three pillars: social (in terms of human aspects), economic (cost of mitigation measures as well as the impact of accidents) and environmental (environmental damage due to pollution).

3. TUNNEL LIFECYCLE

The operation of a road tunnel is highly dependent on the design and construction phases which preceded the commissioning of the work. More precisely, it is necessary to take account of the effect of solutions opted for during a project's design phase on operating conditions. If the selected design solution is not ideal, it will be very difficult to improve the tunnel's sustainability throughout its life cycle.

The World Road Association has provided an estimate of the impact of the various phases of a tunnel project on operating costs (Ref. 4). The data is presented in Table 1 below, and highlights the importance of good design to minimise operating costs.

Table 1: Impact of project phases on operating costs (Ref. 4)

Project phase	Estimated impact
Design / study	60 – 80%
Build / construction	10 – 30%
Operate / tunnel lifespan	10 – 30%

The relationship between the project phases and the level of influence exercised on operating costs is shown diagrammatically in Fig. 2. The planning phase (study/design) is normally 3 to 10 years, the building/construction phase 2-3 years while the operation phase may be from 5 to 20 years for installations/equipment and 80 to 100 years for the tunnel structure. This does not account for possible refurbishment work undertaken on the tunnel.

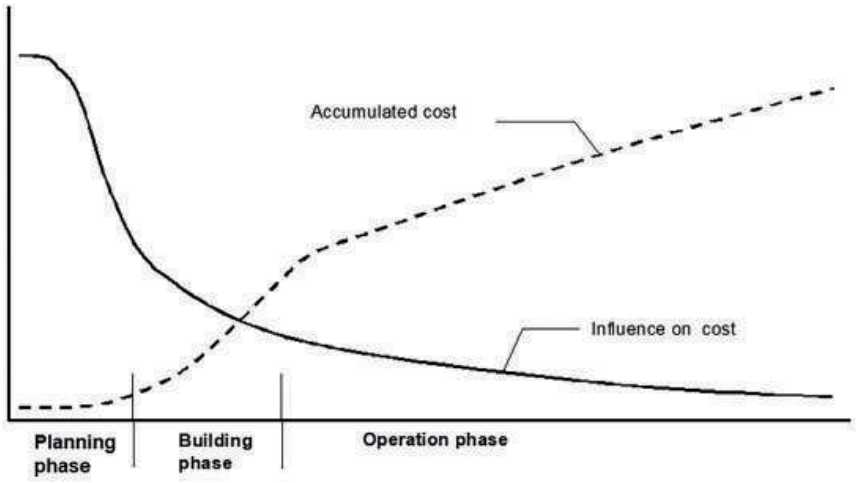


Fig. 2: Accumulated costs as a function of tunnel life-cycle (Ref. 4)

The impact of the upstream phases, especially the design phase, on accumulated costs is extremely important. Since cost-effectiveness is an integral part of any sustainability consideration, any worthwhile study of tunnel sustainability must focus on the design phase of the project, while still accounting for the construction and operation phases.

4. APPLICATION OF SUSTAINABILITY CONCEPTS TO TUNNELS

The starting point of this section is that a decision has been taken to build a new tunnel, or that a review of the sustainability of an existing tunnel is required. The issue of whether a new tunnel should be built at all is outside the scope of this paper.

A balance between sustainability and cost-effectiveness must be struck. Ideally, the measures taken by the tunnel manager are both sustainable and cost-effective (not only on a societal level, but also for the tunnel itself). However, in most cases a compromise has to be found, balancing the three pillars of sustainability on the one hand, and cost-effectiveness on the other hand.

The minimum requirement for a measure to be called "sustainable" should be that the total effect on all the three pillars is better than, or at least equal to, the present situation (see the definition below). For a measure to be called "cost-effective", the life cycle costs of the measure should lower, or at least be equal to the life cycle costs in the present situation.

Thus, for the consideration of measures supporting sustainability, the decision matrix in Table 2 could be applied.

Table 2: Decision matrix for sustainability measures (Ref. 1)

		Cost effective measure?	
		No	**Yes**
Sustainable measure?	**No**	Don't implement the measure	Consider if the cost effectiveness weighs up to loss of sus-tainability, according to the applicable tunnel operations policy, and determine whether or not to implement the measure.
	Yes	Consider if the sustainability weighs up to loss of cost ef-fectiveness, according to the applicable tunnel operations policy, and determine whether or not to implement the measure.	Implement the measure

Table 3 below summarises the results which may be expected in three situations:

- New tunnels for which the sustainability concept may be applied at the earliest stages and cover all components: the tunnel itself and its equipment, operating procedures and employees (including training and raising the awareness of employees regarding sustainability);
- Existing tunnels in which a large-scale refurbishment or upgrading programme will be implemented. The scope offered is not as broad as for a new tunnel. However, a sustainable development approach can be used for the equipment to be renovated. This renovation may have an impact on several pillars: impact on the economic pillar (maintenance cost), impacts on the social pillar (e.g. the new equipment may reduce noise nuisance) and the environmental pillar (through the use of equipment which consumes less energy while providing the same or improved service);
- Existing tunnels where no major refurbishment is envisaged. The only options will comprise optimising operating parameters, and possibly raising employee awareness regarding sustainable operations.

Table 3: Impacts of a sustainable development approach (Ref. 1)

Pillar	Issue	Tunnels in project stage	Tunnels to be refurbished or upgraded	Existing tunnels
Economic	Wealth creation	Strong	Moderate to low	Very low
	Improvement of living standards	Strong	Moderate to low	Very low
	Reduction in operating costs	Strong	Moderate to low	Moderate to low
Social	Impact on housing	Strong	Moderate to low	Low
	Impact on human health	Strong	Moderate to low	Low
	Impact on employment during construction (or refurbishment)	Strong	Moderate	Not applicable
	Impact on employment during operation	Not applicable	Strong	Strong
	Economic attractiveness	Strong	Low	Very low
Environmental	Preservation of species	Strong	Moderate to low	Low
	Preservation of natural resources	Strong	Moderate to low	Very low
	Preservation of energy resources	Strong	Moderate to low	Moderate to low

5. EXISTING FRAMEWORKS FOR SUSTAINABILTY

According to the survey undertaken in Ref. 1, there are no consistent frameworks with regards to the development of sustainable development of tunnels across different countries. Certain countries which have general regulations have no specific application to tunnels; conversely, other countries, which may not have general regulations, have set specific requirements for tunnels (regulatory texts, recommendations, etc.). In most cases, existing requirements do not specifically apply to tunnels. Instead, they usually apply to road projects or infrastructure construction projects.

Here are a few examples of requirements and methods which may apply to tunnels and/or buildings (non-exhaustive list):

- In Greece, all tunnelling projects must have an environmental license according to the environmental law. The Greek Ministry for Infrastructure, Transport and Networks has drawn up the "Guidelines for Design of Tunnel Electromechanical Installations" (2002, lighting, ventilation system, power supply, water supply, fire detection and fire-fighting system, traffic management system, communication, SCADA, etc.). Furthermore, in 2004 the "Guidelines for ordinary maintenance of electromechanical tunnel installations" were adopted. Risk analysis methodologies have been adopted at the national level in order to support decision making for safety measures and arrangements.
- In Japan, "The Environment Impact Assessment Law" was enacted in 1997. According to this law, the corporation which carries out a large-scale project, including the construction of a long road tunnel, has to predict and evaluate the impact on the environment. If the predicted impact is significant, the project must be improved to be more environmentally friendly, or stopped.
- The Spanish Ministry of Public Works has produced several documents concerning tunnel lighting in particular, such as "Recommendations for road and tunnel lighting (1999)" and "Standard for energy efficiency in public lighting (2008)", along with several technical reports.
- In the Netherlands, the availability demands for the tunnel are documented in the Rijkswaterstaat Tunnel Standard that was developed during the past 2-3 years. Parts of the Tunnel Standard (regarding the prescribed tunnel equipment) are included in the legislation (ministerial regulation under the "Law on Additional Rules for the Safety of Road Tunnels or "Warvw") for state owned road tunnels. However, the availability demands will not be part of the legislation, since it is out of the scope of the Warvw and the European directive. Also, the availability of the state owned road network is already the responsibility of the Minister of Infrastructure and the Environment, thus making additional legislation in this field unnecessary.
- In Italy, the ANAS "Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali" are general guidelines applied to design M&E systems and safety issue for the road tunnel owned directly by ANAS. The guidelines, which have general technical validity, suggest requirements for the installations on the basis of safety and environmental aspects and include a methodological proposal to approach the risk assessment to support decision making for the Tunnel Operating Body.
- In South Korea, the "Act on environmental impact assessment" was established in 1977. Large-scale projects such as urban development, industrial estates, energy, harbours, railroads, roads, airports, etc. should evaluate their impact on the environment, during and after the construction of the project. For road tunnels, the impact of excavation during the construction and air pollution during the operation are frequent issues.
- In Singapore, environmental impact assessment studies are conducted for large scale infrastructure projects including long road tunnels. The National Environmental Agency (NEA) of Singapore sets targets and guidelines for ambient air quality and noise in Singapore.

A number of different evaluation methodologies have been developed across different countries and regions:

- In 2003, the Federal Roads Office (FEDRO) in Switzerland established a method to evaluate road infrastructure projects while taking account of sustainable development objectives (NISTRA). NISTRA is a general methodology applicable for tunnels.
- In the Netherlands, the Rijkswaterstaat (a public institution managing traffic by road and water throughout the Netherlands) uses the DuboCalc calculation module to evaluate the sustainability of materials and energy for construction projects in civil engineering.
- In North America, the Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) is a standardisation system for high-performance green buildings created by the US Green Building Council in 1998.
- In Great Britain, the Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM) was created in 1990 as a method of assessing the environmental performance of buildings. It was developed by the Building Research Establishment (BRE), a UK research entity.
- In Italy, UNI (Entre Nazionale Italiano di Unificazione) has defined the Standard for Tunnel Lighting, based on the CIE 88-1990 and CIE 140-2000, combining safety standards with energy consumption requirements. The UNI standard has become a national standard with ordinance dated 14th September 2005.

All these methodologies have one thing in common: they all take into account the entire lifespan of the project (or in our case the tunnel). So they deal with the study/design, implementation/construction and operation phases. Some of them even address the issue of reprocessing the materials and equipment at the end of their life cycle.

The vast majority of these methodologies set many requirements at the study/design phase, less at the implementation/construction phase and very few during the operation phase. Along with these very comprehensive methods, there are several countries which also impose requirements in relation to equipment (either in terms of minimal energy consumption or carbon footprint).

Of the three pillars which constitute the concept of sustainable development, the environmental pillar is often the one that is handled the best, particularly in relation to aspects concerning the preservation of natural and energy resources. The economic pillar is also handled fairly well, in particular the creation of wealth. The social pillar is not always dealt with as well as the other two pillars.

We saw earlier that the regulatory texts or requirements that exist in certain countries tend to relate more to the study and construction of a structure. This is completely logical insofar as, as we have seen, design has a huge impact on operation. The application of the concept of sustainable development will lead to much more satisfying results if it is applied as early as possible. A person entrusted with operating a road tunnel (or any other type of structure) will struggle to do so sustainably if a sustainable development approach was not taken to the structure's design.

However, despite regulations which, with regards to operation, are not, at this moment in time, either very comprehensive or restrictive, many tunnel managers or tunnel operators have taken the initiative. These initiatives are consistent with a sustainable development approach. Although their origins are rooted in the concept itself, they are rarely carried out as part of a global strategy and they only address one of the three pillars. It is suggested that a global strategy would comprise addressing all three pillars at the same level of detail.

By considering these three pillars and the same themes as before, Table 4 below identifies initiatives that a tunnel manager or a tunnel operator may take in relation to an existing structure.

Table 4: Possible initiatives for a tunnel manager or tunnel operator (Ref. 1)

Pillar	Theme	During operation	During refurbish-ment
Economic	Creation of wealth	Very low (by optimizing procedures, staff and operating costs)	Very few
	Improving living conditions	Maintaining the level of traffic, reducing the number of closures	Improving the quality of the carriageway, reducing the number of closures
Social	Impact on housing	Controlling emissions and noise pollution	Reducing emissions and noise pollution
	Impact on safety for users	Very few (only procedures)	Very strong
	Impact on employment (during the refurbishment)	Non applicable	Possible (employment of local workforce)
	Impact on employment during operation	Very few	Very few
	Economic attractiveness	Maintaining global service levels	Improving global service levels
Environmental	Preserving species	Maintaining any strategies in place	Increasing the number of strategies
	Preserving natural resources	Non applicable	Using recycled materials
	Preserving energy resources	Optimising the operation of equipment	Using equipment that is more energy efficient

6. OPERATING COST REDUCTION

Ref. 1 addresses the issue of operating cost reduction in tunnels. Almost all of the equipment installed in a tunnel requires electrical energy which is usually bought from a supplier. Depending on the power required to guarantee the smooth running of equipment, power supply may be high-voltage or low-voltage. Generally, it is high-voltage if the tunnel is equipped with a ventilation system.

For a tunnel operator, energy expenses are directly related to two parameters: the power required for each family of equipment and the duration of functioning of each family of equipment.

The main energy-consuming devices in a tunnel during normal operation are:

- Lighting;
- Ventilation for air quality;
- Safety devices (signalling, closed circuit television CCTV, etc.);
- Pumping (in subsea tunnels or when there is water seepage).

The respective share of each of these energy-consuming systems varies greatly, depending on the specific characteristics of the tunnel: length, gradient, water ingress, etc. For example, a short tunnel would not normally be mechanically ventilated (therefore the power consumption related to ventilation element is removed), but it will be lit with entrance zones covering almost its entire length and, due to its short length; lighting will thus be a major energy consumption factor. In contrast, for very long tunnels, the energy-consumption of lighting will be low compared with the energy consumption of the ventilation system. In terms of optimisation, ventilation and lighting systems usually deserve special attention because the potential gains can be high.

Table 5 below summarises the impact of broad families of equipment (with the exception of smoke extraction in case of fire) in terms of electrical consumption, according to the length and type of structure (unidirectional or bidirectional). The information provided should be considered as a general trend as the specific characteristics of a particular structure may lead to different findings. Air exhaust to avoid portal discharge is not considered in this table.

Table 5: Relative impact of equipment on electrical consumption (adapted from Ref. 1 on the basis of NFPA 502, 2014 edition)

	L ≤ 300 m	**300 m < L ≤ 3 000 m**		**L > 3000 m**	
	uni- and bi-directional	**uni-directional**	**bi-directional**	**uni-directional**	**bi-directional**
Lighting	Very major	Major	Average	Average	Minor
Ventilation	No impact	Very minor	Average	Minor	Major
Safety equipment	Very minor	Minor	Minor	Average	Average
Auxiliaries and miscellaneous losses	Very minor	Minor	Minor	Average	Average
Pumping	Minor	Minor	Minor	Minor	Minor

Note: The information above only has comparative value within the same column (for instance, electrical energy consumed by lighting is greater when the length of the tunnel increases, but its relative share within the total consumption decreases).

In relation to energy expenditure, the first thing that an operator can do for any given energy requirement is to play competitors off against each other by consulting several suppliers that provide the kind of electricity to be used. This approach assumes that the installation is optimised in terms of the power installed and the operating times of the various pieces of equipment.

In effect, energy expenditure is closely linked to two factors: the power installed per family of equipment and each family of equipment's operating time.

For each family of equipment, the installed power is assessed during the study phase and is fixed during the implementation phase. Once the structure is operational, the installed power can only be changed during renovation. At that point in time, the installed power may be decreased if the applicable standards and regulations allow such a reduction, and if the energy performance of the replacement equipment has improved. It may be increased if regulations have become stricter (for example, if greater smoke extraction capacities are specified).

If an operator wishes to reduce its expenditure on electricity without renovating the tunnel, it can only do so by optimising the operating times of the installed equipment.

7. CARBON MANAGEMENT

The UK's Infrastructure Carbon Review (Ref. 5) showed that infrastructure is associated with over half of UK's greenhouse gas (GHG) emissions:

- 30% of which are directly attributed to the construction, operation and maintenance of infrastructure assets (emissions that infrastructure directly controls); and
- 70% of which are attributed to the users of infrastructure (emissions over which infrastructure has influence)

Reducing carbon emissions associated with infrastructure is therefore fundamental to addressing the global challenge of climate change.

The British Standards Institute has published PAS 2080 on "carbon management in infrastructure" (Ref. 6). This standard describes a 9-stage carbon management process to reduce carbon emissions in all aspects of the design, construction, operation and decommissioning of infrastructure (Fig. 3).

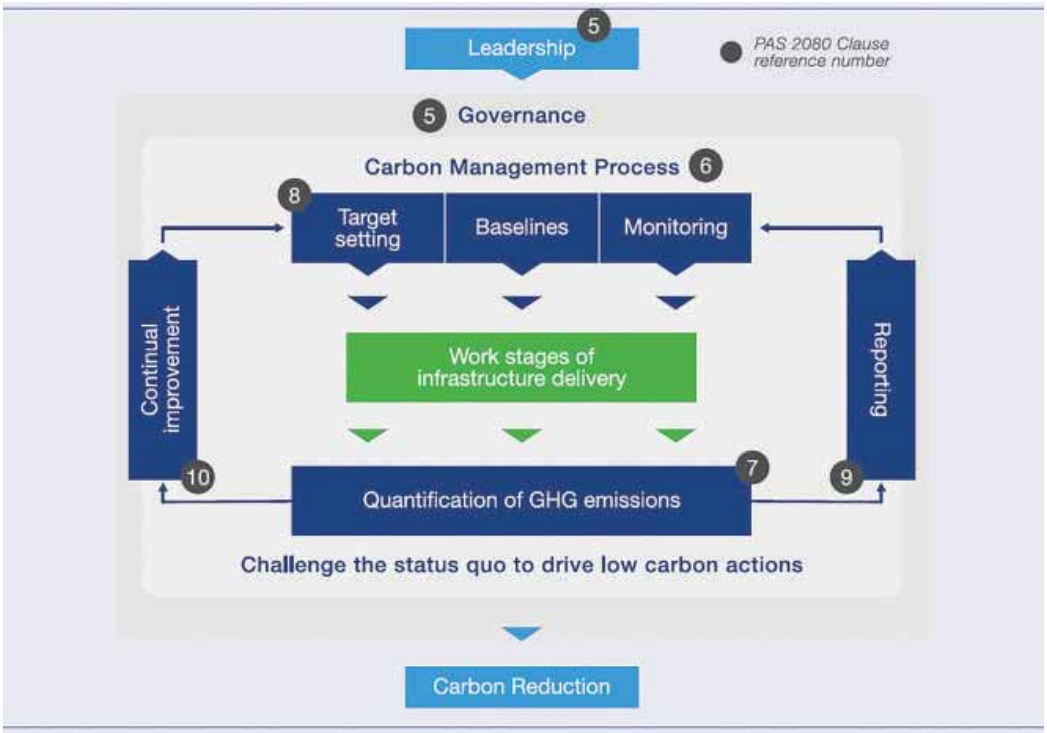


Fig. 3: Carbon Management Process (from Ref. 6)

PAS 2080 includes requirements for developing a carbon management process built around the following components:

1) Quantification of greenhouse gas emissions;
2) Target setting, baseline setting and monitoring;
3) Reporting; and
4) Continual improvement.

While the ability to influence carbon emissions reduces at consecutive stages in the course of infrastructure delivery, the accuracy of assessment increases (Fig. 4).

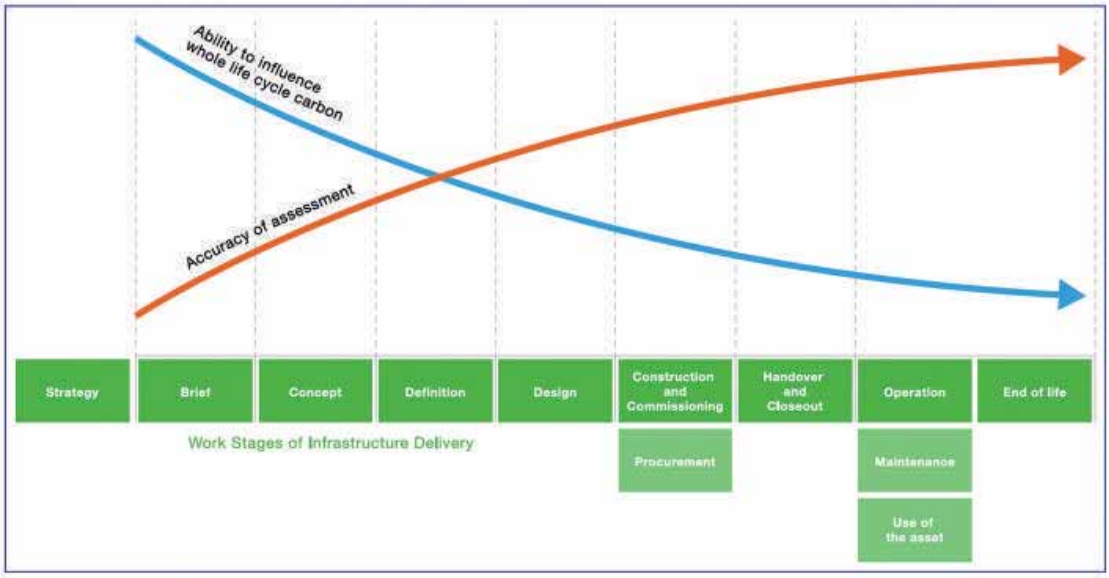


Fig. 4: Ability to influence carbon reduction during infrastructure delivery (from Ref. 6)

PAS 2080 distinguishes between three categories of carbon emissions:

a) Capital carbon (otherwise known as embodied carbon), which are the greenhouse gas emissions associated with the creation, refurbishment and end of life treatment of an asset. For tunnel ventilation, this includes the carbon that is released in the manufacture, refurbishment and decommissioning of the fans and associated equipment (including dampers, filters, louvres, cables and power supplies). Capital carbon should also be assigned to the construction materials required for the additional headroom required in tunnels to accommodate jet fans, for ventilation stations and ventilation adits.

b) Operational carbon represents the greenhouse gas emissions associated with the operation of an asset. For tunnel ventilation, these represent the carbon emissions associated with the power consumption of the fans and associated electrical equipment. This is likely to be significant for longer road tunnels, as indicated in Table 5.

c) User carbon is the associated with the users' utilisation of infrastructure. For tunnel ventilation, this includes the carbon associated with the air-conditioning used within vehicles travelling through tunnels.

All three categories of carbon emissions should be managed in order to drive greenhouse gas emissions towards net zero.

8. PROJECT EXAMPLES

8.1. Ventilation with Fire Suppression

User safety, structural integrity and the continuity of operations in case of fire are key design objectives for tunnels. A substantial proportion of the construction, operating, maintenance and replacement costs for tunnels derive from these safety-related objectives. Therefore, any robust sustainability framework for tunnels must include safety as a key determinant. However, consideration of safety may not necessarily cause any impairment in sustainability, as the following case study demonstrates.

Fig. 5: Rize Tunnel, Turkey

The initial ventilation design of the 3.9 km long, dual-bore Rize Tunnel in Turkey was based upon a peak fire heat release of 100 MW, with jet fans to provide longitudinal ventilation. All jet fans were 1.2 m internal diameter. No fire suppression system was specified in the initial design.

An alternative design was prepared on the basis of a low-pressure mist system to reduce the potential fire heat release rate, and jet fans with shaped silencers to enhance the in-tunnel thrust. The effect of the fire suppression system on the fire heat release rate was ascertained through experimental measurements which suggested a reduction from 100 MW to 40 MW, with 50% of the suppressed fire heat release rate being convectively transported.

In the north tunnel bore with a downhill gradient of up to 3.35%, the total number of jetfans to be installed could be reduced from the 34 fans currently proposed for the unsuppressed system. Up to 10 operating fans are required to generate the critical velocity for smoke control with the fire suppression system activated. In addition, 4 jetfans are required to account for maintenance and fire damage. This give a total of 14 jet fans with shaped silencers to be installed.

In the south tunnel bore with an uphill gradient of up to 3.35%, the total number of jetfans to be installed can be reduced from the 26 fans currently proposed for the unsuppressed system. Up to 6 operating fans are required to control the smoke with the fire suppression system activated. In addition, 4 jetfans are required to account for maintenance and fire damage. This gives a total of 10 jet fans with shaped silencers to be installed in the south bore. The total number of installed jetfans in the two tunnel bores can therefore be reduced by 60%. A reduction in installed power of approximately 2 MW was estimated for the revised ventilation system with fire suppression.

There is a net reduction in embodied carbon in the new design, because the reduced number of required jet fans more than compensates for the installation of the fire suppression system. The reduction in power consumption leads to a direct reduction in operational carbon. There is no expected change in user carbon in the revised design.

Other potential cost improvements with fire suppression a reduction in passive fire protection, and longer distances between tunnel cross-passages and shafts. These design changes, which improve sustainability as well as reducing costs, may be made while still maintaining the required level of fire safety.

8.2. Jet Fan Replacement

Jet fans require replacement every 20 to 25 years, and this provides an opportunity to enhance sustainability, by reducing the required number of replacement fans. An existing major road tunnel in Europe has 710 mm internal diameter jet fans, arranged in banks of two (Fig. 6). Due to the need to provide sufficient headroom for vehicles, the jet fans are installed close to the tunnel soffit. The discharged jets therefore attach to the soffit, leading to a low measured installation factor (representing the ratio between the in-tunnel and theoretical thrust) of 0.52.

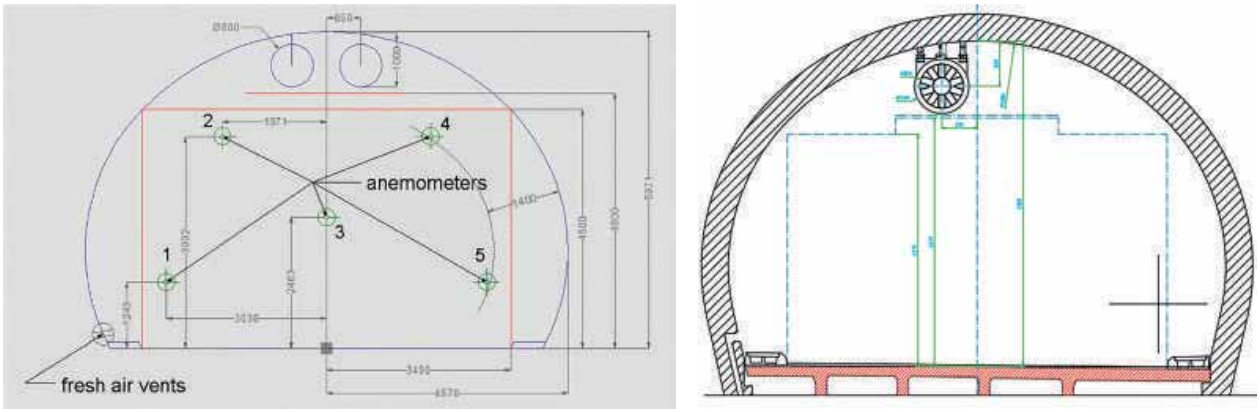


Fig. 6: Existing installation with 2 off 710 mm internal diameter conventional jet fans per bank (left), and proposed installation (right) with one off 800 mm internal diameter jet fan with shaped silencers

A new design was developed using 3D Computational Fluid Dynamics (CFD). This entails using only half the number of jet fans, with only one jet fan per bank (Fig. 6). Shaped silencers are used to deflect the discharged jet away from the soffit, in order to reduce the aerodynamic friction between the jet and the soffit (Fig. 7). The installation factor was thereby increased to 0.95. The internal diameter of the jet fans was increased from 710 mm to 800 mm, which provided a further thrust increase while still maintaining the required headroom clearance. The new design delivered a 15% increase in in-tunnel thrust, above the current value.

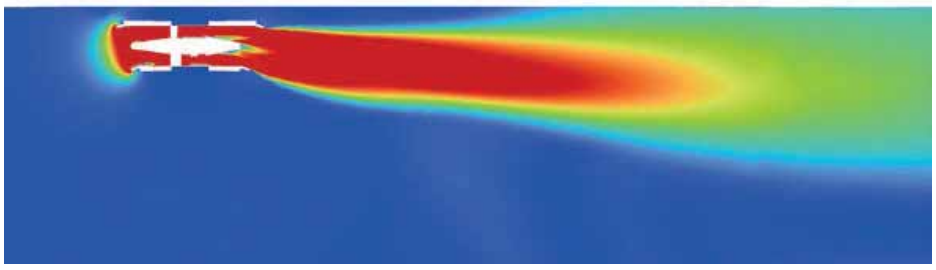


Fig. 7: 3D CFD computation of flow using jet fan with shaped silencers

The embodied carbon was estimated to be reduced by 28% in the new design, and the operating carbon was reduced by 12%. The user carbon was not affected by the redesign.

9. CURRENT CHALLENGES

Although there are some examples of good practice in the enhancement of sustainability with respect to tunnel ventilation, there are also many examples of substandard practice and missed opportunities. Some examples are listed below.

- A typical tunnel ventilation project would refer to existing codes, standards and norms, some of which may be unsuitable for the purpose of enhancing sustainability. For example, specifying jet fans purely on the basis of ISO EN 13350:2015 requires a focus on factory testing, rather than in-tunnel thrust which is where real savings in jet fan sizes, numbers and power consumption can be made.
- Copying tunnel ventilation specifications from a previous, similar project may be convenient and cost-effective, but it does not allow improvements with respect to sustainability to be made. Investments in better design are likely to reap significant benefits throughout the lifecycle of a tunnel.
- Practices that require continuous operation of tunnel ventilation systems to maintain air quality outside tunnels, such as "zero portal emissions" regimes in Australia, are very energy-intensive and with a questionable impact on sustainability. A holistic approach would consider the carbon emissions generated by the power stations which drive the tunnel ventilation systems, as well as the improvement in air quality to nearby residents.
- A focus on initial costs (including procurement and installation costs), rather than operating, maintenance and replacement costs, may mitigate against the adoption of sustainable ventilation measures. Projects that specify that the successful installation contractor should operate and maintain the ventilation for a defined length of time, and the definition of appropriate key performance indicators and payment mechanisms may assist in improving tunnel sustainability.

10. CONCLUSIONS

A robust approach to achieving sustainability requires the simultaneous consideration of the social, economic and environmental impacts of any design and operation proposals throughout a tunnel's lifecycle. Statutory requirements, technical guidelines and frameworks should all be considered in formulating holistic strategies for the design and operation of tunnels. The application of such holistic considerations is very challenging, but progress can nevertheless be made through focusing on certain aspects of sustainability, such as reducing operating costs and reducing sound emissions. Tunnel ventilation provides a significant opportunity for sustainability improvements, particularly for long tunnels which can absorb significant amounts of power.

Although the initial design of a tunnel has the greatest impact on a tunnel's subsequent sustainability, it is still possible to achieve significant improvements based on improved operations and through the subsequent installation of innovative technology, as demonstrated through the three projects presented in this paper. It is hoped that this paper will encourage additional research and field trials to promote sustainable tunnel design.

11. REFERENCES

Ref. 1: "Road Tunnel Operations: First Steps Towards a Sustainable Approach", World Road Association, technical report 2017R02EN, 2017.

Ref. 2: "Our Common Future", a report written by Gro Harlem Brundtland, then Norwegian Minister of the Environment, and submitted to the United Nations in 1986.

Ref. 3: "UN Conference on Environment and Development" (1992), http://www.un.org/geninfo/bp/enviro.html accessed on 01/04/2015.

Ref. 4: "Good practice for the operation and maintenance of road tunnels", report 05.13.B, World Road Association, Paris, 2005.

Ref. 5: "Infrastructure Carbon Review", HM Treasury, BIS and the Green Construction Board, 2013.

Ref. 6: PAS 2080:2016, "Carbon Management in Infrastructure", Construction Leadership Council and the Green Construction Board, 2016.

SUSTAINABLE RISK BASED AND VENTILATION SOLUTIONS FOR ROAD TUNNELS SAFETY

Salvatore Giua[1], Mara Lombardi[2], Davide Berardi[2], Luca Stantero[3]
[1] SYSTRA SWS Engineering SpA
[2] Sapienza Università Roma
[3] Risk Design Engineering srl

The state of the art for risk reduction and ventilation solutions related to road tunnel safety is represented by: advanced risk management methods, Ventilation performances monitoring and high Availability Green Power Systems.

A further step in the framework of a systemic approach is proposed with the following integrated models and technologies: Real Time Dynamic Quantitative Risk Analysis (RTDQRA), Dynamic Airflow Performances Evaluation (DAPE) and high availability green power supply with velocity control.

The aim of creating a "Smart Tunnel" is strictly linked to a real time quantitative risk analysis as a tool for tunnel monitoring: the innovation is to merge the risk-based design and operation (using RTDQRA) and Smart technologies.

The Dynamic Airflow Performances Evaluation (DAPE) is a software that performs the real time and predictive statistical calculation of the Ventilation system performances based on the actual local conditions and availability of the system.

The green power supply with velocity control is a plug and play container that can be placed nearby the tunnel portals supplied with Low Voltage (400 V) that hosts a reversible inverter with UPS and batteries.

The inverter, with proper technology, performs a safe frequency regulation in order to vary the fans rotating speed allowing a more efficient ventilation control.

The paper describes the features of these solutions aimed to the risk reduction and energy saving in the framework of resilience and sustainability of the road tunnel system.

SOLUCIONES SOSTENIBLES DE VENTILACIÓN Y BASADAS EN EL RIESGO PARA LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES DE CARRETERA

El estado del arte de las soluciones de reducción de riesgos y ventilación relacionadas con la seguridad de los túneles de carretera está representado por: métodos avanzados de gestión de riesgos, monitorización del rendimiento de la ventilación y sistemas de energía verde de alta disponibilidad.

Se propone un paso más en el marco de un enfoque sistémico con los siguientes modelos y tecnologías integrados: Real Time Dynamic Quantitative Risk Analysis (RTDQRA), Dynamic Airflow Performances Evaluation (DAPE) y suministro de energía verde de alta disponibilidad con control de velocidad.

El objetivo de crear un "Túnel Inteligente" está estrictamente vinculado a un análisis de riesgo cuantitativo en tiempo real como herramienta para el monitoreo del túnel: la innovación es fusionar el diseño y la operación basados en el riesgo (utilizando RTDQRA) y las tecnologías inteligentes.

La evaluación dinámica del rendimiento del flujo de aire (DAPE) es un software que realiza el cálculo estadístico predictivo y en tiempo real del rendimiento del sistema de ventilación en función de las condiciones locales reales y la disponibilidad del sistema.

La fuente de alimentación verde con control de velocidad es un contenedor plug and play que se puede colocar cerca de los portales del túnel alimentado con Baja Tensión (400 V) que alberga un inversor reversible con UPS y baterías.

El inverter, con la tecnología adecuada, realiza una regulación de frecuencia segura para variar la velocidad de rotación de los ventiladores permitiendo un control más eficiente de la ventilación.

El artículo describe las características de estas soluciones destinadas a la reducción de riesgos y el ahorro de energía en el marco de la resiliencia y sostenibilidad del sistema de túneles de carretera.

SOLUTIONS DURABLES FONDÉES SUR LES RISQUES ET LA VENTILATION POUR LA SÉCURITÉ DES TUNNELS ROUTIERS

L'état de l'art des solutions de réduction des risques et de ventilation liées à la sécurité des tunnels routiers est représenté par: des méthodes avancées de gestion des risques, un suivi des performances de ventilation et des systèmes d'énergie verte à haute disponibilité.

Une étape supplémentaire dans le cadre d'une approche systémique est proposée avec les modèles et technologies intégrés suivants : analyse quantitative dynamique des risques en temps réel (RTDQRA), évaluation dynamique des performances du débit d'air (DAPE) et alimentation électrique verte à haute disponibilité avec contrôle de la vitesse.

L'objectif de la création d'un "Tunnel Intelligent" est strictement lié à une analyse quantitative des risques en temps réel comme outil de surveillance des tunnels : l'innovation consiste à fusionner la conception et l'exploitation basées sur les risques (utilisant RTDQRA) et les technologies intelligentes.

L'évaluation dynamique des performances du débit d'air (DAPE) est un logiciel qui effectue le calcul statistique en temps réel et prédictif des performances du système de ventilation en fonction des conditions locales réelles et de la disponibilité du système.

L'alimentation verte avec contrôle de vitesse est un conteneur plug and play qui peut être placé à proximité des têtes de tunnel alimenté en basse tension (400 V) qui héberge un onduleur réversible avec onduleur et batteries.

L'onduleur, avec une technologie appropriée, effectue une régulation de fréquence sûre afin de faire varier la vitesse de rotation des ventilateurs permettant un contrôle de la ventilation plus efficace.

L'article décrit les caractéristiques de ces solutions visant à la réduction des risques et à l'économie d'énergie dans le cadre de la résilience et de la durabilité du système de tunnels routiers

REAL TIME DYNAMIC QUANTITATIVE RISK ANALYSIS (RTDQRA).

Monitoring has become a -key factor in tunnel safety allowing prevention and risk management, in this context a Dynamic Risk Analysis is a very effective tool for a Smart Tunnel. The main features for an effective Risk monitoring system are the fast response, the historical data analysis and their interpretation as a tool for Feedback of experience, the predictive capability for different time periods.

The analysis must be real time and fast in order to give the tunnel operator the time to take fast decisions on critical situations.

The Analysis must have a probabilistic approach in order to find near misses and precursors of critical conditions (weak signs). Data from accidents with consequences solves the problem on the skin of road users, therefore is mandatory to make a sort of prediction of critical conditions in the basis of weather and traffic forecasts an data analytics.

First, is necessary to understand why it's helpful to associate the time scale and risk analysis. In a risk analysis the first step is to identify the potential hazards, then characterize the hazardous scenarios by means of probability methods adopting, for example, bow tie model that combines event tree analysis and fault tree analysis.

Event tree analysis provides several scenarios that are discrete partitions of the probability of Initiating Events. Risk analysis, through the logical-sequential reconstruction of a structured flow of events, allows to visualize the evolution of the hazard starting from the Constituent Events (causes), which determine an Initiating Event (EI), up to the damage, known exposure to the hazard flow, the vulnerability of those exposed and the hazard effect of each individual scenarioThe critical initiating events are determined by pre-conditions (root causes) and can evolve according to the surrounding conditions (contributing causes) and the possible presence and effectiveness of protection, mitigation, and facilitation systems (in short, modulators of the hazard flow), to hazardous scenarios characterized by different levels of hazard on which the severity of the expected consequences (effects) depends on the exposure and vulnerability of the exposed goods. The synthesis result of the proposed model is represented by quantitative risk indicators which, in order to comply with the criterion, in the case of risk for people life, will be estimated starting from the Expected Value of the Damage that allows to define Individual Risk (normalized Probability of death of the exposed person, referred to annual exposure) and Societal Risk (Back Cumulated Damage Distribution (BCDD)).

The Figure 1 explains the concept of the Real time Risk Analysis, RTDQRA.

The Individual Risk is assessed by knowing the exposure level of the area involved as a normalization factor to be applied.

This logical-structured representation of the events' sequence is explained by considering the critical initiating event as a nodal point between causes and consequences.

The consistent and stability of the final indicators of the risk analysis depends on the number of simulations done for the construction of the Event Tree Analysis. Basically, the concept of trust of simulation is linked to the maximum likelihood estimation criteria: this method determines the statistic inference which is characterized by the hazard rate. (BahooToroody et Al., 2019).

Representativeness of indicators developed by the risk analysis process like synthesis of the work which detects the complete group of scenarios fitting the Initiating Event is supported by the computational capacity of the simulator (in case of fire event, Computation Fluid Dynamics simulator, called CFD) available as good as the boundary conditions are realistic and compliant with the maximum likelihood criteria.

Simulations must be prepared referring to the data of the historical series. Sometimes, data are not consistent for the purpose of this analysis. The goal of creating a model for data collection and consequent variation (updating) of information is finalized to guarantee the consistency of results.

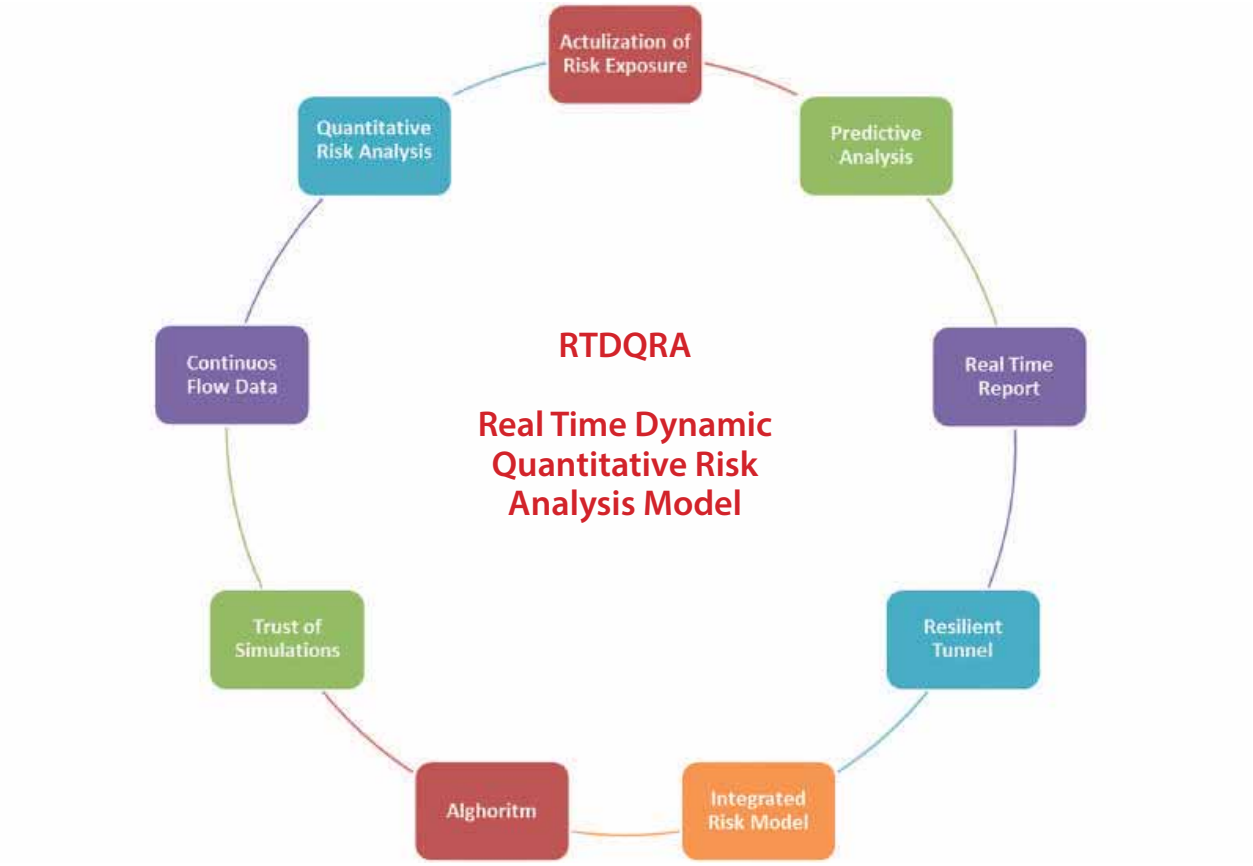


Figure 1 - Real Time Dynamic Quantitative Risk Analysis model

In this model uncertainty is linked to the state of knowledge: without a collection criterion, the data are inconsistent and useless.

Thanks to the real data in real time the report of emergency and maintenance conditions allows the actual determination of the risk exposure for users and infrastructure.

Aim of all these concepts described is to realize an integrated risk model which embraces safety measures, structural maintenance, and reliability of the components.

Risk analysis, therefore, has different time scales depending on the goal it is setup for such as design, operation, emergency management, maintenance. A unique risk model can be adapted to the different time scales in order to provide the information that allow to optimize the process.

DYNAMIC AIRFLOW PERFORMANCES EVALUATION

IoT systems are distributed sensors network that helps systems monitoring, for tunnel ventilation the installation of smart sensors nearby the jet fans and nearby the tunnel portals is proposed in order to improve the monitoring and management of the system. The analytics is made by means of a software that analyses the data stream from IoT sensors.

Installed Jet fan performances evaluation during the commissioning phase and, with a long-term view, during exploitment could reveal defects of installation or faults that can affect the ventilation system performances.

The measurement of the airflow speed inside or near the fan case helps to reveal the real working conditions of the fans.

Smart sensors located nearby the tunnel portals allow the monitoring of the main safety parameters for the tunnel exploitment. At the same time those parameters are relevant for renewable energy production. The parameters monitoring allows by one side to evaluate the tunnel risk level by means of the Real Time Dynamic Quantitative Risk Analysis and on the other side to evaluate the parameters for the optimization of the energy production. In particular a combined monitoring of wind speed and direction and light intensity provides the parameters to evaluate the ventilation efficiency in case of fire, the external light conditions that affects the lighting at the tunnel portals but also allows the evaluation of the efficiency for wind turbines and photovoltaic systems to be installed at the tunnel portals.

The research project has set up a smart combined sensors by means ultrasonic anemometers and light sensors with a proper data acquisition system that will provide suitable data for Smart Tunnel software (seeFigure 2).

Figure 2 - Light sensor and anemometer

The data collected by a gateway are sent to a database and in parallel analysed in real time by regression model and sent to the Real Time risk module and to the Energy module (see Figure 3). The Real time risk calculates the ventilation efficiency in case of fire and the car accident probability due to the traffic level and the light intensity and derives the related risk values. The Energy module calculates the ventilation efficiency due to the wind and traffic conditions, the potential energy production by using the jet fans as generators and by a wind turbine installed at the tunnel portals, the theoretical production of the PV panels installed at the tunnel portals. The theoretical energy production is compared with the real energy provided in order to evaluate the system efficiency and to optimize it, also a forecast is made in order to define the correct system sizing and upgrades. In a first phase the PV and wind turbines are not installed, and the design of the optimal system is derived by means of data analytics. On another side the normal tunnel ventilation management can be oriented for energy production and or for air quality by means of smart predictive system that manages the fans activation in order to provide the minimum energy consumption.

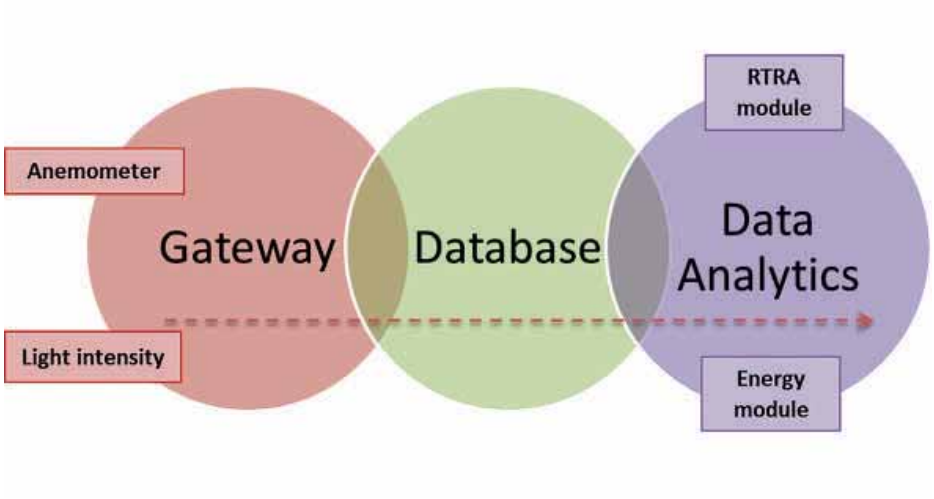


Figure 3 - Flow-chart of data acquisition and analytics

In particular the evaluation takes into account the meteorological and wind conditions, the traffic conditions and the devices availability both in real time and as a prediction. The prediction is derived from weather forecasts, traffic models and maintenance programs.

The software calculates the statistical airspeed (average and Standard deviation) that can be obtained by the system in specific conditions allowing the tunnel manager to define if integrative measures are to be taken for a certain period.

The chart in Figure 4 shows the ventilation effectiveness calculated for a predefined set of conditions for a longitudinally ventilated tunnel.

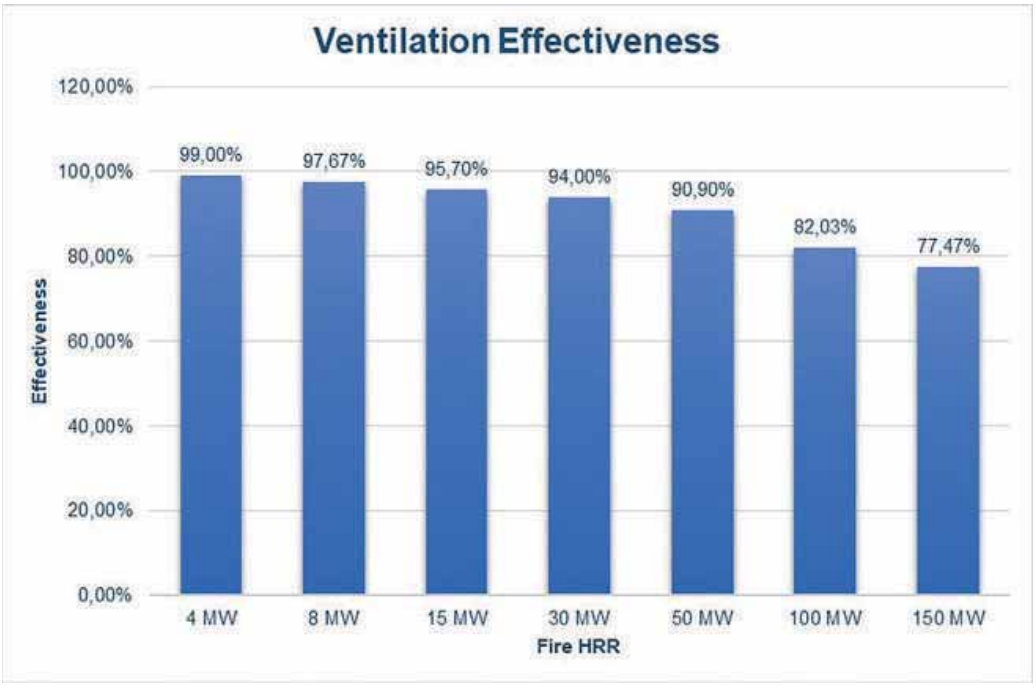


Figure 4 - Ventilation Effectiveness chart

GREEN POWER SUPPLY

An energy storage is provided in order to use the energy production when is necessary to realize a sustainable and autonomous system characterized with high availability. The following figure 5 illustrates such a system for the tunnel ventilation supply.

The system aims to solve problems of power availability for tunnels located in remote regions such as desert, steep mountains, deep country, in particular for tunnel refurbishment that needs upgrading of ventilation.

The figure shows a tunnel supplied at the two portals by means of different power sources: utility grid, wind turbines, photovoltaic panels with storage.

The system can provide energy for old jet fans with utility grid network and can supply the new jet fans with inverters by means of a battery storage system. The batteries can be charged by means of utility grid network or by means of renewable energy sources.

In case of lack of power from utility grid it is possible to extend the power of the system by means of batteries sized for working at full power for a predetermined time.

A Risk based design allows to define the exact autonomy of the batteries ant the necessity of a redundant batteries system.

For example, the smoke management with longitudinal system for a 1000 m to 2000 m tunnel can be effective in saving lives for 60 min (to be demonstrated with fire and evacuation simulations), by adopting a safety margin it is possible to size the batteries for 120 min of supply.

The system can be dimensioned to supply from 4 to 6 fanjet Fans with 30 kW power for 1 to 4 hours of autonomy.

The module is reversible so that can charge batteries by means of jet fans rotation and can integrate external photovoltaic panels.

Also, the power system can be installed for supplying hydrants or Fixed Fire Suppression Systems for existing tunnels or for new tunnels in difficult to reach locations (far from cities or with scarce utility grid).

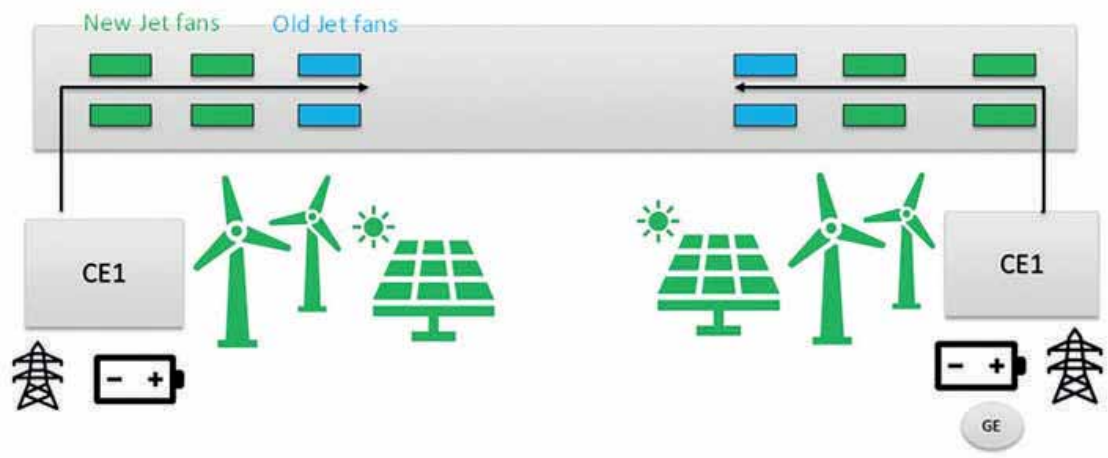


Figure 5 - Energy production and storage

In Figure 6 a more detailed scheme of the system is shown, in which it calls be seen which are the main components of the system:

- bi-directional inverter of for 100 to 300 kW power,
- PV panels directly connected to the inverter,
- Wind turbines directly connected to the inverter,
- Racks with Li-Ion batteries,
- Supervision system.

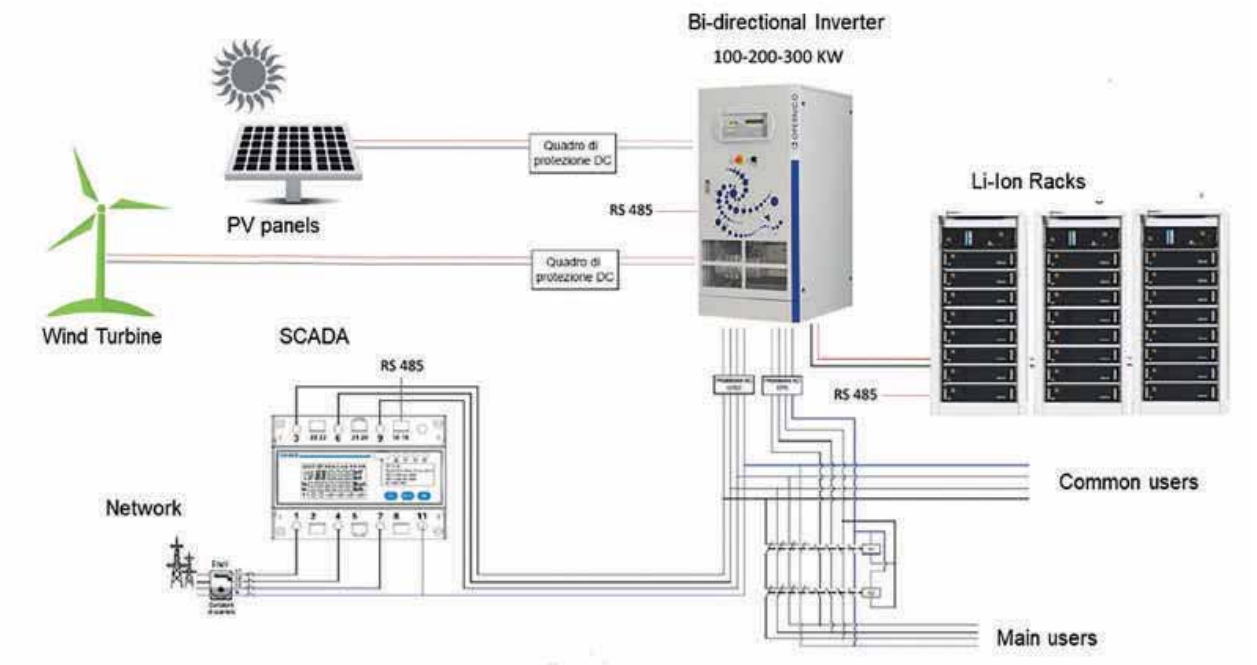


Figure 6 - Energy production and storage details

The system has been conceived as a modular structure in a shelter, shown in figure 7, with dimensions varying from 2,5 m x 6 m to 2,5 m x 11 m, that can be installed nearby existing power systems of tunnels in a plug and play fashion.

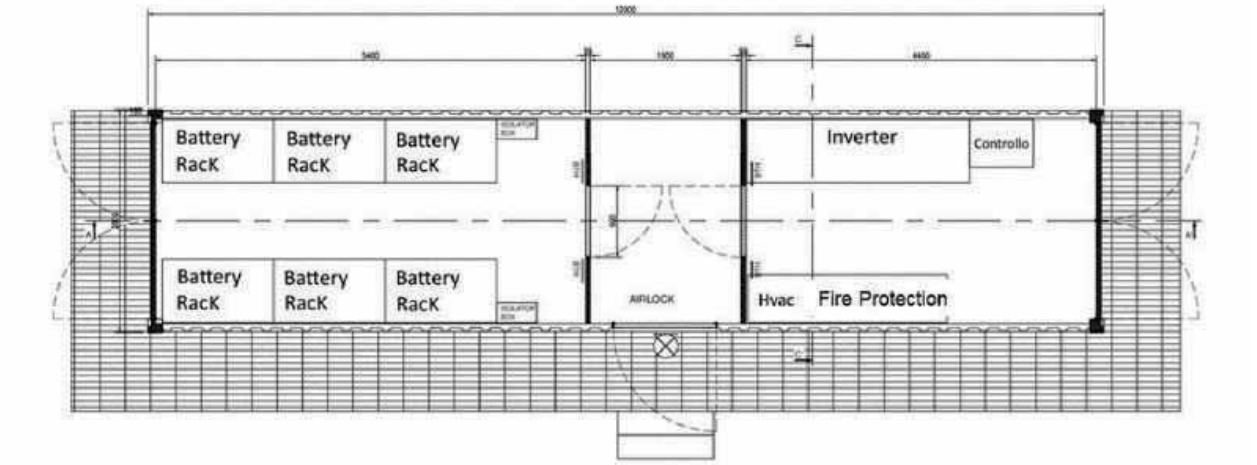


Figure 7 – Plug and play shelter

The green power supply if made by inverters that allows the continuous velocity control of jet fans improving substantially the possibility to control tunnel airspeed therefore the emergency management of the tunnel.

Also, the speed control can be used for limited times in normal exploitment conditions by gradually regulating the ventilation regimes that allows better controllability and energy saving.

More robust ventilation procedures and algorithms have been developed for this particular system.

The supply system has been designed and tested to allow the installation of the inverters at the tunnel portals inside the shelters with cables up to 1000 m without having harmonic resonance issues. This has been obtained by means the inverter software customization and proper filtering.

The installation of high efficiency fans such as the inclined outlet fans (see Figure 8) that improves the installation efficiency is the optimal combination for the energy storage system allowing the reduction of the installed power and batteries capacity.

Figure 8 – MoJet® fans

CONCLUSIONS

The possibility to create a real time risk analysis model (RTDQRA) and exploit the technologies available with the use of renewable energies determines a risk design-based project of tunnel system, that is actually a critical transport infrastructure. The sustainable goal from the AGENDA 2030 of the United Nations reminds the importance of safety related to the inclusive structure, accessible to everyone with the possibility to improve technologies and communication.

Safety issues related to a critical infrastructure must be, with priority, correlated to the design of the same infrastructure.

Critical does not mean that we cannot do a proper design in terms of safety, but underlines the importance to adopt risk analysis as a design and management criteria in order to give consistency and stability in time.

According to the Directive 2004/54/EC and of the Italian transcription Decree 264/06 a risk analysis based design approach is required for tunnel systems for which minimum safety measures does not bring to sufficient safety level. In 2022, the complex systems related sustainability affects each field of study, especially engineering. As known, tunnel is a very particular infrastructure in terms of energy consumption and safety issues related to the high level of risk determined by the consequences induced by a potential fire event.

The energy consumption related to the safety systems for tunnel ventilation, traffic management, lighting, and communications is a key point for a sustainable design and requires a new idea of "Smart Tunnel" in the framework of an holistic approach helps in solving in one time the safety and energy issues.

In order to evaluate the sustainability goals of tunnel safety design, Quantitative Risk Analysis allows to calculate real time risk level due to traffic, meteorological conditions, and the dependability of the safety subsystems, to define the emergency management procedures (emergency planning), for fire extinguishing, ventilation, communication systems and traffic management. This approach allows minimum energy requirements according to the synthesis of sustainable safety requirements. The paper also introduces another concept: GREEN TUNNEL Green is compliant with the production of energy required by means of renewable sources.

REFERENCES

[1] Mara Lombardi, Davide Berardi, Luca Stantero, Marta Galuppi, Real Time Dynamic Quantitative Risk Analysis Approach for Smart Tunnel- Proceedings of the 5th European International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Rome, Italy, July 26-28, 2022

[2] Salvatore Giua, Luca Stantero Fire Safety Engineering and risk-based tunnel safety design approach in Italy Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC 2019), May 3-9, 2019, Naples, Italy

[3] A European strategy on Cooperative Intelligent Transport Systems, a milestone towards cooperative, connected and automated mobility Brussels, 30.11.2016 COM (2016) 766 final.

[4] Amin M. Challenges in reliability, security, efficiency, and resilience of energy infrastructure: Toward smart selfhealing electric power grid. In: Proceedings of the power and energy society general meeting-conversion and delivery of electrical energy in the 21st century, 2008 IEEE. IEEE; 2008. p. 1– 5.

[5] Baig A., A Ruzli, R. Buang, A.B., Reliability Analysis Using Fault Tree Analysis: A Review, International Journal of Chemical Engineering and Applications, Vol. 4, No. 3, June 2013.

[6] BahooToroody A., Abaei M.M., Arzaghi E., Song G, De Carlo F., Paltrinieri N., Abbassi R. On reliability challenges of repairable systems using hierarchical bayesian inference and maximum likelihood estimation,Porcess Safety and Environmental protection , 2019.

[7] Camillo, A., Guillaume, E., Rogaume, T., Allard, A., F. Didieux, F. Risk analysis of fire and evacuation events in the European railway transport network. Fire Safety Journal 60, pp. 25–36.,2013.

[8] Cafaro E, Saba F. 2013. Approccio Ingegneristico all'Analisi di rischio in galleria. In Strade & Autostrade n. 98: 28-35. Milan, Italy.

[9] Coccia Rossana, Corsini Alessandro, Bonacina Fabrizio, Lombardi Mara et Al., An Application of Data-Driven Analysis in Road Tunnels Monitoring, IEOM Society International, 2021.

[10] D. Lgs. 05.06.2006, Road Tunnel Safety

[11] De Ruijter, A., Guldenmund, F., The bowtie method: A review. Saf. Sci. 88,211–218, 2016

[12] European Parliament and Council. Directive 2004/54/EC. Official Journal of the European Union. L.167, Bruxelles, Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32004L0054, April 2004.

[13] Guarascio M., Lombardi M. Rossi G., Sciarra G. Risk analysis and reliability-based design in tunnel fire safety. 575 584. 10.2495/SAFE090531.

[14] Guarascio M. "As Low As Reasonably Practible". How it does work in the rail and road tunnels in Italian rules. Risk Acceptability/Tollerability criteria. The Gu@larp model. SAFE21.

[15] Guarascio, M., Lombardi, M., Rossi, G., Sciarra, G., Risk analysis and acceptability criteria, WIT Transactions on the Built Environment pp.131–138, 2007

[16] Guarascio M., M. Lombardi, G. Rossi, G. Sciarra, Road tunnel safety rules in Italy: the tunnel country,WIT Transactions on the Built Environment pag. 319-326, 2007

[17] Konstantinos A. Kirytopoulos,. Quantitative risk analysis for road tunnels complying with EU regulations. Journal of Risk Research 13(8):1027-1041, December 2010.

[18] Isam Shahrour,Hanbing Bian,Xiongyao Xie ,Zixin Zhang, Use of Smart Technology to Improve Management OF Utility Tunnels, Applied Sciences ,January 2020

[19] IEEE Smart Cities. About Smart Cities. Available online: https://www.ieee-pes.org/pes-communities/ieee-smart-cities (accessed on 8 March 2022).

[20] Lombardi M., Rossi G., Fire protection of emergency electrical devices: effect on the level of risk – a case study of a rail tunnel, WIT Transactions on the Built Environment, Vol 151, 2015.

[21] Paolanti Marina, Felicetti Luca Romeo Andrea, Mancini Adriano Frontoni, Emanuele Machine Learning approach for Predictive Maintenance in Industry 4.0. IEEE/ASME International Conference on Mechtronic and Embed System and Applications, MESA, 2018.

[22] Report 2008R02EN. 2008. Risk analysis for road tunnels. PIARC

[23] Report 2012R20EN. 2012. Assessing and improving safety in existing road tunnels. PIARC

[24] Report 2012R23EN. 2012. Risk evaluation, current practice for risk evaluation for road tunnels. PIARC

[25] Report 2016R35EN. 2016. Experience with Significant Incidents in Road Tunnels. PIARC

[26] Smart Book, Anas, 2018.

[27] Sun X. & Luo M. 2014. Fire Risk Assessment for Super High-rise Buildings. In Procedia Engineering 71: 492 – 501. Elsevier

RENOVACIÓN VENTILADORES TÚNEL 2 GUADARRAMA DE AP-6 AÑO 2020

Gonzalo Grande Tomé
Autopistas an Abertis Company

El túnel 2 de Guadarrama lleva en funcionamiento desde el año 1972. Consta de dos carriles de circulación en sentido sur-norte y tres estaciones de ventilación: norte, sur y central. En el año 2008 se realizó una modificación en los regímenes de ventilación del túnel en busca de un funcionamiento más seguro para la evacuación en caso de incendio, pasando el funcionamiento del sistema de ventilación a ser "pseudo - longitudinal", es decir, priorizando la impulsión de aire limpio en la primera parte del túnel y la extracción de aire sucio en la parte final.

Siendo el sistema de ventilación el más crítico e imprescindible para la gestión de las incidencias con necesidad de control de humos en túneles de carreteras, y para asegurar la mantenibilidad y la continuidad de la operación del sistema de ventilación, se ha considerado necesario proceder a la sustitución de los ventiladores del túnel 2 por otros de tecnología más moderna en cuanto a ventiladores, alimentación eléctrica, sistema de control, comunicaciones y obra civil al identificarse riesgos derivados de su antigüedad y obsolescencia.

Estos trabajos conllevaron estudios de ventilación previos y obligaron al cierre temporal al tráfico de este túnel, utilizado en condiciones normales como de salida de Madrid, derivando por tanto la circulación de vehículos por los túneles 1 y 3 y estableciendo este modo de gestión de tráfico como plan general durante la mayor parte del tiempo de la duración de los trabajos del túnel 2.

Finalmente, la pandemia redujo en gran medida el tráfico esperado y esto minimizó los posibles incidentes que, en situación normal del tráfico se podrían haber dado.

RENOVATION OF FANS IN TUNNEL 2 GUADARRAMA OF AP-6 YEAR 2020

Guadarrama tunnel 2 has been in operation since 1972. It consists of two traffic lanes running south-north and three ventilation stations: north, south and central. In 2008, a modification was made to the tunnel's ventilation system in order to make it safer for evacuation in the event of fire, with the ventilation system becoming "pseudo-longitudinal", i.e. giving priority to the supply of clean air in the first part of the tunnel and the extraction of dirty air at the end of the tunnel.

As the ventilation system is the most critical and essential for the management of incidents requiring smoke control in road tunnels, and to ensure the maintainability and continuity of the operation of the ventilation system, it was considered necessary to replace the fans in tunnel 2 with others of more modern technology in terms of fans, electrical power supply, control system, communications and civil works, as risks derived from their age and obsolescence were identified.

These works required prior ventilation studies and forced the temporary closure to traffic of this tunnel, used in normal conditions as an exit from Madrid, thus diverting the circulation of vehicles through tunnels 1 and 3 and establishing this traffic management mode as a general plan for most of the duration of the works in tunnel 2.

Finally, the pandemic greatly reduced the expected traffic and this minimised the possible incidents that could have occurred in a normal traffic situation.

RÉNOVATION DES VENTILATEURS DU TUNNEL 2 GUADARRAMA DE L'AP-6 ANNÉE 2020

Le tunnel 2 de Guadarrama est en service depuis 1972. Il se compose de deux voies de circulation allant du sud au nord et de trois stations de ventilation : nord, sud et centrale. En 2008, une modification a été apportée au système de ventilation du tunnel afin de sécuriser l'évacuation en cas d'incendie, le système de ventilation devenant " pseudo-longitudinal ", c'est-à-dire privilégiant l'apport d'air propre dans la première partie du tunnel et l'extraction de l'air sale en fin de tunnel.

Comme le système de ventilation est le plus critique et le plus essentiel pour la gestion des incidents nécessitant un contrôle des fumées dans les tunnels routiers, et pour assurer la maintenabilité et la continuité du fonctionnement du système de ventilation, il a été jugé nécessaire de remplacer les ventilateurs du tunnel 2 par d'autres de technologie plus moderne en termes de ventilateurs, d'alimentation électrique, de système de contrôle, de communications et de travaux de génie civil, car les risques dérivés de leur âge et de leur obsolescence ont été identifiés.

Ces travaux ont nécessité des études préalables de ventilation et ont imposé la fermeture temporaire à la circulation de ce tunnel, utilisé en conditions normales comme sortie de Madrid, détournant ainsi la circulation des véhicules par les tunnels 1 et 3 et établissant ce mode de gestion du trafic comme plan général pour la majeure partie de la durée des travaux dans le tunnel 2.

Enfin, la pandémie a fortement réduit le trafic prévu, ce qui a permis de minimiser les éventuels incidents qui auraient pu se produire dans une situation de trafic normal.

1. CONFIGURACIÓN DE LOS TÚNELES

Los Túneles de Guadarrama de la autopista AP-6 Villalba – Adanero discurren por las provincias de Madrid (Comunidad de Madrid) y Segovia (Comunidad de Castilla y León), entre el PK 53,200 y el PK. 56,600. Están constituidos por 3 túneles interoperables, contando cada uno con una calzada asociada entre los PK 49 y 60

1.1. Operación de los túneles

OPERACIÓN "SALIDA"

En operaciones salida de Madrid con intensidades de tráfico superiores a los 2.500 v/h, se habilita el túnel 1 como apoyo del túnel 2. Con esto, se habilitan 4 carriles de circulación en sentido A Coruña.

OPERACIÓN "RETORNO

En operaciones retorno a Madrid con intensidades de tráfico superiores a los 4.500 v/h, se habilita el túnel 1 como apoyo del túnel 3. Con esto se habilitan 5 carriles de circulación en sentido Madrid. Cuando el Túnel 1 está de apoyo, la calzada reversible está restringida a tráfico pesado y salvo en circunstancias puntuales se permite su paso.

1.2. Sistema de ventilación Túnel 2

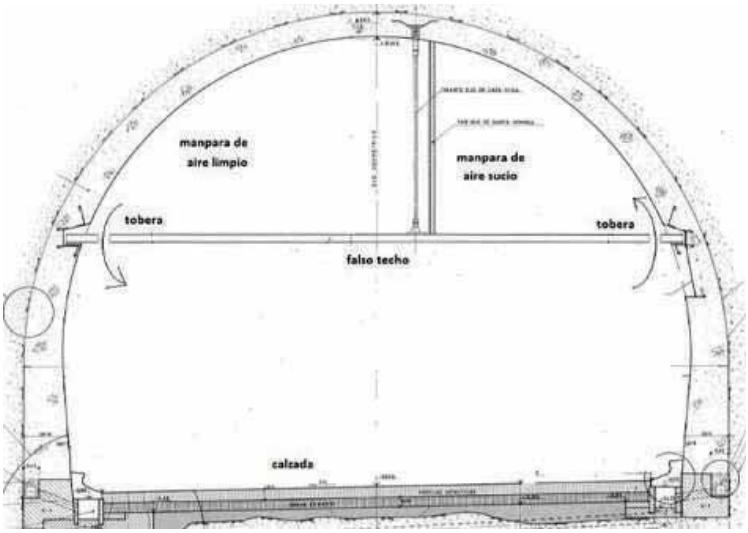
El túnel 2 de Guadarrama lleva en funcionamiento y en servicio desde el año 1972, cuando se construyó para permitir establecer una circulación unidireccional en sentido de entrada a Madrid por el túnel 1, y de salida de Madrid por el túnel 2.

Dicho túnel consta de dos carriles de circulación en sentido sur-norte y tres estaciones de ventilación: norte, sur y central.

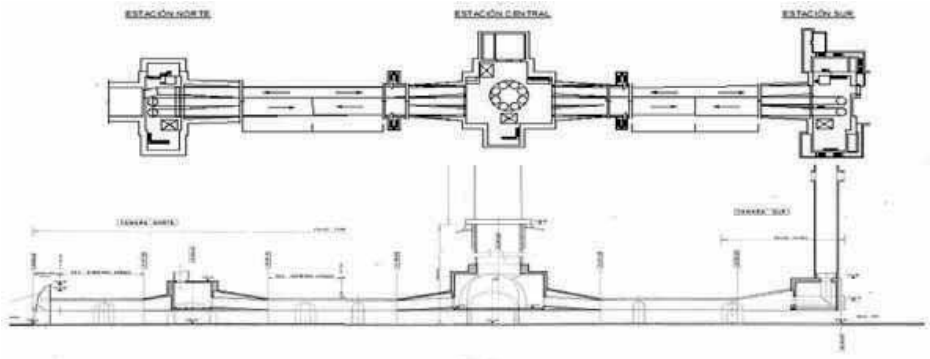
Las principales características del sistema de ventilación del túnel 2 son las siguientes:

La ventilación del Túnel 2 se compone 1 de galería y 14 conductos de ventilación, donde están alojados los ventiladores. El diámetro de los ventiladores es de 3 metros.

La galería de ventilación es un falso techo a lo largo del túnel, dividida en dos cámaras por un tabique central. Las divisiones son de 2/3 por donde discurre el aire limpio y 1/3 para aire viciado. Los conductos de ventilación conectan con esta galería.



El túnel dispone de tres estaciones o salas de ventilación con chimenea, una en cada boca y otra en la zona central.

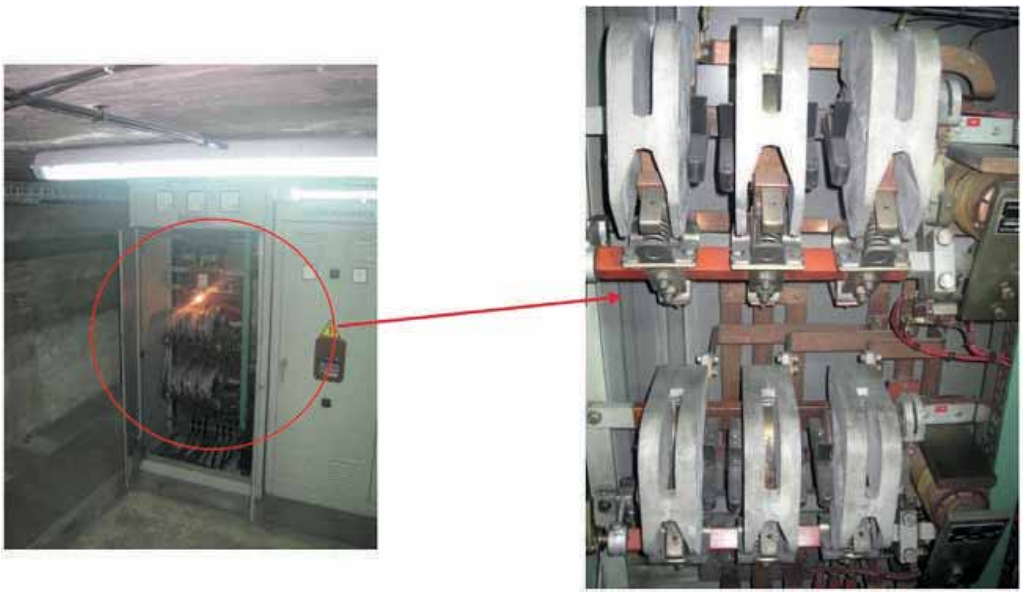


El sistema de ventilación tiene una potencia de 100 MW, superior a los requeridos por el Real Decreto 635/2006, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles, donde se indica que los sistemas de ventilación deberán poder extraer el humo para un incendio tipo con potencia mínima de 30 MW.

En las imágenes adjuntas se aprecia el tamaño de los ventiladores. Para el mantenimiento de los ventiladores, se utilizan puentes grúa instalados en cada sala de ventilación, lo que permite abrir los tubos de ventilación y extraer los ventiladores de su interior.

Cada ventilador dispone de un armario de alimentación eléctrica y un panel de control manual local.

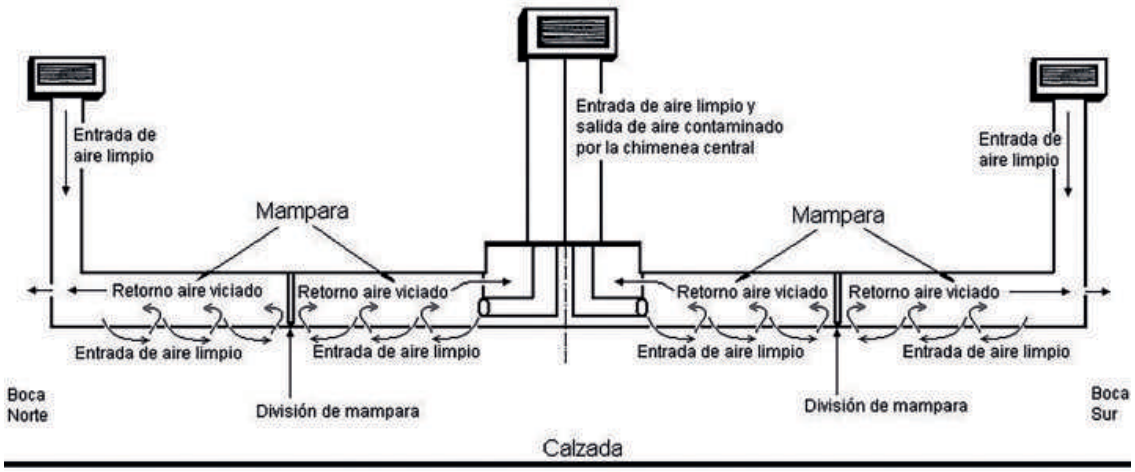
Armario de alimentación eléctrica:



Paneles de control manual local:

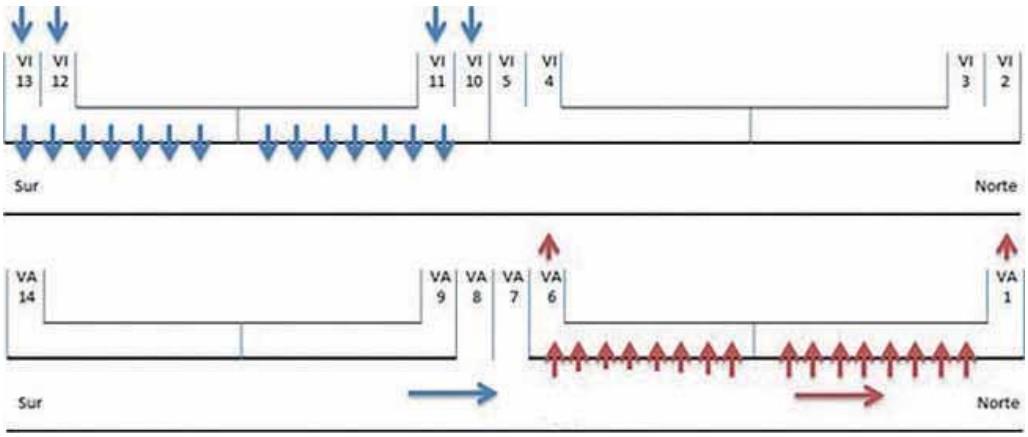
El sistema de control de la ventilación, en adelante conjunto ERU/CT, siendo: ERU: estación remota universal, CT: controladora de túnel fue actualizado en 1995 estando, previo a la renovación, obsoleto, descatalogado y fuera de soporte por parte del fabricante.

El sistema de ventilación original estaba concebido como transversal puro.



En el año 2008, se realizó una modificación en los regímenes de ventilación del túnel en busca de un funcionamiento más seguro para la evacuación en caso de incendio, pasando el funcionamiento del sistema de ventilación a ser "pseudo - longitudinal", es decir, priorizando la impulsión de aire limpio en la primera parte del túnel y la extracción de aire sucio en la parte final.

De esta forma se consiguió una corriente longitudinal de aire en el túnel, apoyada además por el sistema de extracción distribuida y el "efecto pistón" de los vehículos en movimiento, que favorece la evacuación de ocupantes en el túnel en caso de ocurrir un incendio, principalmente de aquellos obstaculizados detrás del vehículo incendiado.



2. MOTIVACIÓN DE LA ACTUACIÓN

Los ventiladores cuentan con un sistema hidráulico-mecánico de regulación de la posición de álabes para limitar el consumo eléctrico en el arranque y regulación del caudal de aire necesarios. Este sistema hidráulico-mecánico, aunque es muy robusto, es complejo y es responsable de buena parte de los fallos en el arranque que se suceden sobre el sistema de control y que requieren de un mayor control y supervisión desde el Centro de Operaciones de San Rafael (COPSV). Previo a la renovación, este sistema está superado por la existencia en el mercado de variadores de frecuencia.

Por otro lado, los sistemas periféricos de control, como la Controladora de Túnel (conocida como CT) estaban basados en tecnología obsoleta, que podría afectar a la disponibilidad del sistema de ventilación en caso de avería o fallo.

El sistema de ventilación podía trabajar en forma degradada en el caso de existir fallo de comunicaciones entre ERU y COPSV. En caso de funcionamiento degradado, debido a la obsolescencia del conjunto ERU/CT, se mantendrían los algoritmos de ventilación anteriores a 2008, que estaban residentes en el CT (controladora de túnel), lo que provocaría una mala extracción de los humos en caso de incendio. Este funcionamiento degradado, debido a la obsolescencia del conjunto ERU/CT, no se podía actualizar.

La obsolescencia implica que los sistemas afectados quedan fuera de soporte de los fabricantes, así como la no disponibilidad de recambios en el mercado.

Desde el año 2008, se ha comprobado el buen comportamiento de la ventilación, creando corriente longitudinal de aire para evacuación de los humos, tanto en sanitaria como en emergencia, concluyendo tras varios estudios realizados la conveniencia de favorecer el flujo longitudinal frente al transversal, creando presión de aire limpio en un punto y aspirando el aire viciado en el punto más alejado, asemejándola a la ventilación que se disponen en los túneles 1 y 3 con ventiladores axiales.

Si bien los ventiladores están sometidos a un estricto y exhaustivo programa de mantenimiento que garantiza su funcionamiento y el correcto estado de los mismos, como se ha expuesto, se identificaron diversos riesgos derivados de su antigüedad y obsolescencia.

Siendo el sistema de ventilación el más crítico e imprescindible para la gestión del tráfico en túneles de carreteras, y para asegurar la mantenibilidad y la continuidad de la operación del sistema de ventilación, se consideró necesario proceder a la sustitución de los ventiladores del túnel 2 por otros de tecnología más moderna, cuyo alcance se detalla en el apartado siguiente.

3. ALCANCE DE LOS TRABAJOS

La actuación consistió en la sustitución de 12 de los 14 ventiladores existentes, que datan de la fecha de construcción del túnel (1972).

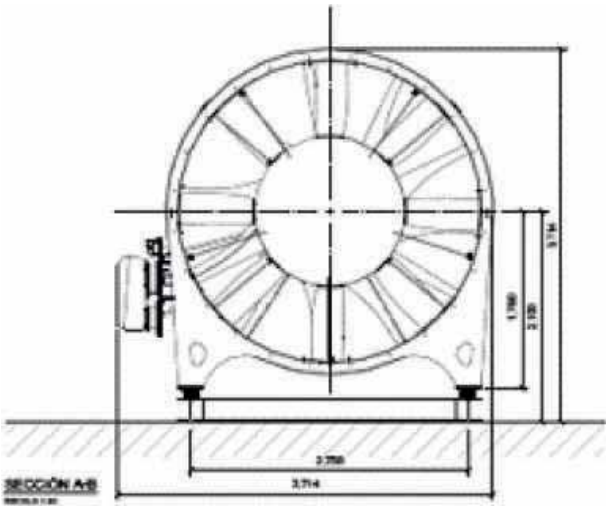
Los ventiladores se renovarían por otros equivalentes en prestaciones, pero con tecnología actual, resistentes a altas temperaturas, eliminando los elementos susceptibles de fallo en el arranque y sustituyéndolos por variador de frecuencia para su arranque y control de la velocidad. Con esta actuación se consigue disponer de ventiladores sin limitaciones en cuanto a su mantenimiento.

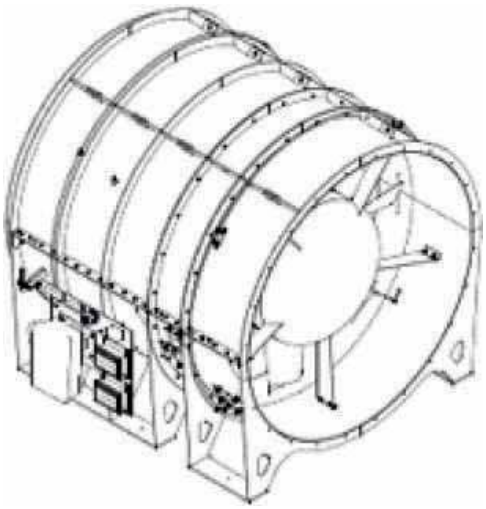
Los ventiladores existentes carecían de certificado de resistencia al fuego, por lo que se había previsto la sustitución y renovación de los actuales ventiladores por otros que proporcionaran las mismas prestaciones, al tiempo que evitaran las limitaciones tecnológicas que presentaban.

Características de los nuevos ventiladores

Las características principales que tendrían que cumplir los nuevos ventiladores, son las siguientes:

- Diámetro interior:3.000 mm
- Caudal:162 m3/s:
- Presión total:657 Pa
- Rendimiento:81%
- Potencia instalada:150 kW
- Resistencia a la temperatura: 250ºC-2h
- Revoluciones ventilador:225 / 450 rpm
- Tipo de arranque: Variador de frecuencia



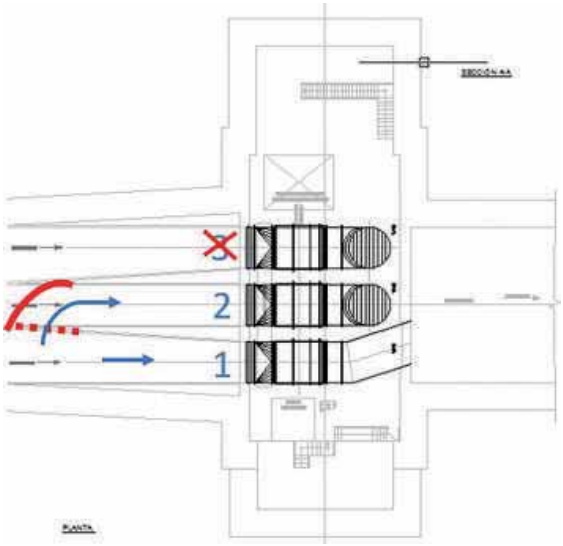


Reversibilidad de dos ventiladores

Se trata de incorporar en la ventilación al ventilador V2, para ello se llevarán a cabo las siguientes actuaciones:

- Desmontaje de ventiladores actuales V14, V2 y V3.
- Adecuación de la cuna en conducto para reversibilidad de V2.
- Adecuación conducto para conversión de dirección V2.
- Instalación ventiladores V2

Se incorporará un ventilador más como aspiración (V2) en la cámara norte. Este ventilador que era de impulsión no estaba en funcionamiento, por lo que se cambiará su sentido para hacerlo de aspiración. Con esto, se conseguiría un ventilador de backup de aspiración en la zona norte que puede mitigar la criticidad de los ventiladores de aspiración de medio norte (V6) y norte (V1).



3.1. Adaptación instalación eléctrica

Era preciso actuar en diversos cuadros con el fin de dar correcta alimentación y control a las nuevas unidades de ventilación a instalar en cada una de las cámaras.

En todos los casos, sería preciso actuar de la forma siguiente:

- Incorporar en los cuadros de acometida analizadores de redes, así como sustituir los magnetotérmicos generales de cabecera por interruptores automáticos con relé diferencial.
- Eliminar los actuales cuadros de fuerza y cuadros de control
- Instalar los nuevos cuadros de fuerza + control dotados de variadores de frecuencia, así como sus respectivas líneas eléctricas y canalizaciones.
- Instalar botonera de control local en cada armario de control y fuerza, conectada con el PLC de control del ventilador según se indica en planos
- Desconectar las baterías de condensadores, innecesarias con la instalación de variadores de frecuencia.
- Instalación de analizadores de redes en los cuadros de distribución
- Instalación de variadores de frecuencia para el arranque y regulación de velocidad para los ventiladores.

3.2. Adaptación de la instalación de comunicaciones

Todas las comunicaciones de fibra óptica que dan servicio a los sistemas de control y regulación de tráfico y ventilación del Túnel 2, están ubicadas en los armarios de las ERU´s actuales. Para facilitar la renovación de las ERU´s, sin afectar al resto de sistemas, debía cambiarse la ubicación todos los equipos y cableados de comunicaciones.

Estos equipos y cableados, de forma general, se reubicarán en un armario específico en cada estación de ventilación de forma independiente.

Todas las tareas de reubicación de las comunicaciones de fibra óptica y equipos se realizarán previos a la actualización de las ERU's.

3.3. Adaptación de la instalación de control

El túnel objeto de esta actuación, se encuentra equipado con 4 conjuntos de ERU/CT. El alcance de esta actuación incluye la remodelación de los 4 conjuntos ERU/CT a 4 ERU-T (Estación Remota Universal de Túnel) nuevas.

Las nuevas ERU-T, se instalarán próximas a las ERU/CT existentes. Las nuevas ERU-T serán redundantes. Estarán basadas en arquitectura de PC industrial, duplicado de forma que en caso de fallo del principal (Maestra) se produce la conmutación al equipo secundario (Esclava). Las ERU-T se conectarán a la red IP existente.

A las ERU-T, se conectarán los elementos de campo a través de tarjetas de entradas/salidas analógicas/digitales. También se conectarán vía IP a través de la red de comunicaciones prevista, los variadores de frecuencia, analizadores de redes, PLCs de ventiladores y las cabeceras distribuidas existentes.

4. ESTUDIO ALTERNATIVAS DE EJECUCIÓN

Se contemplaron 3 posibles escenarios de ejecución que permitieran llevar a cabo las actuaciones generando las menores afecciones al tráfico

4.1. 1 fase – Corte continuado

Este escenario contempla la ejecución con corte continuo de túnel y en una única intervención en períodos con el menor impacto para la explotación y gestión del tráfico.

Esta alternativa de ejecución se estimaba que tiene un plazo de ejecución de 12 semanas y tiene impacto y afectación al tráfico al desviar el tráfico por el túnel 1.

4.2. 2 fases- Corte continuado

Este escenario contempla la ejecución con corte continuo de túnel en dos ventanas de ejecución, en períodos con el menor impacto para la explotación y gestión del tráfico.

En una primera ventana se actuaría sobre la mitad de los ventiladores y en la segunda ventana sobre el resto de ventilación.

Esta alternativa de ejecución se estimaba que tiene un plazo de ejecución completo de 19 semanas. El impacto en número de semanas de corte de túnel con afectación al tráfico es mayor que en el escenario de ejecución de una única ventana.

4.3. Corte discontinuo

Con el objetivo de minimizar la afectación al tráfico se ha analizado este escenario, en el que se trabajaría de forma discontinuada de lunes a jueves con corte de túnel y apertura al tráfico durante el fin de semana, si bien este escenario implicaba al mismo tiempo una incertidumbre y un riesgo elevados, ya que, durante la ejecución, no se garantizaba a priori la apertura al tráfico el fin de semana.

Esta alternativa de ejecución se estimaba que tiene un plazo de ejecución de 33 semanas. El impacto en número de semanas de corte de túnel con afectación al tráfico es mayor que en el escenario de ejecución de los escenarios de corte continuado en una o dos fases

4.4. Valoración de escenarios

En la tabla siguiente se muestra un resumen de escenarios valorando diferentes criterios de actuación con nivel de impacto: bajo, medio, alto.

VARIABLES IMPACTO SEGÚN MODO DE EJECUCIÓN

Modo de ejecución	Impacto tráfico y afectación a cliente	Garantía de funcionamiento a la apertura del túnel	Dificultad de implantación	Certificación completa de la instalación antes de apertura túnel al tráfico	Duración en semanas de la afectación y corte de túnel	Riesgo de apertura de túnel con ventilación degradada
1 - Corte total de túnel - una única fase	🔴	🟢	🟢	🟢	12	🟢
2- Corte de túnel en dos fases	🟠	🟢	🟠	🟠	19 (9+10)	🟢
3- Cortes continuados de Lunes a Jueves	🟢	🔴	🔴	🔴	33-35	🔴

4.5. Escenario óptimo de ejecución

El escenario óptimo de ejecución era en una única ventana, corte único continuado de 12 semanas con afectación al tráfico, siendo este escenario el que:

- tiene menor impacto en el tráfico.
- simplifica la complejidad y gestión de las actuaciones a realizar.
- minimiza el riesgo de fallos en el sistema de ventilación.
- asegura la apertura al tráfico con el sistema de ventilación completamente certificado, auditado y probado.

5. PLAN OPERATIVO DE VIALIDAD Y TRÁFICO

Para la coordinada gestión del tráfico y de las incidencias que se originen durante la actuación de sustitución de los ventiladores, se contará con un Plan Operativo de Vialidad y Tráfico, que analizará los principales factores que influyen en la gestión: intensidades de tráfico, tipología de incidencias graves que pudieran darse, duración de las afecciones, planes de desvíos y medidas compensatorias a llevar a cabo.

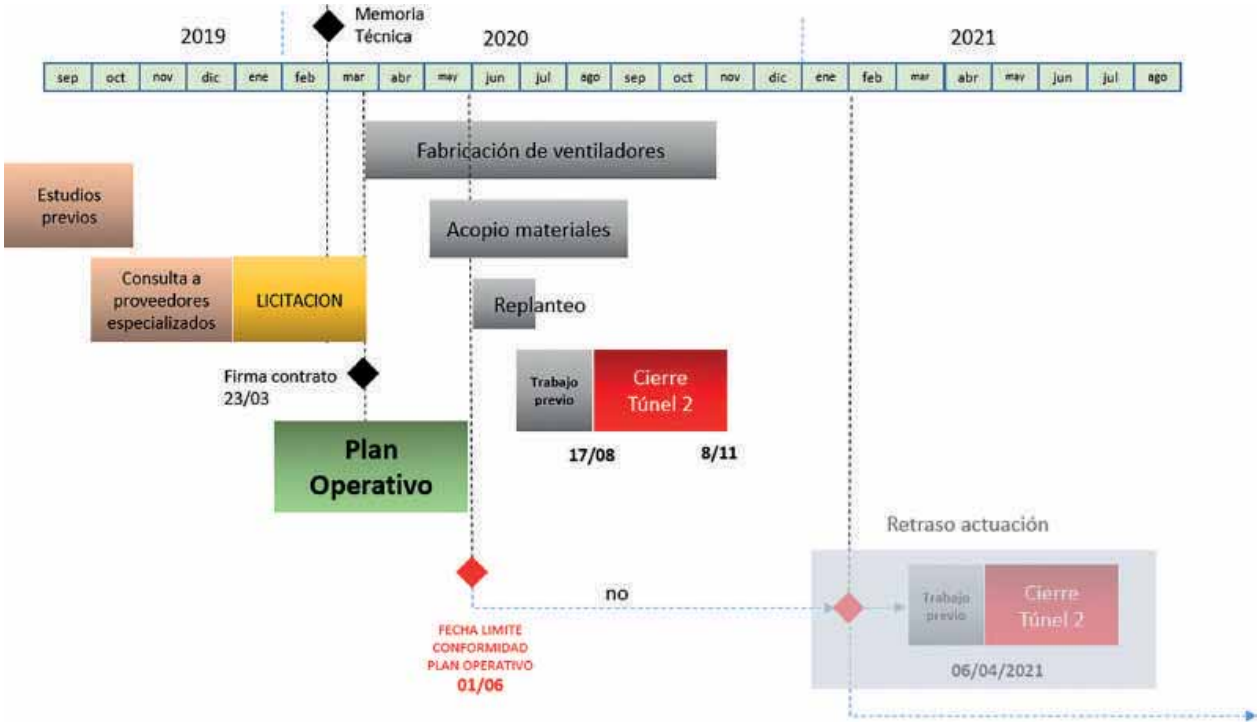
El Plan Operativo analizará las diversas incidencias que se puedan dar y actualizará los procedimientos en base a los siguientes indicadores:

		Duración del incidente < 1h	1h < Duración del incidente >4h	4h < Duración del incidente
• Accidente o vehículo/obstáculo detenido en calzada (bloqueando carriles o calzada completa) • Retenciones superiores a 5 km y con tiempo estimado de resolución superior a 2 horas • Derrame de líquidos, vertidos incontrolados • Accidente implicación de mercancías peligrosas con o sin afección a la carga • Incendio Vehículo o explosiones en vehículos • Servicio degradado • Sabotajes, Atentado o amenazas de atentado, Manifestaciones o desórdenes públicos	IMH<500 Veh/h	• Refuerzo Personal • Medidas Instalaciones • Medidas Trafico • Comunicaciones externas • Comunicaciones internas.		
	500 Veh/h< IMH >1.800 Veh/h			
	1800 Veh/h< IMH > 2500 Veh/h			

6. CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN

En el cronograma siguiente, se recoge a alto nivel la planificación de los trabajos prevista:

A la vista de los riesgos identificados y la conveniencia de la actuación, se considera prioritario aprovechar la primera ventana disponible para el cierre del túnel 2, antes del inicio de la próxima campaña de vialidad invernal.



7. RESULTADO DE ACTUACIÓN

Las principales ejecuciones que se realizaron fueron:

- Auditoria de comunicaciones/Fibra Óptica.
- Pruebas FAT de ventiladores (20/08).
- Inicio de trabajos con corte de túnel realizado desde el 17/08/2020.
- FASE I finalizada el 6 de octubre: incluye desmontaje y montaje de ventiladores en cámara sur y cámara central (14, 13, 12, 7, 8, 2 y 3), arrancadores y cuadros de acometida. Migración cableado control ERU/CT antiguas y montaje y conexión en ERUs nuevas. Reconfiguración infraestructura comunicaciones (f.o) para nuevos anillos realizada en cámara Sur y Central.
- Validación por el Responsable de Seguridad en Túneles el 8 de octubre y apertura túnel Puente del Pilar con 100% capacidad de ventilación.
- Entrega informe técnico No Renovación V14
- FASE II finalizada el 6 de noviembre. Incluye desmontaje y montaje de ventiladores en cámara central y cámara norte (4, 6, 9, 11, 1 y 2), migración ERU/CT antiguas a nuevas y reconfiguración f.o. en cámara Norte.
- Validación por el Responsable de Seguridad en Túneles el 12 de noviembre.
- Pruebas algoritmos de ventilación y planes de incendio T2 los días 9-11 de noviembre.
- Prueba de humos calientes y simulacro emergencias los días 17 y 18 de noviembre.
- Finalización trabajos y Apertura Túnel – 20 de noviembre (14 semanas corte túnel)

MEDIDA DE NO2 EN TÚNELES. LA EXPERIENCIA EN LOS TÚNELES DE CALLE 30

María del Carmen Bonilla González
Madrid Calle 30

En 2019 Madrid Calle 30 realizó un profundo análisis sobre los elementos de medida del contaminante NO2 dentro de los túneles con objeto de optimizar los arranques de la ventilación sanitaria y con ello utilizar este servicio de una forma más eficiente energéticamente. En esta presentación se expone como se realizó aquel estudio, cuáles fueron los resultados obtenidos y cual el plan de acción establecido.

NO2 MEASUREMENT IN TUNNELS. THE EXPERIENCE IN THE CALLE 30 TUNNELS

In 2019 Madrid Calle 30 developed a deep study about the NO2 detectors inside the tunnels to optimize the sanitary ventilacion turn on to use this system in a electrical productive way. This presentation is going to set out the procese of that study, all the outcomes and the action plan.

NO2 MESURE DANS LES TUNNELS. L'EXPÉRIENCE DANS LES TUNNELS DE LA CALLE 30

En 2019, Madrid Calle 30 a réalisé une analyse approfondie des éléments de mesure du polluant NO2 dans les tunnels afin d'optimiser les démarrages de la ventilation sanitaire et ainsi utiliser ce service de manière plus efficace du point de vue énergétique. Cette présentation explique comment l'étude a été réalisée, quels sont les résultats obtenus et quel plan d'action a été établi.

1. OBJETO

El objeto de este documento se enmarca dentro de las presentaciones de la 2ª CONFERENCIA INTERNACIONAL DE PIARC SOBRE LA EXPLOTACIÓN Y LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES DE CARRETERA, siendo el mismo una presentación las dificultades que a veces nos encontramos cuando tenemos una instalación tan particular como los túneles de la M30 y en particular sobre el actual sistema de detección de NO2.

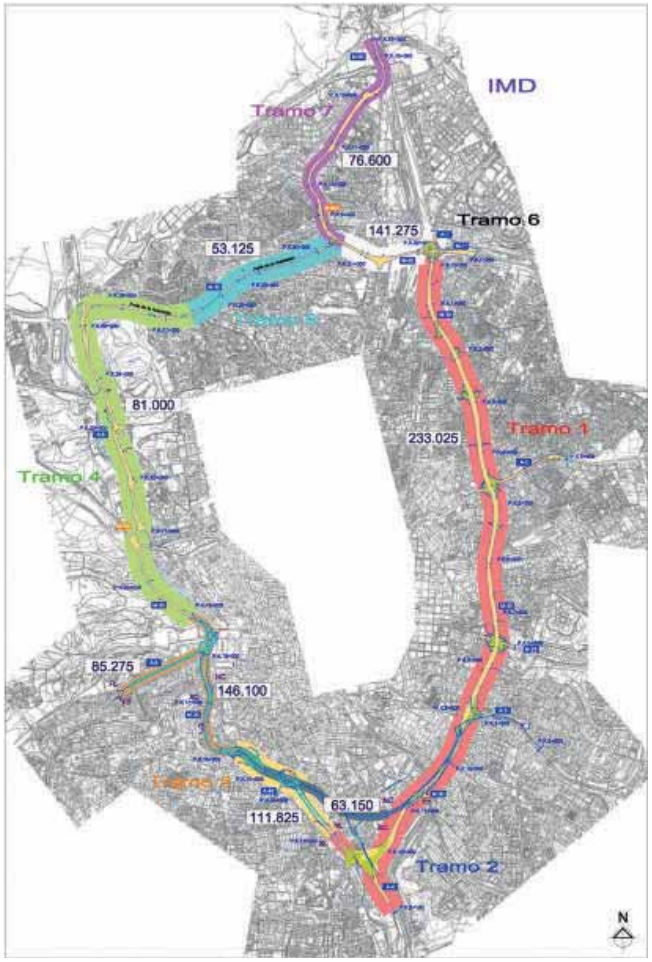
2. ANTECEDENTES

2.1. MADRID CALLE 30. Infraestructura y servicio.

Tras la finalización de la construcción de los túneles en 2007, nació Madrid Calle 30 como empresa mixta para dar servicio a la infraestructura. Madrid Calle 30 es una empresa pública (80%) con aportación de capital privado (20%).

El objeto de Madrid Calle 30 es la conservación, mantenimiento y explotación de la M30. Para la realización de estas labores en campo no se cuentan con medios propios, sino que existe una subcontrata, esta empresa a su vez es la propietaria del 20 % de la sociedad, por lo que sería más justo denominarla socio. Donde MC30 tiene una función directiva, y la subcontrata una función completamente ejecutiva.

La M-30 es el principal anillo circunvalación de Madrid. Con 32,5 kilómetros y un IMD de casi 1.000.000 de vehículos diarios distribuidos de la siguiente forma:



El túnel fue una de las construcciones más recientes, realizadas durante el proceso de transformación de 2004. Inaugurado en 2007 cuenta con 40 kilómetros de túnel urbano (si desarrollamos las dos calzadas de túnel, e incluimos rampas de acceso y salida), una de las mayores infraestructuras de este tipo a nivel europeo.

La magnitud de esta infraestructura es tal, que llegamos a tener 18.000 equipos distribuidos por todo su trazado.

A continuación, se indican en términos generales estas instalaciones, y se dan algunos números con el fin de poder dar a conocer la magnitud de los sistemas. En algún caso estos sistemas se desarrollan en apartados siguientes con el fin de dar a conocer su funcionamiento.

- Sistema de Ventilación. 940 ventiladores.
- Sistema de Iluminación: 45.000 puntos de luz.
- Sist. eléctrico en Alta Tensión: 37 centros de Transformación con una potencia total instalada de 8,8 GW.
- Salidas de emergencia: 201 unidades.
- CCTV. 1668 cámaras de las que aproximadamente 700 pertenecen al sistema DAI.
- Bombeo de agua de drenaje: 32 grupos y aproximadamente 10.000 m^3/día.
- Postes SOS: 720 unidades.
- Barreras de Control de acceso: 660 unidades.
- Semáforos: 670 unidades.
- Detección Lineal de Incendios: 1085 sensores de temperatura.
- Detectores Calidad de Aire: 284 sensores.
- Panales de mensaje variable: 530 unidades.
- Sistema de megafonía. 3.500 altavoces del sistema de Megafonía.
- Sistema de Radiocomunicaciones: 10 canales FM + TETRA + TETRAPOL en todo el trazado.
- Cobertura 4G en todo el trazado.

Como se puede observar en el número de equipos que se manejan dan una clara idea sobre la complejidad de esta infraestructura.

2.2. MADRID CALLE 30. Sistema de ventilación

La ventilación en los túneles de la M30 es vital para garantizar la seguridad de sus usuarios en caso de accidente o incendio.

Esta vía cuenta con un total de 48 kilómetros de túneles, que están provistos de 2 sistemas diferentes de ventilación que permiten cumplir con las normativas en cuestión de seguridad vial.

En todo el recorrido puedes encontrar hasta 900 ventiladores y 19 estaciones de filtrado de aire, que también garantizan la salubridad del aire que se respira, al igual que ocurre con los túneles de la red de metro.

2.2.1. Funcionamiento de la ventilación

El sistema de ventilación de los túneles de la M30 está preparado para funcionar en caso de incendio. La ventilación también funciona en situación de servicio, es decir, para garantizar una buena ventilación durante el uso de los túneles. Estas son sus dos principales funciones.

SISTEMA DE VENTILACIÓN EN SITUACIÓN DE SERVICIO

En situación de servicio, el control del sistema de ventilación es distribuido, ya que se divide toda la red de túneles en diferentes sectores que facilitan su control. Este se realiza por parte de unidades de control remotas que se centran en esos sectores concretos, garantizando su correcto funcionamiento y mantenimiento. Cada zona está configurada con un algoritmo de control específico, estando todos ellos basados en unos criterios generales comunes. El algoritmo de servicio se basa en arrancar la ventilación en función de unos niveles de contaminación que han sido predefinidos con anterioridad, gracias a las lecturas de los sensores de contaminación que existen en los túneles.

En situación de servicio, entra también en juego el sistema de filtrado, que se encarga de limpiar el aire antes de que este salga al exterior.

SISTEMA DE VENTILACIÓN EN INCENDIOS

Ante una situación de incendio existen unos protocolos de actuación establecidos que son seguidos en detalle por el sistema seguidos en detalle por el personal de explotación.

2.2.2. Tipos de ventilación

Los tipos de ventilación existentes en los túneles de Madrid Calle 30 son:

- Sistema transversal puro: bypass, A-3, conexión tramo 4-bypass
- Sistema de ventilación longitudinal con pozos mixtos: Madrid Río, Embajadores y Avda. Portugal

A través de estos tipos, el sistema de ventilación inyecta aire fresco y arrastra y extrae aire viciado. Estos cantones rondan los 600 metros de longitud.

2.2.3. Objetivos del sistema

En el caso de situación de servicio, el objetivo del sistema de ventilación es el de garantizar una buena calidad del aire dentro de los túneles. De este modo, se establecen unos límites de toxicidad que no deben ser sobrepasados. Además, se pretende garantizar una visibilidad segura para la conducción.

En el caso de un incendio, el objetivo del sistema es facilitar el proceso de evacuación de los usuarios de la vía en ese momento. También se facilita a los servicios de emergencia la evacuación de los humos y la extinción del propio incendio.

El correcto funcionamiento de la ventilación de los túneles de la M30 es vital para garantizar un servicio de calidad a sus usuarios durante la conducción y para afrontar con seguridad un accidente o incendio eventual que pueda ocurrir.

2.3. Consumo energético en los túneles

El consumo de energía en Madrid Calle 30 es muy alto. Actualmente se tienen:

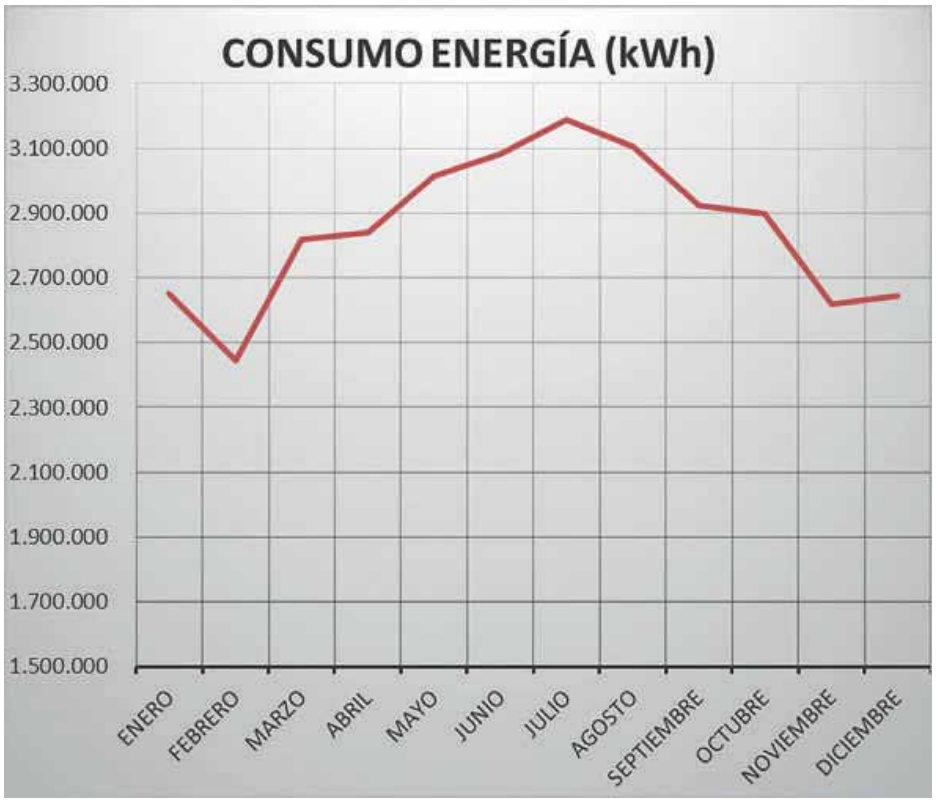
- 64 acometidas en Baja Tensión, para casi uso exclusivo del alumbrado público exterior.
- 14 acometidas en Alta Tensión, que dan suministro a todos los servicios de túnel.

2.3.1. Baja tensión

En las 63 acometidas de baja tensión, tenemos aproximadamente un consumo energético de 6 MWh al año, el cual se distribuye prácticamente en su totalidad a alumbrado exterior. El alumbrado exterior consiste en el alumbrado de calzadas con báculos o columnas, las cuales discurren por el margen de las calzadas y tienen un encendido en horario nocturno, y el alumbrado de pasos inferiores con proyectores en las pareces del mismo, encendido 24 horas.

2.3.1. Alta tensión

En las 14 acometidas de alta tensión que son las que dan servicios al túnel, tenemos aproximadamente un consumo energético de 35 MWh al año, el cual se distribuye de la siguiente manera:



Este modelo de consumo se repite prácticamente todos los años de manera muy similar.

3. VENTILACIÓN DE SERVICIO

La ventilación es uno de los grandes consumidores energéticos. Debido a esto en 2019 con objeto de optimizar el uso, y por consiguiente el consumo energético, de la ventilación de servicio se procede a analizar los arranques de la misma.

Como se ha indicado anteriormente la ventilación de servicio entra en funcionamiento cuando los medidores de contaminantes dan señal de que se superan los niveles marcados de:

- CO.
- NO2.
- Opacidad.

Los valores límite fueron los establecidos con la puesta en marcha de los túneles en 2007. Siendo en la practica el alcance de los valores límite en el NO2 los que normalmente ponen en marcha la ventilación, por lo que es ahí donde centramos el estudio, en los medidores de NO2.

4. MEDIDORES DE NO2.

Debido a que en la puesta en marcha de los túneles la tecnología existente no permitía la medida directa de NO2 se procedió a instalar medidores de NOx y establecer una correlación entre ambas medidas. Esto estaba ampliamente extendido en aquel momento.

2.3 NITROGEN OXIDES NO_X

Nitrogen oxide (NO) and nitrogen dioxide (NO_2) are pollutants resulting from the combustion of fossil fuels. Most of the emitted nitrogen oxides (NO_x) consist of NO, which is oxidised into NO_2 in the presence of oxygen (especially ozone, O_3). NO by itself is not considered a harmful pollutant at commonly encountered levels. On the other hand, NO_2 is noxious and can irritate the lungs and lower the resistance to respiratory infections such as influenza.

While in previous years NO_x from combustion processes contained mostly NO (90 to 95% of the NO_x), the implementation of diesel vehicle exhaust gas after-treatment systems (oxygenation catalyst, DPF, SCR systems) tend to significantly increase the primary emitted NO_2 percentages [17].

In many European road tunnels, NO_2 can be around 20 to 30% of NO_x concentrations, which strongly depends on the share of diesel vehicles with exhaust gas after-treatment systems in the vehicle fleet and on the residence time of the NO_x in the tunnel air. Only in tunnels with very few passenger cars with diesel engines will the NO_2 contribution remain below 10%.

The NO_2 levels in urban areas vary according to the season, temperature and time of day. In areas with intense traffic, one-hour peak levels can exceed short-term air-quality standards. Background levels of NO_x have to be determined carefully if this pollutant is considered in the ventilation design.

Imagen recortada del documento Road Tunnels: Vehicle Emissions and air Demand for Ventilation. PIARC. 2012

5. PLAN DE ACCIÓN

El plan de acción que pusimos en marcha fue el siguiente:

1. Análisis de Equipos. Comprobación del proceso de calibración que está llevando a cabo en mantenimiento y comprobación de las características técnicas de los equipos nuevos instalados.
2. Límites: Comprobación de los limites existentes y cómo funciona el procesamiento de estos valores límites en el sistema.
3. Normativa: Comprobación de la normativa de aplicación.

Una vez que se dio comienzo al plan de acción los apartados de limites y normativa fueron revisados y tenidos en cuenta, pero el estudio se centro mayoritariamente en el análisis de equipos que fue donde se dieron los avances más relevantes.

5.1. Analisis de equipos

En esta fase se establecieron varios focos de estudio:

- Comprobación del lazo de comunicación entre los equipos y el ITS.
- Logica existente en ERUs
- Calibración de equipos.

Estos tres puntos fueron comprobados por empresas especializadas en este campo y los resultados fueron muy positivos, por lo que pasamos a estudiar los equipos en sí.

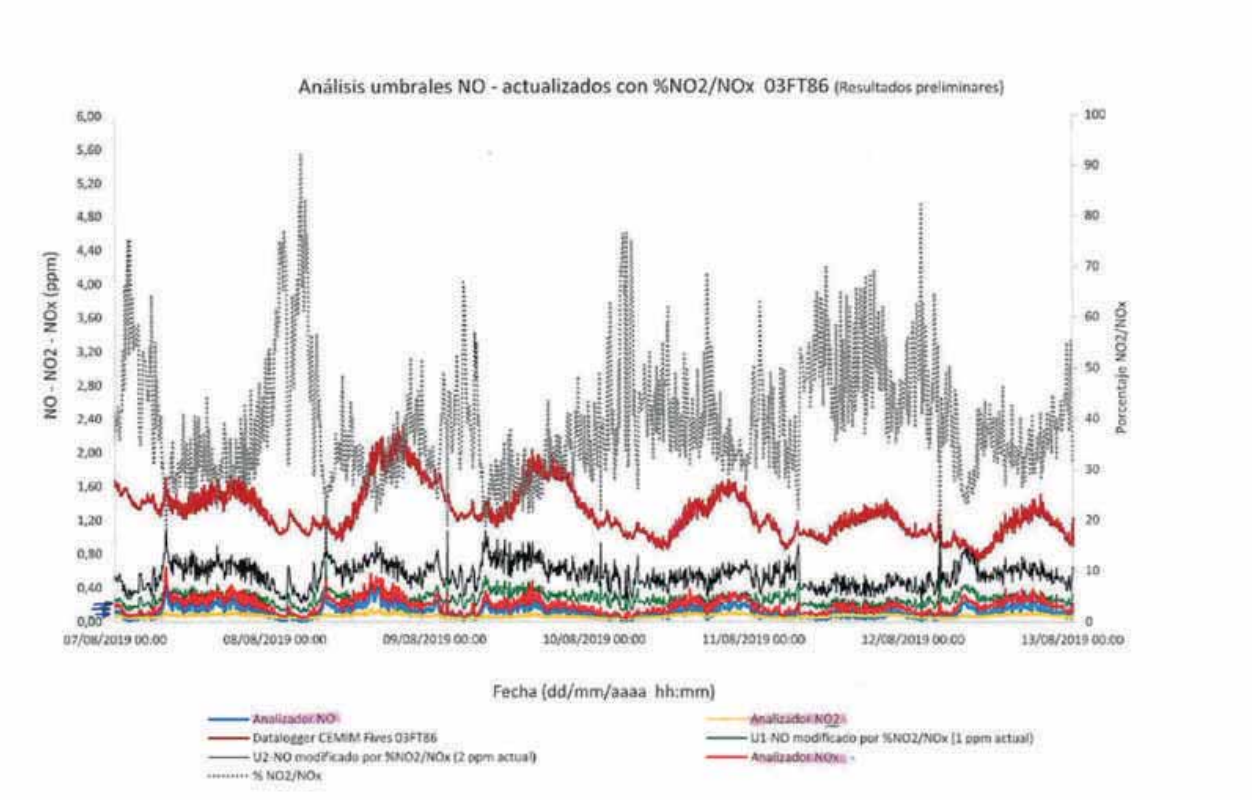
Tenemos en el túnel 68 equipos de medición de NOx con diferentes principios de medición, célula electroquímica y espectroscopia.

Por lo que procedemos a realizar lo que denominamos “Granja de equipos”. Esto consistió en ubicar varios equipos con diferentes principios de medida que median tanto NO2 como NOx.

Nota: No se trata aquí de evaluar el funcionamiento de los equipos existentes, sino la adecuación de los diferentes principios de medida a los túneles de Madrid Calle 30, es por lo que no se indican aquí modelos o fabricantes.

6. CONCLUSIONES

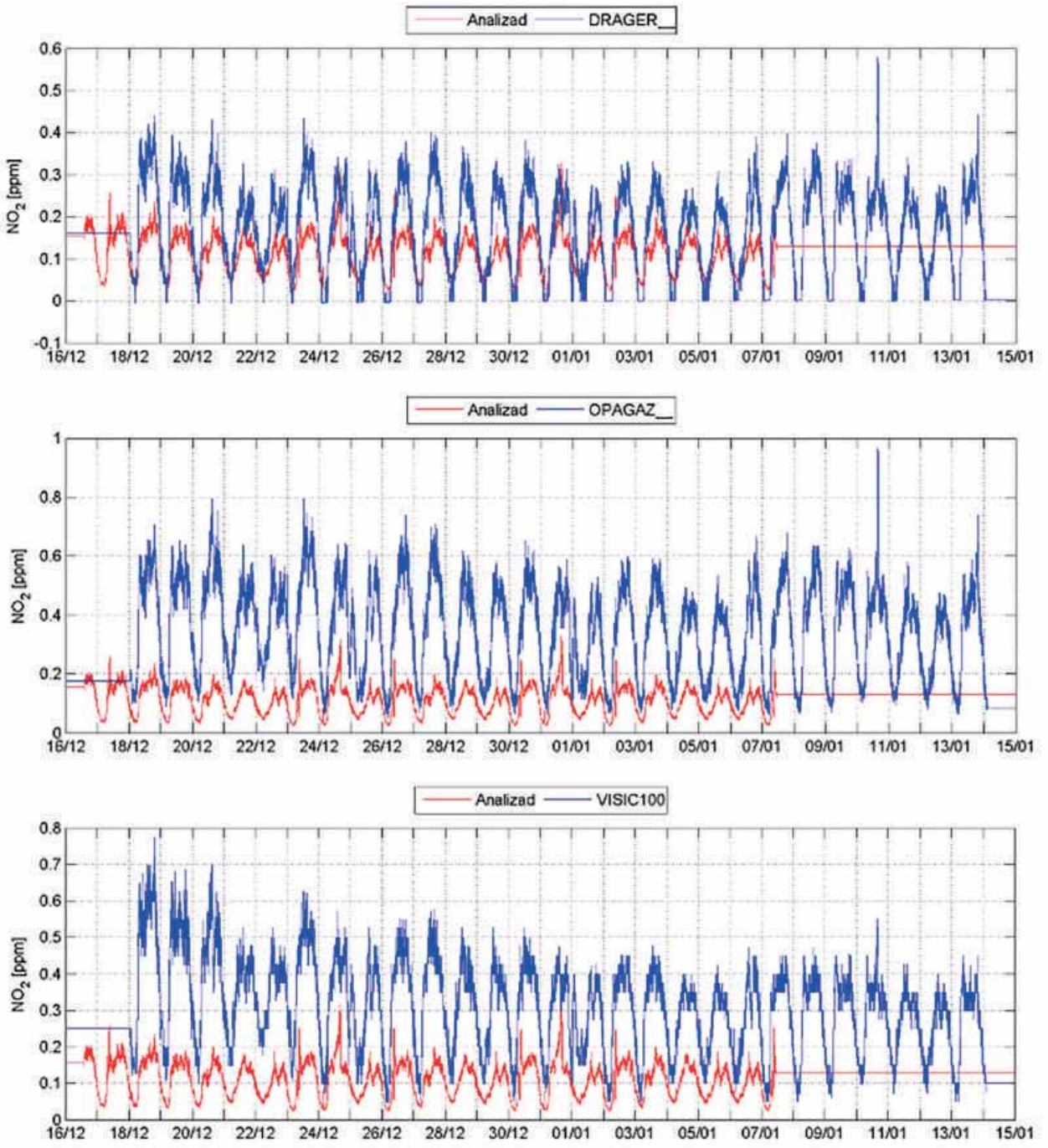
La primera y la más determinante conclusión a la que llegamos es que la relación entre NO2 y NOx no es estable.



La relación entre el NO2/NOx varía entre el 20 - 70%, lo que es un claro indicador de que para conocer los valores de NO2 en el túnel, no podemos recurrir a equipos de medida alternativos en los que midamos NO o NOx, puesto que no hay una relación estable entre estos elementos.

Esto es algo que también se menciona por la PIARC en el documento Road Tunnels: Vehicle Emissions and air Demand for Ventilation. 2019.

La segunda conclusión es que la tecnología de pila electroquímica no parece adecuada para su instalación en los túneles de Madrid Calle 30 para la medición del NO2. Esto es debido a que como resultado en la granja de equipos se ha detectado que hay poca homogeneidad en los resultados de 3 equipos distintos comparados con otro equipo denominado "analizador" el cual tenia un principio de medida diferente.



Si superponemos las graficas de los tres equipos si parecen tener una medida muy parecida pero en rangos distintos.

Con esto concluimos que son equipos totalmente fiables pero no adecuados a los niveles de contaminantes que tenemos en Madrid Calle 30.

7. PLAN DE FUTURO

Una vez se ha llegado a las conclusiones anteriores nos parece imprescindible es establecimiento de un plan de futuro en el que resolver esta situación, a lo que se divide en dos según el plazo en el que se pretende su puesta en marcha.

7.1. Plan a corto plazo

El plan a corto plazo que se puso en marcha en Madrid Calle 30 una vez se alcanzan las conclusiones mostradas anteriormente son las de establecer una regla de equivalencia entre los niveles de NO2 y el número de vehículos en el túnel.

Nos pareció razonable el relacionar el número de vehículos con los nivles de NO2 dentro del tunel puesto que son los elementos contaminantes.

Buscamos además otros factores que afectaran y buscamos una correlación, detectándose la pendiente en la calzada del túnel y la velocidad de circulación como elementos a tener en cuenta.

Se realizaron los ajustes matemáticos necesarios llegándose a encontrar una fórmula que nos permite estimar los niveles de NO2 con los que arrancar la ventilación sanitaria de una forma adecuada.

7.2. Plan a largo plazo

El plan a largo plazo pasa por una renovación completa de los detectores atmosféricos de NO2, pasando por una caracterización del túnel, es decir, la complejidad de los túneles de la M30 hace que sea necesario el detectar los puntos donde la concentración de contaminantes pueda llegar a ser mas alto, debido a la configuración de entradas-salidas, su geometría, la ubicación de los pozos de ventilación etc, por lo que sería oportuno detectar como se comportan dentro con el fin de ubicar los detectores atmosféricos adecuadamente y establecer un plan de arranque de la ventilación sanitaria más adecuado.

COMMISSIONING TESTS IN HEAVILY TRAFFICKED CITY TUNNELS UNDER OPERATION

Johannes Rodler[1], Peter Sturm[2], Gregor Schmoelzer[1], Patrik Foessleitner[1], Michael Bacher[2], Daniel Fruhwirt[2]

[1]FVT mbH, Graz, Austria
[2]Graz University of Technology, Austria

Complex tunnel systems pose a big challenge in controlling ventilation in the case of fire. This is true for both road and rail tunnels. The aim of a ventilation system is to provide air and smoke management as described in the tunnel safety documentation. In order to do so, a software-based control algorithm steers all the required actions of the actuators (fans), based on response information (air velocity).

However, measuring air velocity in tunnel under given boundary conditions is not a simple task. In addition, the interaction between fans and air movement is strongly influenced by the compressibility of air. Hence, the interaction between fans and air movement requires, on the one hand, a very good control mechanism, and on the other hand, correct monitoring of the air velocity (feedback).

This paper deals with tests and the adjustment of the tunnel ventilation control system performed in a time and cost saving way. It also describes an optimized method for on-site calibration of the air speed measurement devices in tunnels as a precondition for the tests. Both approaches were applied in different projects and are presented in detail.

PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA EN TÚNELES URBANOS CON MUCHO TRÁFICO EN FUNCIONAMIENTO

Los sistemas de túneles complejos plantean un gran reto a la hora de controlar la ventilación en caso de incendio. Esto es cierto tanto para los túneles de carretera como para los de ferrocarril. El objetivo de un sistema de ventilación es gestionar el aire y el humo tal y como se describe en la documentación de seguridad del túnel. Para ello, un algoritmo de control basado en software dirige todas las acciones necesarias de los actuadores (ventiladores), basándose en la información de respuesta (velocidad del aire).

Sin embargo, la medición de la velocidad del aire en el túnel en unas condiciones de contorno determinadas no es una tarea sencilla. Además, la interacción entre los ventiladores y el movimiento del aire está fuertemente influenciada por la compresibilidad del aire. Por lo tanto, la interacción entre los ventiladores y el movimiento del aire requiere, por un lado, un mecanismo de control muy bueno y, por otro, una supervisión correcta de la velocidad del aire (retroalimentación).

Este documento trata de las pruebas y el ajuste del sistema de control de la ventilación de los túneles realizado de forma que se ahorra tiempo y costes. También describe un método optimizado para la calibración in situ de los dispositivos de medición de la velocidad del aire en los túneles como condición previa a las pruebas. Ambos enfoques se aplicaron en diferentes proyectos y se presentan en detalle.

ESSAIS DE MISE EN SERVICE DANS DES TUNNELS URBAINS À FORT TRAFIC EN COURS D'EXPLOITATION

Les systèmes complexes de tunnels posent un grand défi pour le contrôle de la ventilation en cas d'incendie. Ceci est vrai pour les tunnels routiers et ferroviaires. L'objectif d'un système de ventilation est d'assurer la gestion de l'air et des fumées, comme décrit dans le dossier de sécurité du tunnel. Pour ce faire, un algorithme de contrôle logiciel dirige toutes les actions nécessaires des actionneurs (ventilateurs), sur la base des informations de réponse (vitesse de l'air).

Cependant, mesurer la vitesse de l'air dans un tunnel dans des conditions limites données n'est pas une tâche simple. En outre, l'interaction entre les ventilateurs et le mouvement de l'air est fortement influencée par la compressibilité de l'air. Par conséquent, l'interaction entre les ventilateurs et le mouvement de l'air nécessite, d'une part, un très bon mécanisme de contrôle et, d'autre part, un suivi correct de la vitesse de l'air (feedback).

Cet article traite des tests et du réglage du système de contrôle de la ventilation des tunnels, réalisés de manière à économiser du temps et de l'argent. Il décrit également une méthode optimisée pour l'étalonnage sur site des dispositifs de mesure de la vitesse de l'air dans les tunnels comme condition préalable aux tests. Les deux approches ont été appliquées dans différents projets et sont présentées en détail.

INTRODUCTION

Up to the nineties of the last century, the aim of ventilation in road tunnels was to ensure health of tunnel users during normal operation. Before the introduction of catalytic converters in passenger cars at the end of the eighties, emissions of hazardous exhaust gases were significant and the dilution of Carbon monoxide (CO) in the tunnel air was a necessity to prevent tunnel users not to collapse because of carbon monoxide poisoning.

Several fire disasters in road tunnels to the new millennium (Mont Blanc tunnel, Tauern tunnel etc.) with numerous victims led to a new EU directive (2004/54/EC) which regulates the minimum safety requirements for road tunnels in the trans-European network (TEN) in order to achieve a uniform safety level in all European countries. The intention of ventilation in road tunnels changed from dilution of hazardous gases during normal operation to ventilation strategies in case of tunnel fires to ensure smoke free escape routes. Emergency ventilation systems in road tunnels nowadays are primarily aimed to prevent tunnel users from possible injury of smoke and flue gas and to enable the escape from the tunnel.

In order to make this possible, it is essential that the engineered design and the subsequent implementation is tested prior the Tunnel will go into operation. In a first step, several tests are carried out to show the accurate function of each essential element (fan, damper, ductwork…) of a ventilation system. This is ensured within the site acceptance tests (SAT). However, much more important are integrated tests of the overall system and the interaction between the fire detection system and the following control algorithm resp. regulation of the ventilation system.

COMPLEX TUNNEL SYSTEMS AND VENTILATION TESTS

Nowadays traffic is becoming an increasing problem in densely populated areas. Moving traffic underground is thus becoming more and more common. The resulting tunnel systems contain various slip roads, exits and interconnected tunnels, and can be very complex in terms of traffic and air management (aerodynamics). According to PIARC, they also present a large challenge in terms of the design, operation and control of ventilation systems. Examples of such tunnels are the West Connex complex in Sydney (up to 36 km subsurface) or the Stockholm Bypass, from which a majority is built underground. Due to their complexity, the engineering and subsequent implementation of ventilation systems have to be tested thoroughly, during both the installation phase, and prior to commissioning.

Ventilation control in general is based on closed loop control systems. In order to make the best use of the limited time during the installation phase in a tunnel, software tools providing a virtual representation of the tunnel are employed in order to predefine the parameter settings of the controller and to check whether the ventilation goals can be met. This allows a virtual function test of the ventilation control algorithm prior to implementation. However, the final and main adjustments and function tests still have to be performed on site.

These tests are in general based on monitoring the air movement inside the tunnel and comparing it to the required ventilation targets in terms of air speed and direction of airflow. While air direction is relatively simple to measure, problems may occur when attempting to monitor air speed. The measured value should represent the average air speed over the tunnel cross section at the location under consideration. As air speed is the triggering parameter during operation of the ventilation system, this value must be correctly measured permanently during tunnel operation. This often poses a problem, as the measurement of the average cross-sectional air speed requires a perfectly positioned measurement device, which is adequately adjusted at the given location. It is important that the sensor imposes no restriction on tunnel operation and that the required information is delivered accurately.

AIR VELOCITY MEASUREMENTS IN TUNNELS

According to VDI/VDE 2640 [1], the standard procedure for air speed measurement in ducts entails a grid measurement with at least 25 measuring points, evenly spaced across the tunnel cross section (e.g. 25-sensor Log-Tchebycheff methodology). There are two problems here. First, such a method is not feasible for a tunnel under operation. Second, installation of such a measurement grid, even during the testing and commissioning phase, simply requires too much time and effort. Thus, for tunnels in operation, two measurement concepts are commonly used.

- High-precision differential pressure measurement (Pitot tubes): This method provides air speed measurement at least at two positions on each side of a tunnel tube beyond the clearance zone.
- Air speed measurement using ultrasonic technique (path-averaged): such measurement devices deliver a path-averaged air speed value. The measurement path commonly is installed at a height of about 5 m and extends from one tunnel wall to the other.

Air speed measurement using ultrasonic technique has already been tested several times in terms of comparability to the VDI/VDE 2640 procedure (e.g.: [2]). Extensive investigations were done in two tunnels with different cross sections (Figure 2). The measurements were performed at the tunnel research centre at Erzberg in Austria (ZaB) in September 2019. The measurement set-up is shown in Figure 1.

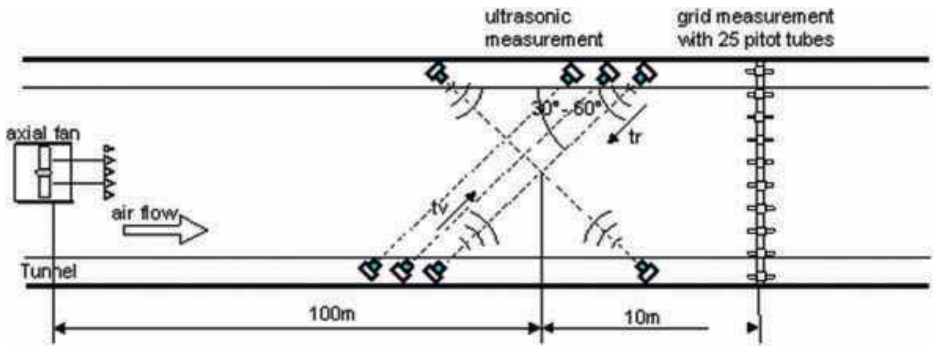


Figure 1: General overview of the measurement set up in ZaB

For standardized method according to VDI/VDE 2640 [1], a measurement grid with 25 pitot tubes (differential pressure measurement), was used. As alternative instrumentation, sensors based on ultrasonic sound measurements were employed. These sensors were installed in different arrangements within the tunnel cross sections (see Figure 1).

The ultrasonic measurement device comprises two sensors transmitting and receiving ultrasonic pulses. The system evaluates the transition time dependent on direction and calculates air speed. Two identical sensors alternately emit or receive ultrasonic pulses. If an airflow is present along the measuring path the transition time is slightly different for both directions. This propagation delay is precisely determined and then transformed into measured values for air velocity, airflow rate, airflow direction and air temperature.

Figure 2: Measurement set-up of the sensor grid in different tunnel cross sections

One considered alternative method used two ultrasonic measurement paths in a crosswise arrangement, one running from the bottom left to the top right and the other running from top left to bottom right (DD). A second method was based on two measurement paths, erected at a height of 1.5 m (MP1.5) and 4.2 m (MP4.2) above road level. The instruments used were DURAG D-FL220T airflow sensors with an uncertainty of +/- 0.2 m/s. A mobile jet fan generated the airflow. Speed control of the fan allowed tunnel air speeds between natural flow and 4 m/s. Air speed was kept constant during the various tests. However, due to external conditions (changing winds) at the portals, there was of course a certain variation of the speed during the individual tests. The measured air speeds were compared and the appropriate statistical analysis was performed. For example, the measurement results for a rectangular cross section is shown in Figure 3.

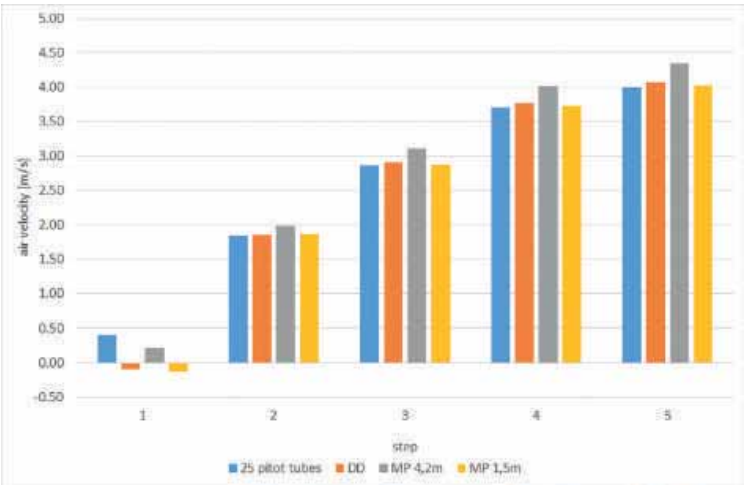


Figure 3: Measurement results for four different measurement arrangements in a rectangular tunnel cross section

Table 1 contains the average velocity and the percentage difference, taking the 25 points measurement as reference.

Table 1: Average velocity [m/s] for the tests and deviation (percentage) from reference value

Reference	DD	4.2m	1.5m	DD	4.2m	1.5m
1.84	1.85	1.99	1.87	100.6%	108.0%	101.5%
2.86	2.90	3.11	2.87	101.5%	108.7%	100.3%
3.70	3.77	4.02	3.72	101.9%	108.6%	100.7%
3.99	4.06	4.34	4.03	101.9%	108.8%	101.0%

It can be seen that the agreement between the reference measurement (pitot tubes) and the DD arrangement and the measurement path at a height of about 1.5 m is very good. The deviations are less than 5%. The values for the measurement path at a height of 4.2 m are some 10% higher than the reference. The investigation thus reveals that the DD arrangement provides the best fit with the VDI/VDE 2640 standard procedure for air velocity measurement in tunnel cross sections.

Due to operational considerations it is not feasible and, in most cases, not possible to install air velocity sensors at locations where they would correctly deliver the required average air velocity over the cross section. The so-called clearance gauge defines the region in a tunnel reserved for the operation of the traffic, i.e. in such regions, fixed installations of sensors are not allowed. This means that sensors are sometimes installed at positions, which are not ideally suitable for detection of the required average air speed. Hence, for all these installations, on-site adjustment (calibration) is required. The following section shows how, under difficult or complex tunnel conditions, such fixed measurement devices may be calibrated.

SYSTEM TEST IN A COMPLEX TUNNEL

System tests in a complex road tunnel is described in the following, taking the city tunnel Kaisermuehlen in Vienna, Austria as an example. The tunnel Kaisermuehlen is a highway tunnel subject to heavy traffic, and is located in the city of Vienna. Traffic amounts to 115'000 vehicles a day on average. Various slip roads to surface roads, as well as integrated collector tunnels, make the tunnel a complicated underground structure with a very complex aerodynamic system (Figure 4). The overall length is 2.2 km and traffic operate unidirectional.

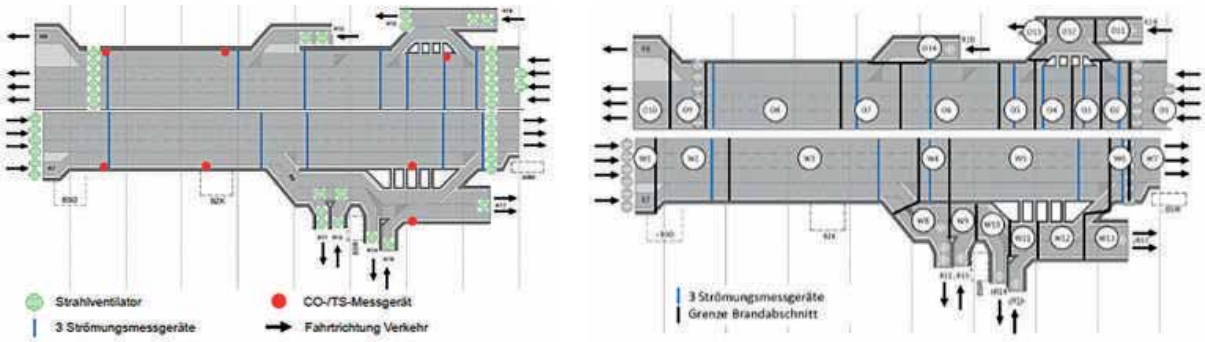


Figure 4: Tunnel Kaisermuehlen - ventilation system (left) and fire detection zones (right)

The tunnel was refurbished with no interruption to traffic, in the years 2015 to 2018. There are 14 jet fans, each of 75 kW and 2025 N thrust, and 6 jet fans, each of 75 kW and 1700 N thrust, installed in the eastbound tube. Air speed is determined at 7 measuring locations and 14 fire detection zones. The westbound lane is divided into 13 fire zones. Here, there are 12 jet fans of 75 kW and 2025 N thrust, and 8 jet fans of 75 kW and 1700 N thrust. Air speed is determined at 5 measuring locations.

To evaluate the installed measurement device for air speed and to test the control algorithm for several fire scenarios, the tunnel tube has to be closed to traffic. This was only possible during night (from 00:00 to 04:00), and only for intervals of some 15 to 20 minutes. Given such conditions, the measurement procedures and principles had to be quite sophisticated.

Reference measurement at the measuring locations

The permanently installed air speed measurement system (ultrasonic path-averaged) is mounted at a height of about 5 m in the tunnel tube so that the passing vehicles do not disturb the ultrasonic beam. At this location, the measured value is definitely not representative of the required cross-section average value. On-site calibration is important in order to derive the correct value for ventilation control. Correction factors are derived from the calibration measurements and then implemented in the data processing algorithm. The numerical adjustment is carried out using a polynomial function with 3 correction factors c0, c1, c2. Thus, the corrected measuring signal at a measuring section 'i' is:

$$ui_{,korr} = c_0 + c_1 \cdot ui + c_2 \cdot sign(ui) \cdot ui_2 \qquad \text{equation 1)}$$

In an ideal case (without correction) the correction factors are $c_0 = 0$, $c_1 = 1$, $c_2 = 0$. For each measurement section, there are two sets of correction factors necessary, one for each flow direction. The corrected signal of the airflow measurement is then used for control of the tunnel ventilation.

The circumstances did not allow grid measurements to be made in accordance with VDI [1]. Hence, as an alternative method, a reference measurement based on the same measurement principle (ultrasonic) was used. The appropriateness of this parallel measurement was verified by the tests as described above (see Table 1).

Figure 5: Installation of reference measurement under traffic in main tube and in a closed exit

In order to perform multiple calibration measurements within the same tunnel closure time, measurement devices were mounted simultaneously at four different locations. The existing jet fans were used to produce different airflows in both directions. The correction factors c0, c1, c2, were then derived and implemented from the data analysis. The results after correcting for one measuring section are shown in Figure 6. The measured raw data of the installed sensor are depicted in red, and those of the reference sensor are depicted in green, before (left) and after (right) adjustment.

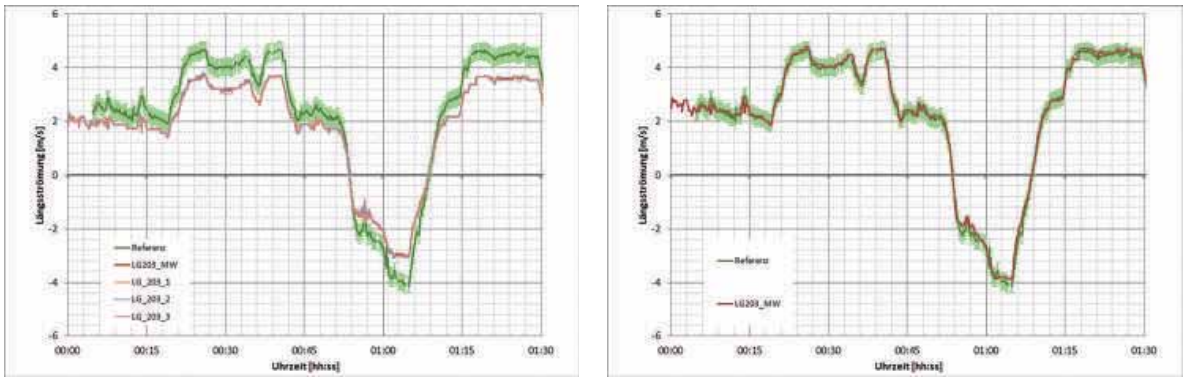


Figure 6: Result of a reference measurement before (left) and after (right) adjustment

Achievement of the ventilation goals for incident mode

In general, ventilation control in the case of a fire normally requires the achievement of a certain air velocity upstream of the fire and the expulsion of the smoke via the nearest possible location [3], [4]. The exact requirements are defined in the system specifications for the tunnel.

For each fire zone, a predefined scenario is described on how to control ventilation. The scenario contains a priority table with respect to fan activation and air speed sensor selection, as well as a description of the parameters of the software controller. Sometimes even two control cycles in the same tube are active at the same time. To derive the correct parametrization of the control algorithm, a tunnel ventilation simulator (a software model of the tunnel including the ventilation system, e.g. [6]) was used in advance and the calculated parameters for the PI controller were then tested and adjusted within the commissioning phase in several steps (using an iterative process) [7].

Within the first step, the fire zones were analysed with regard to their equivalence of control strategies and jet fan switching sequence. Table 2 shows the control strategies for the eastbound tube. The jet fans to be activated and the target speeds at the specified measuring sensor (LGXX) are stated for each fire zone (O1 to O14).

Table 2: Table of parameters for eastbound tube (tube Kaisermuehlen)

				Strahlventilatoren																				Regler 1			Ersatz 1		
Betriebsrichtung (positiv in Fahrtrichtung)				+	+	+	+	+	+	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-						
Brandabschnitt	Querschnitt Brandort A+ [m²]	Regelziel Brandort v_{Soll}	Verkehr	SV101-1	SV101-2	SV101-3	SV101-4	SV101-5	SV101-6	SV102-1	SV102-2	SV102-3	SV102-4	SV102-5	SV102-6	SV131-1	SV132-1	SV133-1	SV141-1	SV142-1	SV143-1	SV144-1	SV145-1	Messgerät	Querschnitte Messgerät A $_{Vol}$* [m²]	Sollwert Regler v $_{Regler\ 1}$ [m/s]	Messgerät	Querschnitte Messgerät A $_{Vol}$* [m²]	Sollwert Regler v $_{Regler\ 1}$ [m/s]
W1	115.3	1.75	RV flüssig	x	x	x	x	x	x	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-3	R1-2	0	R1-5	0	0	R1-4	0	LG102	88.6	2.38	LG101	88.6	2.38
W2	88.6	1.75	RV flüssig	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	x	-55	-71	50	50	55	-55	71	LG102	88.6	1.75	LG101	88.6	1.75
W3	88.6	1.75	RV flüssig	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	x	-55	-71	50	50	55	-55	71	LG101	88.6	1.75	LG102	88.6	1.75
W4	75.7	1.75	RV flüssig	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	0	0	0	-39	-39	55	-55	55	LG104	75.7	1.75	LG103	75.7	1.75
W5	75.7	1.75	RV flüssig	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	0	0	0	-39	-39	55	-55	55	LG103	75.7	1.75	LG104	75.7	1.75
W6	87.6	1.75	RV flüssig	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-2	R1-2	R1-2	R1-2	R1-2	R1-2	-100	0	-100	0	0	0	-80	80	LG104	75.7	1.50	LG103	75.7	1.50
W7	87.6	1.75	RV flüssig	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	x	x	x	x	x	x	-100	0	-70	0	0	0	-80	80	LG104	75.7	1.50	LG103	75.7	1.50
W8	67.6	1.75	RV flüssig	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	x	-89	0	x	x	0	0	0	LG102	88.6	0.75	LG101	88.6	0.75
W9	58.1/90.5	-1.75	RV flüssig	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	x	x	-89	-63	-63	x	-89	89	LG102	88.6	0.90	LG101	88.6	0.90
W10	58.1/90.5	1.75	RV flüssig	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	55	55	-89	-63	-63	89	x	71	LG101	88.6	0.85	LG101	88.6	0.85
W11	90.5	-1.75	RV flüssig	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	71	71	-71	-63	-63	89	0	x	LG102	88.6	0.85	LG101	88.6	0.85
W12	43.8	1.75	RV flüssig	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	75	75	x	-63	-63	75	-75	75	LG104	75.7	0.85	LG103	75.7	0.85
W13	43.3	1.75	RV flüssig	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R1-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	R2-1	75	75	x	-63	-63	75	-75	75	LG104	75.7	0.85	LG103	75.7	0.85

The control algorithm for the fire mode was started manually for each fire detection zone and the characteristics of the controller and the achieved results in terms of air speed were recorded. The step response was determined based on measurement of the air speed in the tunnel tube. This is shown in Figure 7. The gain factor Kp and the integral time Tn of the PID controller were derived from the measured parameters Tu and Tg.

After having determined the required parameters for the controllers, the control performance was tested. Figure 8 shows the ventilation scenario for fire zone O5 in the tube to Kaisermuehlen. It can be seen, that two PID controllers (R1 and R2) are used. The control parameter is given by the signal of the air speed measurement device nr.1. A second one (nr.2) is used for redundancy purposes only.

The performance of the controller can be seen as positive if the target air speed is reached within the given time limits and the correct fans and sensors were used. The necessity of having two controllers (R1 and R2) running at the same time in the same tube made the overall adjustment of the system quite complicated.

In this particular case, different target speeds are required, one for the direction towards the fire and another one on the downstream side. Figure 9 shows the result of the simulation (on the left) and the performance of the control algorithm in real life (on the right). It can be seen that the use of the control parameters allows for suitable achievement of the ventilation goal.

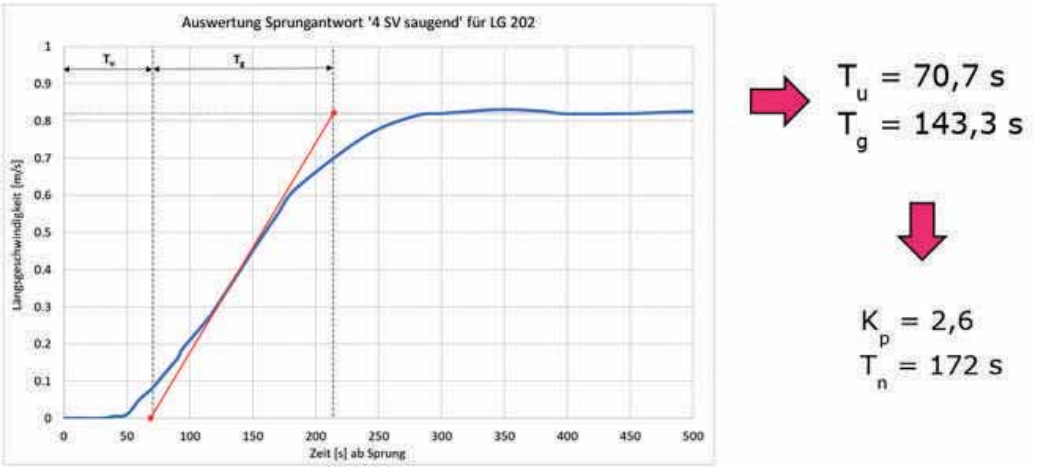


Figure 7: Determination of the step response and derivation of Kp and Tn

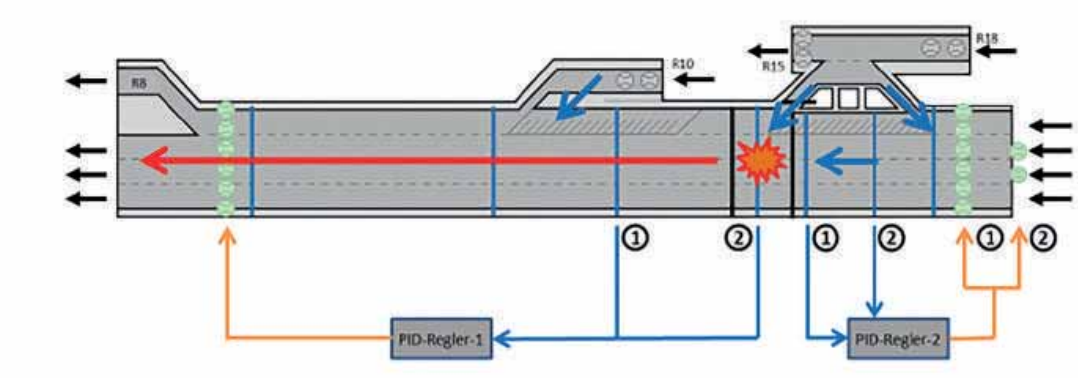


Figure 8: Fire scenario in O5 in the eastbound tube (tunnel Kaisermuehlen)

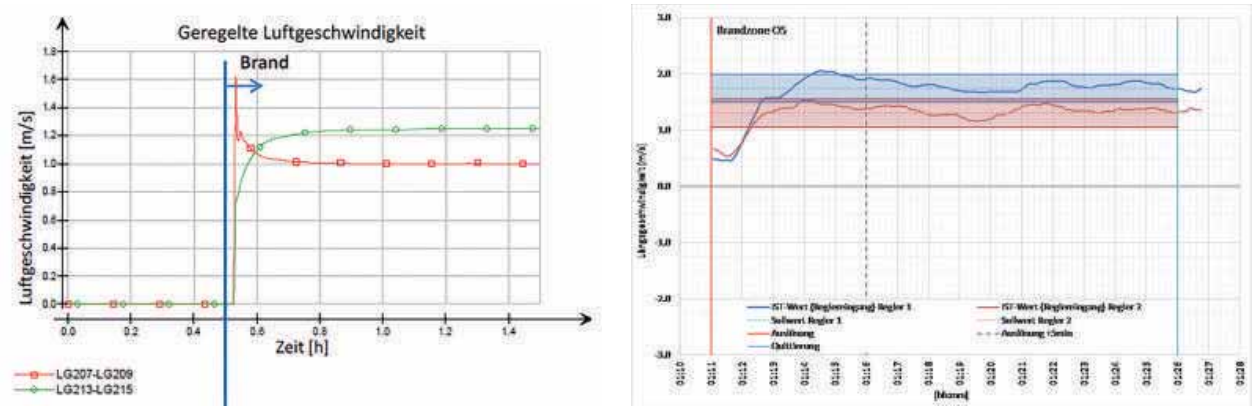


Figure 9: Simulation of ventilation control and test of the control performance in fire zone O5

DISCUSSION AND CONCLUSION

It is common practice to define ventilation targets for incidents in tunnels. While it is comparatively easy to fulfil these targets in simple tunnels, this is not the case for complex subsurface structures with multiple portals. The application of software-based closed loop control mechanisms is state of the art in achieving such goals. However, complex tunnels require complex control strategies.

Hence, it is of the utmost importance not only to correctly define the input parameters for the controller but also to gain accurate measurements of the air velocities inside the tunnel. Although software tools allow for a simulation of the airflow in the tunnel based on predefined scenarios the real behaviour of the air in the tunnel and the interactions between fans, air movement and air velocity must ultimately be determined on-site. This not only requires time for sufficient testing during system implementation, it also requires recurrent systems tests as soon as a tunnel is in operation.

The examples discussed above deal with the problems arising when testing/commissioning complex tunnel systems. Simultaneous measurements of air velocity have to be performed within the tunnel system in order to get a clear picture of the aerodynamic behaviour within the tunnel system. In order to adjust the ventilation control algorithm an iterative process of testing, adjusting the control parameters and re-testing is required. These tests must cover all possible fire scenarios throughout the tunnel.

As the signal of airflow measurement is the decisive parameter for ventilation control and correct operation, the accurate measurement of this parameter has to be granted. The standardized method for achieving the required value – an averaged value over the cross section – cannot be implemented in tunnels under operation. Hence, an on-site calibration of the installed measurement equipment is required. The experiments presented in this paper demonstrate, that methods alternative to the VDI/VDE procedures (multiple point grid measurements) are capable to deliver the same results at acceptable accuracy with less effort in time and equipment.

REFERENCES

[1] VDI Guideline, VDI/VDE 2640 – „Netzmessungen in Strömungsquerschnitten“, Düsseldorf 1991

[2] Schmölzer, G., “Lüftungsanlagen und deren Regelung-Messungen und Untersuchungen für eine erfolgreiche Inbetriebnahme”, Dissertation, TU Graz, Graz, 2016

[3] RVS 09.02.31, Tunnel, Tunnel Equipment, Ventilation Systems, Basic Principles, Issue June 2014; Österreichische Forschungsgesellschaft Schiene Straße Verkehr

[4] PIARC; Road tunnels: Operational strategies for emergency ventilation, report no. 2011R02

[5] PIARC; Road tunnels: Complex underground road networks, Report no. 2016R19EN

[6] Brandt R., Elertson L., Commissioning of the ventilation control of the E4 Stockholm Bypass, 8th International Conference ‘Tunnel Safety and Ventilation’ 2016, Graz, pp 315 - 322, ISBN: 978-3-85125-464-8

[7] Schmölzer G., Sturm P., Zettl D., Koppensteiner A., Wierer A.: Ventilation control in the case of a fire, a practical approach to the implementation of PI controllers, 8th International Conference ‘Tunnel Safety and Ventilation’ 2016, Graz, pp 220 - 229, ISBN: 978-3-85125-464-8

APLICACIONES DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN TUNELES. CASO PRACTICO DE VENTILACIÓN

Ernesto Sánchez Larios
Jefe de Energía del Transporte. SENER Ingeniería y Sistemas

Guillem Peris Sayol
Director de Proyecto RESPIRA®. SENER Ingeniería y Sistemas

En los últimos años la evolución de las nuevas tecnologías, el aumento de la capacidad computacional y la reducción de costes de inversión asociados a estas está permitiendo cada vez más la utilización de algoritmos de inteligencia artificial (IA) que permiten procesar y extraer información valiosa a partir de los datos.

La presente comunicación presentará los sistemas (principalmente sistemas ITS y ventilación) donde se están desarrollando aplicaciones de IA y donde ya existen o incluso ya están funcionando en los últimos años. Además de los sistemas, también se indicarán otras aplicaciones con aspectos relacionados con la inspección, la gestión del túnel y emergencias donde las aplicaciones de IA proporcionan un apoyo a la toma de decisiones.

Adicionalmente, desde el punto de vista del sistema de ventilación, se presentará dos casos de aplicación donde a partir de los datos existentes en la infraestructura y la aplicación de algoritmos de inteligencia artificial, se correlaciona y predice el comportamiento fluidodinámico en función de las condiciones meteorológicas. Como resultado permite optimizar el funcionamiento de los ventiladores y garantizar las condiciones ambientales optimas. Esta aplicación de Inteligencia Artificial se ha aplicado en la red de túneles de Metro y túnel carretero.

APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN TUNNELS. VENTILATION CASE STUDY

In recent years, the evolution of new technologies, the increase in computational capacity and the reduction of investment costs associated with these, is increasingly allowing the use of artificial intelligence (AI) algorithms that allow processing and extracting valuable information. from the data.

This communication will present the systems (mainly ITS and ventilation systems) where AI applications are being developed and where they already exist or have even been operating in recent years. In addition to the systems, other applications will also be indicated with aspects related to inspection, tunnel management and emergencies where AI applications provide decision-making support.

Additionally, from the point of view of the ventilation system, two application cases will be presented where, based on the existing data in the infrastructure and the application of artificial intelligence algorithms, the fluid dynamic behavior is correlated and predicted based on the meteorological conditions. As a result, it allows to optimize the operation of the fans and guarantee optimal environmental conditions. This Artificial Intelligence application has been applied to the Metro tunnel network and road tunnel.

APPLICATIONS DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS LES TUNNELS. ÉTUDE DE CAS SUR LA VENTILATION

Au cours des dernières années, l'évolution des nouvelles technologies accompagnée d'une augmentation de la capacité de calcul et de la réduction des coûts d'investissement permettent de plus en plus l'utilisation d'algorithmes d'intelligence artificielle (IA) qui rendent accessible l'extraction d'information à partir du traitement de données.

La présente communication dévoilera les systèmes (principalement ITS et systèmes de ventilation) pour lesquels les applications d'IA sont en cours de développement, mais également ceux qui existent déjà et qui sont d'ailleurs rentrés en fonctionnement récemment. Au-delà des systèmes, d'autres applications seront également détaillées en focalisant à la fois sur les inspections des états des lieux, ainsi que sur la gestion des tunnels et leurs urgences : les applications d'IA fournissent une aide primordiale à la prise de décision basée sur des données.

De plus, du point de vue du système de ventilation, deux cas d'application seront présentés pour lesquels, sur la base des données existantes dans l'infrastructure et de l'application d'algorithmes d'IA, le comportement dynamique des fluides est corrélé et prédit en fonction des conditions météorologiques. Ainsi, l'optimisation du fonctionnement des ventilateurs et la garantie de conditions environnementales optimales sont obtenues. Cette application d'IA a été appliquée à différents réseaux de tunnels de métro et routiers.

1. INTRODUCCIÓN

Como primer punto de la comunicación "Aplicaciones de inteligencia artificial en túneles" es necesario una breve introducción a:

- Conceptos básicos de inteligencia artificial.
- Conceptos básicos de sistemas en los túneles.

En ambos casos, la comunicación pretende que la introducción permita al lector disponer de información de un modo sencillo.

1.1. Inteligencia Artificial

La inteligencia Artificial (IA) es un término que cada vez forma más parte de nuestro día a día, pero dado el amplio campo que aglutina, la rapidez con la que evoluciona y se extiende en nuestro lenguaje cotidiano, no siempre somos capaces de definirlo de un modo sencillo.

De un modo académico podemos definirlo como "la capacidad de las máquinas para usar algoritmos, aprender de los datos y utilizar lo aprendido en la toma de decisiones tal y como lo haría un ser humano" o como indica el autor Lasse Rouhiainen: "la habilidad de los ordenadores para hacer actividades que normalmente requieren inteligencia humana" [1]

En consecuencia, las maquinas necesitan ser dotadas de algoritmos que permitan "parecerse" a los humanos, y poder aprender y tomar decisiones más o menos complejas. Para todo ello, es necesario que la maquina disponga de gran volumen de datos.

En términos generales, las aplicaciones de IA que están siendo desarrolladas pertenecen a los siguientes campos:

- Reconocimiento de imágenes estáticas;
- Mejoras del desempeño de la estrategia logarítmica comercial;
- Procesamiento eficiente y escalable de datos de pacientes;
- Mantenimiento predictivo;
- Detección y clasificación de objetos;
- Distribución de contenido en las redes sociales;
- Protección contra amenazas de ciberseguridad;

Un aspecto importante de la IA es el aprendizaje automático o machine learning, que permite a las maquinas/sistemas informáticos aprender sin estar programados para esta función. Para realizar este aprendizaje son necesarios algoritmos que usan patrones de datos para el aprendizaje y posterior toma de decisiones.

Machine Learning puede ser divido en tres (3) tipos de aprendizaje:

- Supervisado. Para aprendizaje utilizan algoritmos que usan datos que han sido previamente clasificados de algún modo o disponen información para categorizarlos. Este tipo es supervisado porque los humanos han de proporcionar feedback y así corregir/depurar el algoritmo.
- No supervisado. A diferencia del aprendizaje supervisado, el aprendizaje no supervisado utiliza bases de datos que no requieren una categorización previa y no requieren ser clasificados de ningún modo. En este tipo, el algoritmo debe ser capaz de realizar la tarea sin la intervención humana.

- De refuerzo. Por último, este tipo de aprendizaje lo hace reaccionando a su entorno, es decir, aprende de la experiencia y por tanto es necesario un refuerzo positivo mediante una función objetivo para que el algoritmo conozca que aspectos son los "bien hechos".

Deep Learning o Aprendizaje Profundo es una de las aplicaciones de IA que actualmente se está utilizando en reconocimiento de voz, visión artificial y la identificación de vehículos para sistemas de asistencia al conductor. Este aprendizaje automático resuelve problemas muy complejos que suelen tener grandes volúmenes de datos, para ello utiliza redes neuronales que organizan en capas para reconocer relaciones y patrones complejos de datos.

Para finalizar la introducción a la IA es importante recordar, que los datos y la calidad son un elemento clave en la IA. La disponibilidad y el acceso a los datos en los últimos años se está produciendo de un modo exponencial, si bien una gran parte de ellos pueden estar en manos de empresas tecnológicas (en función de la aplicación, ya que como veremos para los túneles estos datos vendrán de nuestra infraestructura). El análisis de datos se puede realizar sobre dos (2) tipos:

- Datos estructurados; son aquellos datos que requieren una introducción de información como puede ser: valores numéricos, fechas, monedas, direcciones….
- Datos no estructurados; son aquellos tienen imágenes, videos o textos sin catalogar.

"Históricamente", los datos estructurados han sido los más utilizados y los que han requerido capacidades tecnológicas no tan importantes. El avance de los procesadores está permitiendo que lo datos no estructurados puedan ser procesados de un modo más rápido y así poder proporcionar recomendaciones y predicciones.

Figura 1. Datos estructurados y no estructurados

Si pensamos el gran volumen de imágenes que tenemos en nuestros móviles y como, la sociedad/redes sociales cada vez hacen más uso de imágenes y videos podemos pensar en la importancia que tiene el procesar estos datos no estructurados y la vertiginosa evolución que puede llegar a tener.

1.2 .Sistemas en túneles

El desarrollo de la tecnología en el siglo XXI junto con la aprobación de normativas más exigentes desde el punto de vista de la seguridad ha hecho que los sistemas que contienen los túneles estén cobrando un papel muy destacado.

Con ello se introducen conceptos que es necesario recordar:

- Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS = Intelligent Transportation System) que puede ser definido como: "aplicaciones avanzadas que, sin incluir la inteligencia como tal, proporcionan nuevas aplicaciones y servicios para la gestión del transporte" de acuerdo con la Directiva 2010/40/UE.

  También podemos definir según la Sociedad Americana de Transporte Inteligente [3] (conocida en inglés como ITS América), donde se define como "gente usando tecnología en transportes para salvar vidas, tiempo y dinero".

- Smart Tunnel [2], este concepto está íntimamente ligado a los sistemas inteligentes de transporte que permiten realizar el control y operación del túnel de una manera más segura e informar a los usuarios de un modo más eficaz. Se considera "Smart tunnel" cuando se cumple con los siguientes requisitos:

  - Interoperabilidad, debe poder ser operable en remoto y debe ser compatible con la gestión desde diversos centros de control.

  - Dispone de equipamiento ITS.

  - Normativa, debe cumplir con la normativa en vigor, que en España se trata del RD 635/2006 y la Directiva Europea 2004/53/CE.

Los nuevos sistemas en los túneles junto con la modernización de los actuales permiten conocer el estado de estos en tiempo real y en consecuencia disponer de datos que pueden ser analizados y almacenados. Gracias a esto, nos permite conocer las incidencias de manera inmediata y actuar de una forma más eficaz ante las emergencias. Por otro lado, toda esta información nos permite tener un gran volumen de datos que podemos analizar o usar a través de aplicaciones de inteligencia artificial.

A continuación, se hace una breve descripción de los principales sistemas:

- Sistema de energía y alumbrado. Proporciona y distribuye la energía a los sistemas del túnel. En función del tipo de sistema, la energía será proporcionada de una fuente más o menos segura. Como parte de ellos, está el sistema de iluminación que debe proporcionar las condiciones óptimas de visibilidad en el interior del túnel.

- Sistema de protección contra incendios, donde se distinguen:

  - Sistema de control y extinción de fuego. Se trata de un sistema que proporciona el agente extintor que permite controlar y extinguir el incendio. Generalmente es el agua el principal agente extintor, aunque puede combinarse con otros agentes como puede ser la espuma o gases.

  - Sistema de detección de incendios. Es el sistema que proporciona las alarmas cuando detecta un incendio.

- Sistema de ventilación. Es el encargado de mantener la calidad del aire en el interior del túnel con unas condiciones mínimas de salubridad y evitar la acumulación de sustancias toxicas. En caso de incendio, debe ser capaz de controlar el humo y proporcionar unas condiciones mínimas para conseguir evacuar a los usuarios y mejorar la intervención de los Bomberos.

- Sistema de seguridad, vigilancia y control

  - Sistema de circuito cerrado de televisión. Es uno de los sistemas más importantes en un túnel ya que son los "ojos" del centro de control. El sistema está formado por una serie de cámaras cuyo objetivo es: monitorizar el tráfico, las condiciones atmosféricas, apoyo a los operadores en las labores de explotación y servir de apoyo en la gestión de incidentes.

  - Sistema de control de Galibo. Su función es evitar el acceso al túnel de vehículos que sobrepasen una determinada altura, para ello detecta e impide/desvía los vehículos en los accesos al túnel.

- Sistema de detección automática de incidencias (DAI). Es un sistema generalmente basado en video que utiliza algoritmos que analizan datos de tráfico para detectar incidencias y alteraciones del tráfico en el momento en el que ocurre y tienen como finalidad garantizar la seguridad vial.
- Sistema de señalización dinámica. Permite a los operadores del centro de control informar a los conductores sobre el estado del túnel, de las situaciones de riesgo, y las medidas de protección a adoptar. La señalización se realiza por medio de paneles de mensaje variable, señales ocultas de aviso, paneles de control y señalización dinámica de carril.
- Gestión y control de tráfico. Es un sistema para ayudar a la gestión del tráfico, que se basa en la adquisición de datos de tráfico a partir de las estaciones de toma de datos (ETD), los detectores electromagnéticos y las espiras.
- Sistema de postes SOS. Se trata de un sistema para la comunicación de incidencias entre los usuarios y el puesto de control.
- Sistema de radio. Es un sistema de comunicaciones que permite la transmisión de la señal de radio en el túnel. La comunicación puede ser entre los servicios de operación del túnel como servicios de emergencia. El sistema también está ligado con el sistema de megafonía, ya que los mensajes de radio pueden ser difundidos a través de los altavoces.
- Sistema de megafonía. Su función es la de transmitir los mensajes del operador situado en el centro control a los conductores de los vehículos del túnel y/o operarios de mantenimiento.
- Sistema de control de accesos, es la herramienta que el operador tiene en los accesos de túnel para impedir el acceso. Generalmente se hace mediante barreras que se apoyan en avisadores acústicos y semáforos.
- Sistema PLCs/ERUs. Los PLC's (Programmable Logic Controller) y/o ERUs (Estaciones Remotas Universales) son equipos electrónicos que proporcionan control y monitorización de los sistemas que requieren la adquisición o envío de datos mediante señales digitales o analógicas al Centro de Control. Los principales equipos que controlan son: señalización variable, control gálibos, control de subestaciones eléctricas, adquisición de señales de calidad de aire, elementos de detección de incendios, generadores de emergencia y SAI, sistemas de bombas, sistemas de extinción de incendios entre otros.
- Sistema lectura de matrículas/mercancías peligrosas. El sistema permite la identificación de los vehículos susceptibles de entran en el túnel mediante la lectura de matrícula y su almacenamiento y comparación con datos disponibles en la BBDD. El sistema también permite establecer protocolos adaptados a la mercancía que lleve el vehículo en especial las mercancías peligrosas. Otra función del sistema es conocer el tiempo que el vehículo ha estado en el túnel.
- Sistema de meteorológico. Se trata de un sistema de adquisición de datos atmosféricos que son utilizados por otros sistemas o directamente por el operador para ayudar a tomar decisiones en la gestión del túnel. Los principales datos son: condiciones del aire, precipitaciones, viento, condiciones de suelo y radiación.
- Sistema de control de inundaciones. Se aplica (en términos generales) a túneles urbanos donde el agua puede acceder al interior del túnel por las rampas. El sistema permite al operador conocer el estado del sistema de bombeo y en consecuencia el operador tiene suficiente información para permitir la circulación por el túnel.
- Sistema de control ambiental (calidad aire). Para finalizar, la adquisición de datos ambientales se realiza a través de sensores de CO, NO2 y opacímetros, junto con anemómetros para medir la velocidad y dirección del aire tanto en las bocas del túnel como en el interior. Estos datos son analizados y el resultado puede provocar acciones sobre el sistema de ventilación (p.e. actuación de la ventilación sanitaria cuando la calidad del aire no esté en rango recomendado).

Además de los sistemas propios del túnel, está creciendo con fuerza nuevos actores que utilizarán los túneles de una forma inteligente. Se trata del vehículo autónomo que abre una ventana muy importante de interacción entre la infraestructura, en este caso el túnel, y el vehículo/humano. Este punto se comentará con más detalle en el apartado de futuras aplicaciones.

2. APLICACIONES DE IA EN TÚNELES

2.1. Aplicaciones de IA en sistemas

Como hemos comentado anteriormente, las aplicaciones de IA necesitan datos y los sistemas que tenemos en el túnel son una fuente que pueden proporcionarlos. A continuación, se relacionan los principales grupos de aplicaciones.

2.1.1. Aplicaciones relacionadas con la energía y la iluminación

El consumo energético de los túneles en condiciones "normales" de explotación, la reducción de la huella de carbono y los altos costes de la electricidad, siendo este un valor importante en la cuenta de explotación, obliga a que se planteen métodos para su optimización.

Para poder abordar esta optimación tenemos un (1) primer aspecto que es el uso de equipos más eficientes. Un ejemplo es el uso en la iluminación de luminarias con lámparas de tipo led, aspecto que está muy extendido en nuestros túneles.

Pero se puede avanzar un paso más en la optimización, podemos pensar en dos (2) grandes bloques:

- Reducción de consumidores recurrentes (consumos que más o menos suelen tener unas ciertas horas más o menos constantes en el tiempo) como puede ser la iluminación del túnel y la ventilación (tratado en puntos posteriores y en ejemplo de caso práctico).
- Factura de energía

En el primer bloque destaca automatización de los procesos de encendido y apagado de la iluminación o también llamado Sistema Inteligente de Control de Iluminación de Túnel (TLACS: Tunnel Lighting Addressable Control System) que puede controlar luminarias individualmente permitiendo a los operadores:

- Ajustar el nivel de luz para reducir el "efecto de agujero negro" en las entradas del túnel.
- Monitorizar la edad y condición de cada luminaria para establecer un programa de mantenimiento predictivo.
- Crear varios niveles de iluminación, así como controlar y supervisar el estado y consumo de las luminarias.

Este tipo de sistemas automáticos disponen de un importante volumen de datos de: consumos por luminaria y grupo de luminarias, horas de funcionamiento, frecuencias de encendido/apagado, datos meteorológicos en las entradas del túnel, nivel de congestión del túnel y en consecuencia la velocidad en interior del túnel, mediciones de luminancia en el interior y exterior del túnel.

Con este volumen de datos en tiempo real, los algoritmos de IA permiten el ahorro energético como consecuencia de la reducción del exceso la iluminación con la actuación sobre:

- Iluminación por etapas. Generalmente se dispone de circuitos para el alumbrado: nocturno, crepuscular, nublado, soleado. Ya solo el ajuste en tiempo real en función de los datos comentados anteriormente supone un ahorro de consumo eléctrico y en la vida de las luminarias.
- Iluminación adaptada al mantenimiento de las luminarias. Los cálculos lumínicos de una instalación se realizan considerando que el rendimiento lumínico se ha depreciado a lo largo de la vida útil del

equipo y además un segundo factor de limpieza de la luminaria. De modo que durante un periodo que es difícil de cuantificar podemos estar dando un nivel lumínico por encima del requerido. Ajustar el funcionamiento de la iluminación a las condiciones reales de la luminaria nos permite obtener un ahorro.

- Iluminación adaptada a la velocidad real de los vehículos. En algunos casos congestión, la velocidad de los vehículos se reduce sustancialmente, por ello es posible adaptar la iluminación en tiempo real ya que no es necesario disponer de un nivel lumínico para la velocidad máxima del vial.

Algunos fabricantes indican que la aplicación de estos sistemas proporciona un ahorro energético mínimo de 25%.

El segundo bloque, es el ahorro en la factura de la electricidad. Sin entrar en detalles ya que puede depender de la compañía eléctrica comercializadora, nivel de tensión (BT, MT,AT) a la que se contrata la electricidad y/o las particularidades regulatorias de cada país, en términos generales se puede indicar que la factura tiene un término fijo (acceso a la red) y un término variable (consumo).

El coste de la electricidad del término variable depende en que franja se produzca el consumo. Con los datos adecuados podemos saber en qué franjas tenemos los consumos y actuar del siguiente modo:

- Analizar el tipo de contrato que más se ajuste a los periodos de consumo de nuestro túnel.
- Conociendo las tareas de explotación y el mantenimiento se pueden programar tareas en las horas (periodos) donde la electricidad tenga un coste más reducido.
- Dado que nuestra instalación puede tener grupos electrógenos de emergencia (accionados por gas o Diesel), esta fuente complementaria puede apoyar en aquellos casos donde el consumo en el periodo de tarificación sea más caro. Este punto puede llegar a ser discutible, pero dependerá del análisis coste combustible vs coste electricidad. Sin embargo, este análisis complejo puede ser un campo donde IA puede proporcionar unas recomendaciones al operador del túnel.

Un ejemplo de estrategia que nos puede proponer un algoritmos de IA son los periodos en que hay conectar los ventiladores, si pensamos que por salubridad suelen conectarse a las 10:00h pero esa franja tiene un coste elevado, ¿Por qué no puedo conectarlos a las 9:00 si el resultado final es el mismo y el coste de la electricidad es más barato?. Este tipo de apoyo a la explotación puede ser un punto para desarrollar en los túneles.

El coste del término fijo o de acceso a la potencia contratada para el túnel también puede llegar a ser optimizada por medio de ajustar la potencia contratada. Disponer de datos históricos analizados y datos en tiempo real pueden hacer que los algoritmos de IA nos permitan contratar el termino más adecuado y en función de los acuerdos con la compañía eléctrica su modificación a lo largo del año.

Como hemos comentado, disponer de algoritmos de IA en energía nos puede proporcionar un importante ahorro de energía como hemos comentado en iluminación y proponer estrategias en tiempo real para ahorrar en el consumo global.

2.1.2. Aplicaciones relacionadas con la ventilación

La programación de los algoritmos de ventilación en los túneles, tanto en régimen de operación como en caso de un posible incendio, se realiza en base a estudios de detalle fluidodinámicos de la infraestructura. Estos estudios de detalle se basan en la generación de un modelo fluidodinámico del túnel y en la aplicación de las ecuaciones físicas correspondientes.

La bondad y el acercamiento a la realidad de estos modelos depende de una gran cantidad de variables que son definidas por el ingeniero en base a su experiencia, por lo que importante remarcar que estos modelos serán por tanto una simplificación de la realidad, ya que la realidad es mucho más compleja y cambiante, además de que ciertas hipótesis que en el momento del estudio son válidas pueden dejar de serlo con el paso del tiempo.

Estos estudios de detalle analizan escenarios concretos y sirven por tanto muy bien para diseñar los sistemas de ventilación y definir la capacidad de los sistemas, pero no para hacer una gestión eficiente de los sistemas de ventilación.

Cada vez más, tenemos a nuestra disposición una gran cantidad de datos y desde hace años en la mayoría de los túneles tenemos información sobre velocidades de aire, concentraciones de contaminantes, temperatura y humedad, condiciones meteorológicas, etc. y, en el caso de que no se tengan estos datos, se pueden obtener de manera sencilla mediante la instalación de equipos que pueden estar integrados en el centro de control o directamente comuniquen la información a un data lake.

La utilización de algoritmos de inteligencia artificial para explotar todos los datos, permite correlacionar todas las variables e inferir el comportamiento aerodinámico en el interior de los túneles bajo las diferentes estrategias de ventilación. Estos algoritmos permiten predecir cual va a ser el comportamiento aerodinámico y, en base a unos criterios objetivos, determinar la estrategia óptima de ventilación.

Este enfoque basado en IA tiene las siguientes ventajas:

- Mayor precisión al estar basada en los datos reales de la infraestructura.
- El sistema está entrenado con la realidad de la infraestructura de manera continua, por lo que se adapta a posibles cambios de comportamiento (degradación de los equipos de ventilación, aumento de la rugosidad de las paredes, cambio en cuanto a la contaminación generada por los vehículos…)
- Permite actuar en tiempo real sobre los equipos de ventilación en función de unos parámetros objetivo (calidad de aire, confort térmico y consumo eléctrico) tomando decisiones en el momento actual para garantizar las condiciones futuras.
- Al existir una correlación entre las condiciones ambientales y el funcionamiento de los equipos de ventilación, permite detectar de manera anticipada cuando un equipo tiene un rendimiento inesperado, facilitando las labores de mantenimiento.
- Permite retroalimentar modelos de simulación numérica y calibrar estos en base a los datos reales.

2.1.3. Aplicaciones relacionadas con las estrategias de gestión del túnel y toma de decisiones

El túnel o una agrupación de túneles tiene un centro de control que es el responsable de la gestión del tráfico, gestión de planes, establecer acciones de respuesta y coordinación de averías/accidentes y otras situaciones de emergencia que puedan darse en el túnel.

El centro de control integra todos los sistemas del túnel y por tanto puede llegar a gestionar los datos de todos los sistemas que hemos comentado con anterioridad. Seguramente el punto que puede llegar a tener un mejor aprovechamiento de la inteligencia artificial es su aplicación a los sistemas de gestión de los túneles y a la toma de decisiones en caso de incidente.

La gestión de procedimientos establece en el centro control una serie de protocolos y ayudas al operador del túnel, para así poder actuar de un modo más rápido, eficaz y en la medida de los posible limitar los errores humanos. Los procedimientos son diseñados, analizados y auditados con cierta frecuencia para ser mejorados. Con la incorporación de la Inteligencia Artificial estos procedimientos y gestión pasan de ser un proceso más o menos "estático" a un proceso en tiempo real, es decir, estas estrategias "pre-establecidas" reciben datos en tiempo real de otros sistemas del túnel que pueden llegar a modificar algunas sub-tareas para adecuarse a la situación actual del túnel. A modo de ejemplo, algunos de los planes pre-establecidos son:

- Plan de emergencia
- Planes mantenimiento
- Planes de obra
- Plan de señalización de tráfico, cortes de carril,.. motivados por campañas de tráfico (Operaciones salida,…)

La gestión de incidencias es otro de los aspectos importantes en el centro de control, el cual deberá ser diseñado para responder de la forma más autónoma a las incidencias. En esto ultimo es donde la IA puede procesar esa gran cantidad de datos que se reciben en tiempo real y con la ayuda del aprendizaje de los datos previos puede proporcionar recomendaciones al operador de las acciones a realizar.

Desde el punto de vista de la IA, el principal sistema de apoyo en la gestión de incidencias es el sistema de Detección Automática de Incidencias (DAI) que utiliza algoritmos que analizan datos de tráfico para detectar incidencias en el momento en que se producen y tienen como finalidad reducir o minimizar sus efectos adversos sobre el tráfico y la seguridad vial. El sistema DAI es capaz de detectar incidentes del tipo:

- Vehículos parados;
- Vehículos que circulan en dirección contraria;
- Reducción notable de la velocidad y vehículo lento
- Peatones fuera de los vehículos y objetos en la calzada
- Humo y llamas;
- Acceso a áreas restringidas;

Si profundizamos un poco más, vemos que todas estas incidencias tienen en común que la mayoría de datos son proporcionados por el sistema de circuito cerrado de televisión (CCTV) y los algoritmos que permiten usar las imágenes para un fin determinado. Gracias a la IA, el sistema de reconocimiento de incidentes a través del reconocimiento de las imágenes es capaz de aprender a través de los patrones dados y gracias a ello ser cada más preciso en la detección.

Para finalizar este apartado, no podemos olvidar que la aplicación de Deep learning a partir de datos históricos de varios centros de control puede llevar a ser usado como un simulador donde los operadores de túneles puedan entrenar incidencias pasadas y futuras, las cuales puedan ser generadas fusionando aspectos de varias incidencias

2.1.4. Aplicaciones relacionadas con mantenimiento

El área del mantenimiento y en especial el mantenimiento predictivo tienen cabida en la aplicación de la IA. No en todos los sistemas que hemos comentado anteriormente tienen el mismo grado de apliación, en términos generales podemos indicar que pueden serlo:

- Sistemas que de algún modo formen parte de un sistema cinemático.
- Sistemas que pueden ser sensorizados y permitan tener un off-set para realizar comparaciones.

El modo más sencillo para entenderlo es un ejemplo. En un sistema de bombas podemos obtener datos de:

- Sensores de vibraciones.
- Sensores de temperatura en los devanados del motor.
- Control y monitorización del arrancador del motor (intensidad, tensión, rampa de arranque,…)
- Horas de funcionamiento.
- Condiciones ambientales de la sala donde se encuentre (temperatura, humedad,..)
- Valores de presión en las tuberías
- Accionamiento de válvulas.

Todos estos datos, en algunos casos ya los tenemos en el Scada de control y ya disponemos de alarmas que nos informan de las incidencias. En este caso, se trata de que los algoritmos del IA puedan aprenden a partir de los datos recogidos y establecer como se comporta la bomba y predecir como se comportará y como envejecerá. Este aprendizaje, además pueden ser:

- Complementado con los datos de otras bombas del mismo túnel o incluso de otro túnel.
- Base para que IA aprenda antes de que un túnel se inauguré, es decir, entrenar a la IA con datos de un túnel tipo y aplicarlo directamente cuando el túnel nuevo se inaugure.

Este ultimo punto, puede llevarse al extremo, es decir, si tenemos un sistema entrenado podríamos pensar en la reducción de la sensorización o en caso de avería de los sensores en poder seguir trabajando ya que el algoritmo y sus predicciones no necesitarían datos en tiempo real (Nota: para otras aplicaciones si es necesario los datos en tiempo real).

Este ejemplo de aplicación es solo a través de datos que obtenemos de sensores de equipos principalmente mecánicos y rotativos. Para equipos estáticos será necesario el uso de otras técnicas para obtener datos. Cabe mencionar, que la técnica "estrella" para esos casos son las imágenes en toda su gama de obtención (video, fotográfica,..) y rangos (térmica, …)

2.2. Otras aplicaciones

En la actualidad se están desarrollado otras aplicaciones no ligadas directamente a los sistemas del túnel. El mantenimiento/conservación de la obra civil está captando el interés de numerosas empresas, administraciones y estudiosos, ya que son trabajos que conllevan un considerable esfuerzo humano y que puede traducirse en una considerable inversión cuando se trata de trabajos de reacondicionamiento.

Una de ellas, es la aplicación de la IA en el campo de la inspección de túneles [4] que está permitiendo realizar inspecciones de un modo más rápido, evitar los aspectos subjetivos que tiene la inspección humana e incrementar la precisión de la inspección.

Sin la aplicación de IA, el proceso de inspección de túneles es un proceso manual y lento, además se trata de un proceso subjetivo ya que es una inspección humana. De manera manual, las grietas con una precisión de 0,2 mm son difíciles de detectar y además es complejo comparar con inspecciones previas (campañas de inspección de otros años).

La periodificación de las inspecciones depende del país donde se encuentre el túnel, sin embargo y con independencia de ello, es importante tener un conocimiento detallado del estado del túnel, por ello deben recogerse:

- Materiales de construcción y sus propiedades
- Geometría y perfil de túnel,
- Instalaciones de operación y gálibos
- Daños y/o deficiencias
- Otros datos de interés para la caracterización del estado del túnel (antigüedad, geología,…)

De acuerdo con los autores del documento [4] el uso de la inteligencia artificial en la inspección supone un ahorro entre 25% y 60% si lo comparamos con los métodos estándar (Trolley y TunnelMap) de los últimos 10 años.

Además de una mejora del rendimiento de tiempo de inspección, ha permitido mejorar en la calidad de la detección de las fisuras y eliminar la subjetividad en el análisis.

Otra aplicación en la misma área es el desarrollo de un detector de fisuras en hormigón usando machine learning [5]. En este caso, el equipo de trabajo diseño un método de detección a partir de fotografías. Dicho método se basa en el aprendizaje profundo (Deep learning) que como anteriormente se ha indicado es un aprendizaje automático que utiliza una red neuronal convolucional que están adaptadas para el reconocimiento de imágenes.

Mediante la convolución, es posible extraer características en un área en lugar de un punto, este proceso junto con la extracción de las características de aproximadamente 2000 fotografías de grietas y su posterior división en numerosas imágenes para su caracterización, esto permitió extraer el material para el aprendizaje de la red neural.

La conclusión de este estudio fue que las grietas en los revestimientos de hormigón fueron bien detectadas, sin embargo, en hormigones no revestidos la detección no fue tan positiva.

Figura 2. Imagen grieta

Estos dos (2) ejemplos de aplicaciones en el mantenimiento de la obra civil de los túneles, abre un importante cambio desde los siguientes aspectos:

- Mejora en los rendimientos en el tiempo de revisión de la infraestructura y en consecuencia a nivel económico, al reducirse la mano de obra.
- Reducción de los errores humanaos al evitar subjetividad en las valoraciones.
- Poder disponer de una base de datos y comparar la evolución del deterioro en un periodo determinado.
- Establecer estrategias de mantenimiento y optimizar los costes de mantenimiento.
- Establecer catálogos de patologías, clasificaciones, evolución entre categorías, etc.

En ambos casos, se han utilizado medios como la fotografía y otro tipo de instrumentos, la incorporación del video y la creación de un modelo BIM del túnel o incluso incorporar los datos en un gemelo digital abre un campo con un futuro rápido crecimiento en el mantenimiento de las infraestructuras.

2.3 Futuras aplicaciones

Las futuras aplicaciones por venir no son sencillas de estimar, si bien, el campo del coche autónomo unido con el desarrollo de las comunicaciones bajo el estándar 5G, está abriendo la puerta a una interrelación real entre los vehículos y la infraestructura.

En el caso del vehículo, la tecnología se ha denominado "V2X" y es aquella que proporciona a los vehículos la capacidad de comunicarse con el entorno, distinguiéndose las comunicaciones (y por tanto intercambio de datos):

- V2V: comunicación entre vehículos (vehicle-to-vehicle);
- V2I: comunicación con la infraestructura (vehicle-to-infraestructure)
- V2N: comunicación con la red (vehicle-to-network);
- V2P: comunicación con los peatones (vehicle-to-pedestrian);

Para todo este tipo de comunicaciones ya se han establecido los primeros estándares y en algunos países las regulaciones que permitan acotar el desarrollo de estas.

En este caso, la infraestructura (en este caso los túneles) tendrá un papel primordial a la hora de explotar la comunicación de datos recibidos desde los vehículos o personas y su procesamiento ya que permitirá una detección temprana y una mejora en la respuesta antes incidentes mediante la comunicación directa entre el vehículo y el centro de control.

3. EJEMPLOS DE IA APLICADO AL SISTEMA DE VENTILACIÓN

3.1. RESPIRA® aplicado a túneles ferroviarios

Como se ha comentado anteriormente, la ventilación en los túneles es la encargada de mantener los niveles de contaminantes por debajo de los límites establecidos por las normativas durante la operación normal de los túneles y en caso de incendio, mantener controlado el humo para proporcionar un entorno seguro que permita la auto-evacuación de los usuarios del túnel y facilitar a los equipos de emergencia su intervención sobre el incendio.

En el caso de túneles de Metro, y concretamente en aquellos con un sistema conectado entre la zona de andenes y la zona de túneles es muy importante también proporcionar unas condiciones de confort térmico adecuadas para las personas que se encuentren en el interior de la infraestructura.

A diferencia de la ventilación de un espacio cerrado, una red de túneles como la de un metro es muy compleja con ventiladores distribuidos en muchos puntos de la red que intercambian aire entre el interior y el exterior. Además, todos estos ventiladores proporcionan aire a un túnel por el que circula un tren, que a su vez genera un movimiento de aire en el interior de la infraestructura por lo que no es fácil controlar los caudales de aire circulantes en cada instante de tiempo.

Todos estos aspectos, juntamente con efectos geotérmicos que aparecen al encontrarse bajo el subsuelo hacen que la ventilación de este tipo de infraestructuras sea una ciencia compleja y cuya operación debe de realizarse desde una visión holística a nivel de red y no a nivel individual de equipos o espacios.

RESPIRA® se desarrolló para tratar de manejar toda esta complejidad utilizando algoritmos de inteligencia artificial para correlacionar todas las variables de forma centralizada y predecir el comportamiento futuro con el fin de establecer la estrategia óptima de ventilación en cada instante de tiempo, buscando de forma simultánea la mejora de las condiciones ambientales, la calidad de aire y la eficiencia energética.

RESPIRA® se implantó en la red convencional de Metro de Barcelona en Julio de 2020 consiguiendo una mejora de las condiciones ambientales con una reducción del consumo eléctrico. La red convencional consta de 5 líneas, 128 estaciones subterráneas y un total de 324 ventiladores distribuidos en ventiladores de estación y ventiladores de túneles.

Una de las claves de cualquier sistema, es la integración con los sistemas existentes. La siguiente figura muestra, de forma esquemática, cómo se ha integrado el sistema de inteligencia artificial con el SCADA existente, sistema encargado de emitir las órdenes a los diferentes ventiladores.

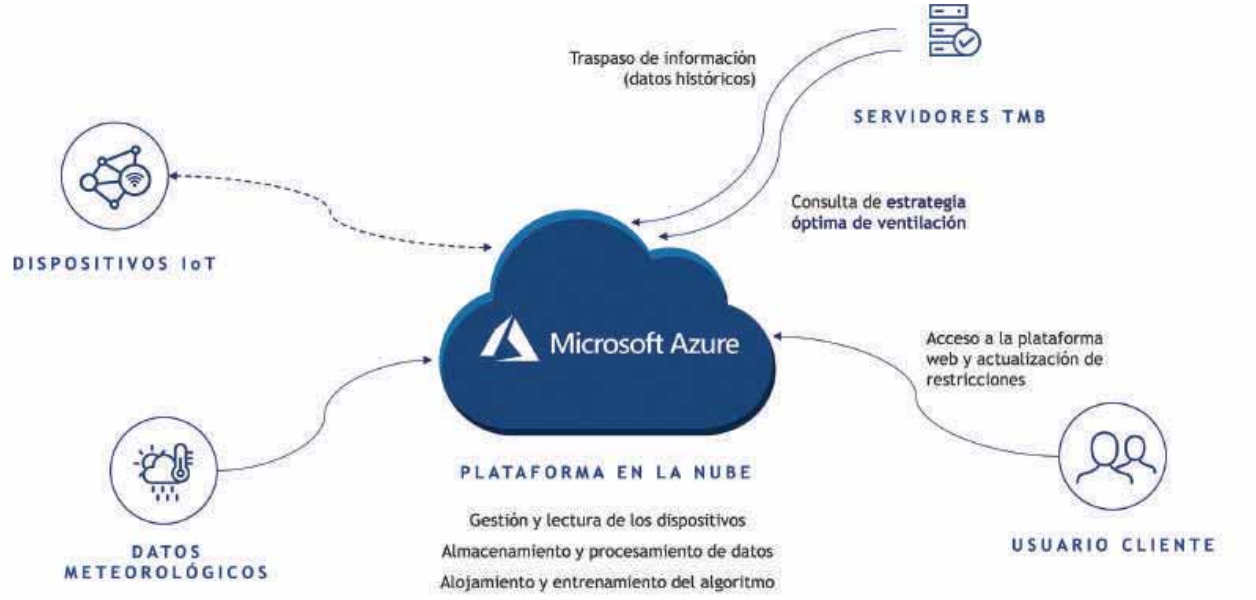


Figura 3. Arquitectura del sistema desplegado en Metro de Barcelona

El sistema, donde se procesa y almacena toda la información y donde corren y entrenan los diferentes algoritmos, se encuentra alojado en la nube. Este hecho permite un fácil despliegue y una gran escalabilidad a la hora de procesar la información.

La integración con el sistema SCADA existente de Metro de Barcelona, que es el que manda las órdenes a los equipos de ventilación, se realiza mediante una Virtual Private Network (VPN) entre la nube y los servidores del SCADA. Esta comunicación se realiza de manera unidireccional desde el SCADA a la plataforma en la nube para aumentar los niveles de ciberseguridad. Esta integración sirve para proporcionar la información disponible en el SCADA que alimenta al algoritmo (estados de ventiladores) y para, cada hora, leer la estrategia óptima de ventilación para las próximas 48 horas.

El sistema, adicionalmente a la información recibida por el SCADA, recibe información proveniente de dispositivos IoT y de diferentes fuentes de información externas como las agencias meteorológicas. Los equipos IoT se han instalado debido a la falta de datos en cuanto a temperatura, humedad y calidad de aire en el SCADA existente. La utilización de esta tecnología IoT permite obtener datos de una manera rápida, sencilla y poco intrusiva con la infraestructura de comunicaciones existente.

Toda la información es gestionada y procesada en tiempo real y se proporciona en forma de cuadros de mando embebidos en una plataforma web. La siguiente imagen muestra un ejemplo de los cuadros de mando y, concretamente, muestra la comparativa entre los datos reales medidos mediante los dispositivos y las predicciones realizadas por los algoritmos de inteligencia artificial:

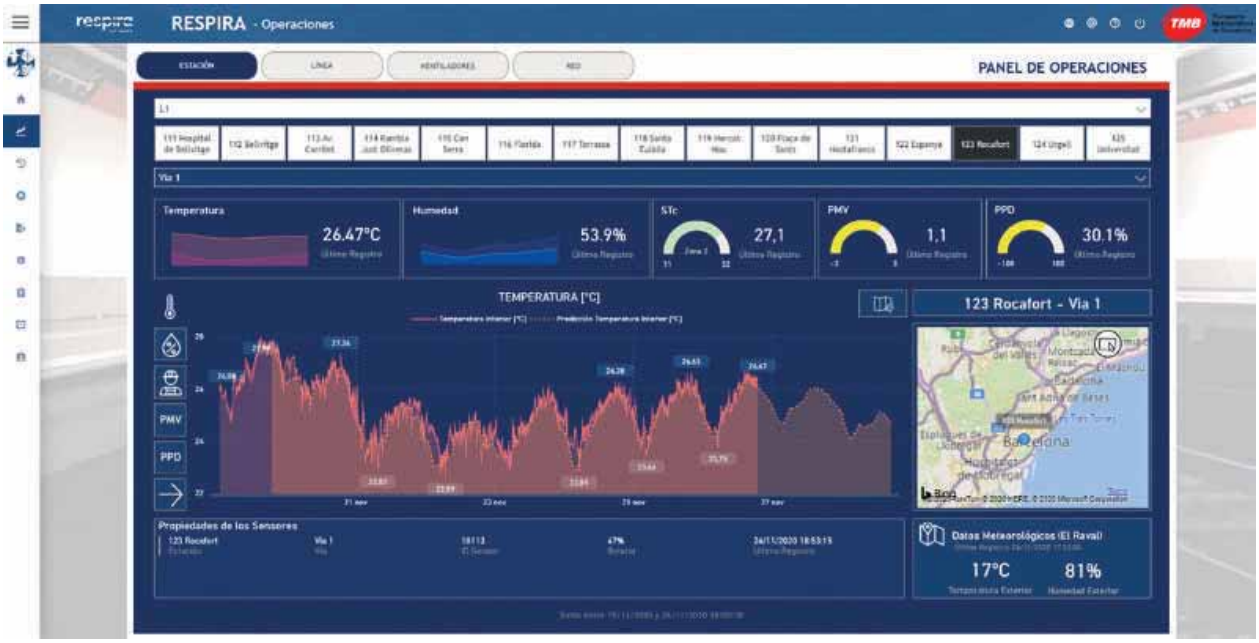


Figura 4. Plataforma Web. Predicciones de temperatura para la estación de Rocafort (Línea 1)

El sistema se implantó en Metro de Barcelona en Julio de 2020, obteniendo durante ese verano una reducción de 1,3ºC respecto al año anterior, con una reducción de consumo energético del 11.8 %. Hay que tener en cuenta que el año 2020 y 2021 ha tenido unas fuertes restricciones debido a la pandemia de la COVID-19 y la calidad de aire ha sido el factor prioritario, priorizando este factor frente a otros como el ahorro energético. Con la mejora de la situación, y con el sistema otra vez priorizando el confort térmico y la eficiencia energética, se han alcanzado ahorros de hasta el 65% en invierno, previendo un ahorro anual entre el 25 y 30% en situación estable.

3.2. Algoritmos aplicados a la ventilación túnel carreteros urbanos

Otro caso práctico donde se está empleado el uso de IA en el campo de la ventilación, es a los túneles carreteros urbanos como apoyo al desarrollo de la ingeniería para la automatización del sistema de ventilación en caso de incendio.

Los túneles carreteros urbanos son infraestructuras subterráneas de gran complejidad e importante longitud (en grandes ciudades) desde el punto de vista de poseer diferentes secciones tipo y tipologías constructivas, con numerosos ramales de salida y ramales de entrada. La compleja geometría de la red, unida a un sistema de ventilación variable y con diferentes configuraciones a lo largo de la misma, provocan que sean unos túneles de carretera más exigentes del mundo en cuanto a control de la ventilación.

Para resolver la complejidad, y caracterizar la realidad de la infraestructura se utilizan herramientas de IA, con el fin de obtener patrones de funcionamiento y correlacionar el comportamiento fluidodinámico de la infraestructura con factores externos como la meteorología o el tráfico, así como el funcionamiento de los equipos de ventilación. De esta manera apoyándose en las más de 100.000 señales que se registran de manera continua en el centro control y que llevan registrándose desde la inauguración del mismo en 2011, se pueden calibrar los modelos de simulación fluidodinámica (CFD) que se utilizarán para analizar las posibles actuaciones del sistema de ventilación ante diferentes situaciones de interés, como son las producidas por un incendio.

Entre las técnicas utilizadas:

- Clusterización: Identificar comportamientos análogos en la infraestructura e identificar zonas con comportamientos específicos o con comportamiento erróneos (detección de anomalías en los datos)
- Regresión: Identificar el peso de cada una de las variables que intervienen en las velocidades del aire de cada uno de los tramos y en los niveles de contaminación, así como predecir el comportamiento futuro en función de las previsiones de tráfico y meteorología.

Estos análisis, permiten identificar la importancia del tráfico y por tanto caracterizar realmente el efecto pistón generado por los coches, así como la rugosidad de las paredes en cada uno de los tramos.

Figura 5. Histórico (anual) de velocidades de los anemómetros en túnel urbano

Figura 6. Mediciones NOx en túnel urbano

También permite identificar el rendimiento real de los ventiladores correlacionando diferentes pruebas de encendido con las mediciones reales de velocidad de aire y contaminantes.

Esta información se utiliza como parámetros de entrada de los modelos de simulación con el fin de ayudar a la calibración. Mediante el análisis de los output de los modelos de simulación y su comparativa con los datos reales y la aplicación de algoritmos de minimización de errores permite realizar un último auto-calibrado para garantizar que los modelos representan la realidad.

Los algoritmos de ventilación se testearán mediante pruebas aerodinámicas y pruebas de humos calientes en las distintas zonas de los túneles.

4. CONCLUSIÓN

La Inteligencia Artificial pese a que podamos pensar que es una tecnología que nos deparará el futuro, la realidad nos está presentando que ya está entre nosotros y que además su desarrollo está siendo exponencial.

La presente comunicación muestra que en muchos de los sistemas de energía, ventilación e ITS la IA ya está aplicándose, obteniendo beneficios reales en la operación y apoyando a estrategias de mantenimiento y mejora de procedimientos. Como se ha comentado anteriormente las aplicaciones de IA, no solo está siendo aprovechadas por los sistemas sino también por otras áreas de los túneles como la obra civil.

Asimismo, se han presentado dos casos prácticos aplicados al campo de la ventilación en infraestructuras subterráneas. Se ha presentado un caso de aplicación en Metro de Barcelona obteniéndose ahorro a nivel de consumo energético mayor de un 10% y una reducción de la temperatura como mínimo en 1,3ºC para la operativa normal. También se ha presentado un caso donde se está aplicando la IA para el desarrollo de los algoritmos de incendio en un túnel carrero urbano complejo donde ayudará a la toma de decisiones y al calibrado de los modelos de simulados.

5. REFERENCIAS

[1] Lasse Petteri Rouhianine, "Inteligencia Artificial", 2018.

[2] ITS España. "Smart Tunnel", enero 2020.

[3] http://www.itsa.org/ Sitio oficial de la ITS América (inglés)

[4] Schneider & A. Prokopová, F. Modetta & V. Petschen; The use of artificial intelligence for a cost-effective tunnel maintenance.

[5] Suguru Yokoyamaa, Takashi Matsumoto; Development of an automatic detector of cracks in concrete using machine learning. 2017.

PIARC
2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROAD TUNNEL OPERATIONS AND SAFETY
&
VIII SPANISH TUNNELS SYMPOSIUM

SIXTH SESSION:

Ventilation and Lighting

Topic: "Lighting and energy efficiency"

REGULACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DE TÚNELES DE CARRETERA. ESTRATEGIAS PARA OPTIMIZAR SU RENDIMIENTO

Javier Borja López
José Ignacio Abad Martínez; Enrique Vaquero García; Daniel Monserrat Ber
IDOM Consulting, Engineering, Architecture

La implantación de la tecnología LED en el sector de la iluminación, y en particular, en los sistemas de iluminación de túneles de carretera, ha propiciado que se estén desarrollando sistemas de regulación del alumbrado más sofisticados que los que se utilizaban tradicionalmente con la tecnología VSAP. Estos nuevos sistemas de regulación permiten adecuar los niveles luminotécnicos en el túnel a las necesidades reales en cada momento, de acuerdo con el nivel de iluminación exterior, el nivel de tráfico, las condiciones meteorológicas, las horas de uso de las luminarias o el límite de velocidad establecido, minimizando así el consumo energético.

Las distintas normas y recomendaciones relativas a los sistemas de iluminación de túneles de carretera se centran en el dimensionado de dichos sistemas, para la situación más desfavorable, y no suelen abordar en detalle cómo se debe controlar / regular dicha iluminación y, cuando lo hacen, no tienen en cuenta las posibilidades de regulación que la tecnología LED ha introducido.

La determinación del número óptimo de estados lumínicos en el túnel, el nivel de iluminación más adecuado para cada uno de estos estados, cómo utilizar los datos registrados por los luminancímetros del túnel para mejorar el rendimiento del sistema de control del alumbrado, etc., son aspectos que tienen gran impacto en el funcionamiento del sistema de iluminación y de los que existen escasas referencias.

En el presente artículo se abordan estos puntos, y se plantean distintas estrategias para optimizar la filosofía de control del sistema de alumbrado de un túnel de carretera, tomando como referencia las experiencias recopiladas por los autores, experiencias procedentes de túneles en explotación y de la práctica de los distintos fabricantes y suministradores. Se espera que estas estrategias sirvan de referencia a los explotadores y gestores de túneles a la hora de configurar sus sistemas.

REGULATION OF ROAD TUNNEL LIGHTING SYSTEMS. STRATEGIES TO OPTIMISE THEIR PERFORMANCE

The implementation of LED technology in the lighting sector, and in particular in road tunnel lighting systems, has led to the development of more sophisticated lighting control systems than those traditionally used with HPS technology. These new dimming systems make it possible to adapt the lighting levels in the tunnel to the real needs at any given moment, according to the level of external lighting, the level of traffic, weather conditions, the hours of use of the luminaires or the established speed limit, thus minimizing energy consumption.

The various standards and recommendations relating to road tunnel lighting systems focus on the sizing of such systems, for the most unfavorable situation, and do not usually address in detail how such lighting should be controlled / dimmed and, when they do, they do not take into account the dimming possibilities that LED technology has introduced.

Setting the optimum number of lighting states in the tunnel, the most appropriate lighting level for each of these states, how to use the data recorded by the tunnel luminance meters to improve the performance of the lighting control system, etc., are aspects that have a great impact on the operation of the lighting system and for which there are few references.

This article addresses these points, and proposes different strategies to optimize the control philosophy of the lighting system of a road tunnel, taking as a reference the experiences collected by the authors, experiences from tunnels in operation and from the practice of the different manufacturers and suppliers. It is hoped that these strategies will serve as a reference for tunnel operators and managers when configuring their systems.

RÉGLEMENTATION DES SYSTÈMES D'ÉCLAIRAGE DES TUNNELS ROUTIERS. STRATÉGIES POUR OPTIMISER LEURS PERFORMANCES

La mise en œuvre de la technologie LED dans le secteur de l'éclairage, et en particulier dans les systèmes d'éclairage des tunnels routiers, a conduit au développement de systèmes de contrôle d'éclairage plus sophistiqués que ceux traditionnellement utilisés avec la technologie VSAP. Ces nouveaux systèmes de gradation permettent d'adapter les niveaux d'éclairage dans le tunnel aux besoins réels à tout moment, en fonction du niveau d'éclairage extérieur, du niveau de trafic, des conditions météorologiques, des heures d'utilisation des luminaires ou de la limite de vitesse établie, minimisant ainsi la consommation d'énergie.

Les diverses normes et recommandations relatives aux systèmes d'éclairage des tunnels routiers se concentrent sur le dimensionnement de ces systèmes pour le scénario le plus défavorable et n'abordent généralement pas en détail la manière dont cet éclairage doit être contrôlé/gradé et, lorsqu'elles le font, elles ne tiennent pas compte des possibilités de gradation que la technologie LED a introduites.

Déterminer le nombre optimal d'états d'éclairage dans le tunnel, le niveau d'éclairage le plus approprié pour chacun de ces états, comment utiliser les données enregistrées par les luminancemètres du tunnel pour améliorer les performances du système de contrôle de l'éclairage, etc. sont des aspects qui ont un impact majeur sur le fonctionnement du système d'éclairage et pour lesquels il existe peu de références.

Cet article aborde ces points et propose différentes stratégies pour optimiser la philosophie de contrôle du système d'éclairage dans un tunnel routier, en se basant sur les expériences des auteurs, les expériences de tunnels en exploitation et la pratique de différents fabricants et fournisseurs. Nous espérons que ces stratégies serviront de référence aux exploitants et gestionnaires de tunnels lors de la configuration de leurs systèmes.

1. INTRODUCCIÓN

La iluminación de un túnel es posiblemente el caso más complejo que un diseñador se puede encontrar en el ámbito de la iluminación vial. Existen distintas guías de diseño, normas y recomendaciones, como por ejemplo [1] a [7], que definen la luminancia teórica mínima que debe alcanzarse en cada punto del túnel de acuerdo con las condiciones exteriores. Esa luminancia teórica mínima en cada punto del túnel, en adelante $L_t(x)$, se define como una función de una variable, representándose en ordenadas la luminancia (cd/m^2) y en abscisas la distancia a la boca de entrada (m). Aunque los valores de luminancia establecidos por estas guías y normas son dispares [8], todas ellas coinciden en que se debe diseñar el sistema de iluminación considerando la curva de luminancia $L_t(x)$ del caso más desfavorable (el de mayor requerimiento lumínico: día soleado, calzada mojada, mayor nivel de tráfico, etc.).

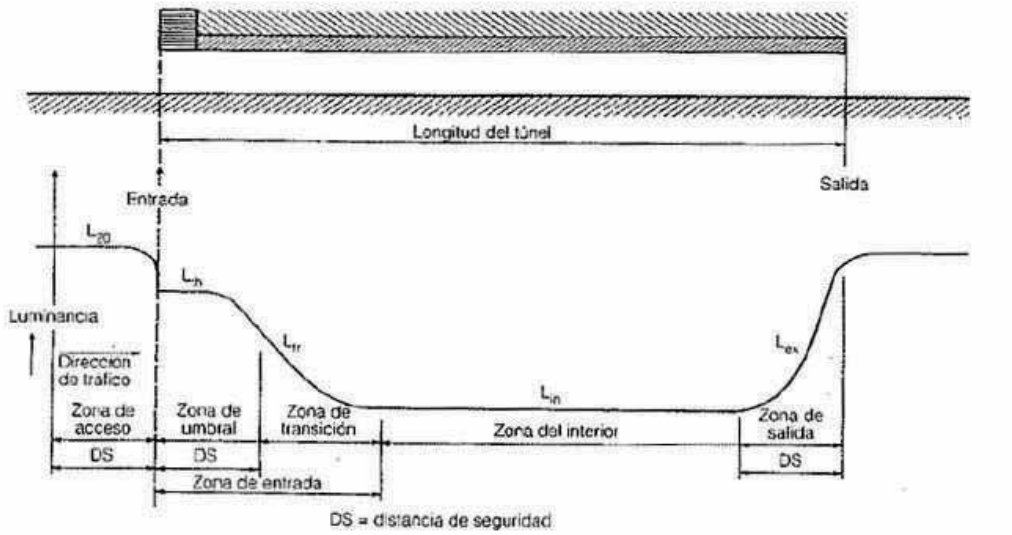


Figura 1 Representación de la curva de luminancia teórica $L_t(x)$, régimen diurno, de un túnel genérico

Dichas curvas de luminancia $L_t(x)$ dependen de diversos factores tales como el nivel de iluminación exterior máximo estimado, el volumen de tráfico, la velocidad de circulación establecida, la pendiente de la calzada, el estado de la calzada (seco/mojado), la orientación de la boca del túnel, etc. Algunos de estos factores son fijos para cada túnel, como la pendiente de la calzada, pero otros varían a lo largo del tiempo, como la iluminación exterior o el nivel de tráfico. En caso de que alguno de estos factores variables se sitúe por debajo del valor máximo utilizado en el diseño, los requerimientos luminotécnicos en el túnel serían menores.

En ese caso, es posible regular el nivel de alumbrado proporcionado por las luminarias del túnel para adaptarlo a las condiciones cambiantes, logrando así un ahorro energético y económico.

Las normas y recomendaciones existentes abordan este punto de la regulación del alumbrado del túnel desde varias perspectivas. Se resume a continuación lo indicado en las principales normas y guías de referencia.

- En el punto 6 de la ITC-EA-04 del RD 1890/2008 [1] se listan los dispositivos para regular el nivel luminoso de sistemas de alumbrado exterior (balastos serie de tipo inductivo de doble nivel de potencia, reguladores-estabilizadores en cabecera de línea y balastos electrónicos de potencia regulable). En el punto 3.8 de la ITC-EA-02 se indica que la guía de referencia para el alumbrado de túneles y pasos inferiores es la CIE 88:2004 [2].
- En el capítulo 6.12 de la CIE 88:2004 [2] se definen algunos criterios para la regulación del sistema de alumbrado del túnel en función de la iluminación exterior: el control puede hacerse mediante dispo-

sitivos de regulación de flujo continuo o conmutando en escalones separados. Menciona que los túneles modernos disponen de hasta 6 escalones y recomienda un factor de reducción de un escalón a otro inferior o igual a 3 por razones económicas y de confort. También establece el luminancímetro como elemento de medida y se dan algunos criterios para su ubicación e instalación.

- La OC 36/2015 [3] es la que aborda la regulación del alumbrado de un túnel de manera más extensa; en su punto 2.2.1.7 habla de la regulación del sistema en función del nivel de iluminación exterior. También propone el luminancímetro como elemento de medida del nivel de iluminación exterior. Igualmente, indica que en el túnel se deben establecer distintos regímenes de alumbrado, que se pueden conseguir mediante el empleo de escalones (conmutando circuitos) o mediante la regulación progresiva del flujo luminoso de las luminarias, de forma individual (luminaria a luminaria) o en grupo.

  Dicha circular, en su punto 3.5 describe además los dispositivos de regulación del flujo luminoso y del consumo de los puntos de luz: balastos de serie de tipo inductivo para doble nivel de potencia, equipos estabilizadores-reductores en cabecera de línea, balastos electrónicos de potencia regulable y dispositivos de alimentación regulable para LED.

  En su punto 3.7, la circular describe los requisitos cualitativos del sistema de control de alumbrado, los componentes principales de dicho sistema, y los tipos de regulación (por grupos o punto a punto). En dicho capítulo se establecen cinco regímenes mínimos (soleado, nublado, crepuscular, nocturno y nocturno reducido) así como el rango de valores de luminancia exterior (L20) asociados a cada uno.

- En el punto 4.4.3 del informe UNE-CR 14380 IN [4] se habla igualmente de la regulación en función del nivel de iluminación exterior. Los sistemas de control que propone son apagar/encender grupos de lámparas o regular su flujo. También propone el uso de luminancímetros como elementos para medir el nivel de iluminación exterior.

- En el punto 14.7.5 de la ANSI/IES RP-8-21 [5] se habla igualmente de regular el sistema de alumbrado del túnel en función del nivel de iluminación exterior. Para ello describe un sistema de control de alumbrado compuesto por un sistema de medida, un sistema de control propiamente dicho y un sistema de conmutación. Para el sistema de medida propone luxómetros en túneles cortos y cuando el presupuesto del proyecto sea limitado, y luminancímetros en el resto de túneles. El sistema de control de alumbrado puede ser independiente o estar integrado en el SCADA general del túnel. Las estrategias de control que propone son también apagar/encender grupos de lámparas o regular su flujo.

  Adicionalmente, el punto de 6.10 de esta norma, que trata de forma general de sistemas de control de alumbrado de carretera (no sólo de túneles), describe brevemente la arquitectura de estos sistemas (que incluye estación de gestión, data logger y controlador local). Igualmente plantea un diseño del sistema de alumbrado adaptativo y explica algunas estrategias de ahorro energético: compensar el factor de mantenimiento, sobredimensionar el sistema de alumbrado para trabajar luego al 50% de carga para prolongar la vida útil de las luminarias, ajustar el nivel de iluminación a las necesidades reales en función del nivel de actividad de la zona a iluminar, etc.

- En el capítulo 6.4 del Dossier Pilote de Túneles dedicado a la iluminación [6] del Centro de Estudios de Túneles de Francia (CETU) se indica que el alumbrado permanente suele estar controlado por fotocélulas o interruptores horarios, mientras que para el alumbrado de refuerzo se recomienda el uso de luminancímetros. En este documento se habla de regular el alumbrado del túnel en función del nivel de iluminación exterior, y además, en túneles urbanos con posibilidad de congestión, se propone regular el alumbrado del túnel en función del nivel de tráfico.

- En la Nota de Información nº4 del CETU [7] se habla igualmente de la regulación en función del nivel de iluminación exterior. Se propone el uso del luminancímetro como elemento sensor y que se definan varios regímenes entre pleno sol y nocturno (50% y 25% del pleno sol, por ejemplo) ya que el nivel de iluminación máximo con el que se diseña el sistema de alumbrado del túnel no se da a lo largo de todo el año ni a lo largo de todo el día.

Como conclusión de este análisis normativo se puede decir que:

- Todas las normas proponen adaptar la iluminación del túnel durante la explotación a las condiciones de iluminación exterior. En algunas se propone además adaptar el alumbrado según el nivel de tráfico o para compensar el factor de mantenimiento.
- De manera general, todas las normas establecen el uso del luminancímetro como elemento de medida para determinar las condiciones de iluminación exterior.
- En las diferentes normas, se establecen dos maneras de regular el nivel de alumbrado del túnel: mediante el apagado/encendido de luminarias, o mediante la regulación del flujo lumínico emitido por éstas. En este caso la regulación puede realizarse luminaria a luminaria (punto a punto) o por grupos de luminarias.
- La adaptación del alumbrado del túnel a las condiciones exteriores se realiza mediante un reducido número de estados luminotécnicos (de 3 a 6, según dichas normas y recomendaciones).

Hay que decir que estas normas, aunque ya introducen la tecnología LED, describen métodos de regulación propios de luminarias VSAP, que son las que mayoritariamente se instalaban en los túneles, dada su alta eficiencia y rango de potencias disponibles, antes de que el LED se aplicara al alumbrado público.

El planteamiento de regulación típico antes del LED consistía en 2-3 estados luminotécnicos en régimen diurno (pleno sol, nublado, crepuscular), que se obtenían apagando/encendiendo determinados grupos de luminarias y 1 ó 2 estados en régimen nocturno (nocturno, nocturno reducido) que se lograban mediante un regulador-estabilizador de dos estados en cabecera de línea. Este planteamiento condicionaba el diseño, ya que el número de estados de régimen diurno establecía los grupos de luminarias/circuitos que se debían plantear; un número elevado de estados era inviable porque ello implicaba incrementar el número de luminarias y la complejidad de la instalación, y por consiguiente su coste.

Sin embargo, la tecnología LED rompe con este planteamiento clásico, ya que las posibilidades de regulación del flujo lumínico que permite una luminaria LED son mucho mayores que las de una luminaria VSAP. Eso propicia que se pueda llevar a cabo la regulación de todo el sistema de alumbrado del túnel mediante reguladores de flujo, dando más grados de libertad al diseñador, y abriendo un abanico de posibilidades que con la tecnología VSAP no existía.

En el presente artículo se pretende incidir en este aspecto, identificando las nuevas posibilidades de regulación y estableciendo unos criterios que ayuden al diseñador a definir los nuevos sistemas de regulación de alumbrado de túneles.

2. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE ALUMBRADO

Atendiendo a la OC 36/2015 [3], la curva de luminancia L(x) que debe proporcionarse con el sistema de alumbrado del túnel depende de varios factores.

Dicha curva queda determinada con la luminancia umbral (L_{th}), valor máximo de dicha curva L(x) y la luminancia interior (L_{in}), valor mínimo. Fijados dichos valores y la velocidad de circulación en el túnel, se puede determinar la zona de transición de la curva L(x).

Por un lado, la luminancia umbral Lth, que es el nivel de iluminación a proporcionar en la boca del túnel, depende de dos factores: (1) el nivel de iluminación (L_{20}) de la boca que se percibe a una determinada distancia de la boca del túnel (lectura proporcionada por un luminancímetro) y (2) una constante que relaciona L_{20} y L_{th}.

El valor de L_{20} depende del nivel de iluminación exterior, que a su vez depende de la hora del día, la presencia o no de nubes, etc. El valor de L_{20} depende también de la orientación de la boca del túnel, de los elementos presentes en el entorno (relieve, vegetación, edificaciones, etc.) y de la distancia a la que se tome la lectura del luminancímetro (esta distancia, según se describe en el capítulo 2.2.1.2.2 de [3] debe ser igual a la distancia de parada). La distancia de parada depende, a su vez, de la velocidad de circulación, la pendiente y el estado seco/mojado de la calzada.

La constante k que relaciona L_{20} y L_{th} depende de la clase a la que pertenezca el túnel y de la distancia de parada. Las distintas clases de túnel se definen en el punto 2.2.1.1 de [3], y vienen dadas por la intensidad de tráfico y el tipo de tráfico (motorizado/mixto).

Por otro lado, la luminancia interior depende de la distancia de parada y de la clase de túnel.

En la figura siguiente se muestra un esquema que relaciona todos estos parámetros. Se han resaltado en color azul aquellos parámetros variables (por ejemplo, el estado seco/mojado de la calzada o el valor de L_{20} medido). El resto de los parámetros, o bien son fijos (por ejemplo, la pendiente de la calzada) o bien se calculan a partir de los parámetros variables.

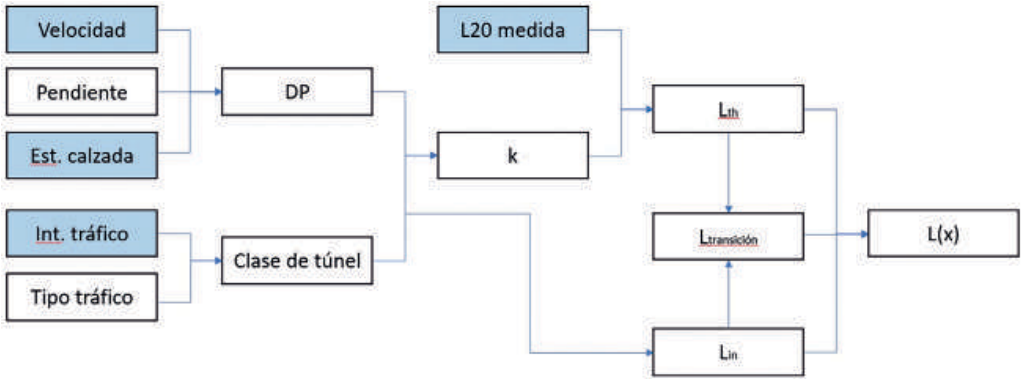


Figura 2 Parámetros que determinan la curva de luminancia del túnel

En la etapa de diseño se hace una estimación de la curva de luminancia teórica $L_t(x)$, considerando que los parámetros variables alcanzan su valor máximo: se considera el límite de velocidad establecido en la vía, se considera la calzada mojada (ya que ello maximiza la distancia de parada DP, lo que supone valores de k y L_{20} mayores), se considera el tráfico de la hora pico (IH100) y se estima el valor máximo de L_{20} que se puede alcanzar a lo largo del día y a lo largo del año.

De esta manera, se dimensiona el sistema de alumbrado para el escenario más desfavorable posible, esto es, el de mayor requerimiento luminotécnico, aunque este escenario se presente con poca frecuencia.

El sistema de regulación es el encargado de ajustar el alumbrado del túnel a las condiciones exteriores, normalmente menos exigentes que las de diseño. Para ello:

- recopila el estado actual de los distintos parámetros variables, tomando lectura de los diferentes sensores

  establece de acuerdo con ellos la curva teórica de luminancia $L_t(x)$ que debe alcanzarse en el túnel

- y actúa sobre las luminarias del túnel (encendiendo/apagando circuitos, regulando el flujo de las mismas) para adaptarse a dicha curva de luminancia.

El sistema de regulación de alumbrado de un túnel trabaja con un número finito de estados luminotécnicos. El túnel se encuentra siempre en uno de estos estados. Cada estado luminotécnico lleva asociado una determinada actuación sobre el sistema de alumbrado (activación de determinados circuitos, regulación del flujo

de determinadas luminarias, etc.), que genera una curva de luminancia real, $L_r(x)$, en el túnel. Dicha curva real cumple que $L_r(x) \geq L_t(x)$ para todo valor de x. A su vez, cada conjunto de entradas (E1, E2, E3, …, En) tiene asociado un determinado estado luminotécnico.

Figura 3 Esquema del sistema de control del túnel

Como se ha mencionado anteriormente, el planteamiento clásico de regulación sólo tenía en cuenta la iluminación exterior (L_{20}) como magnitud variable a la que el sistema de iluminación del túnel debía adaptarse. Para ello la solución habitual pasaba por instalar células fotoeléctricas como elemento sensor en las proximidades de la boca del túnel. En función de la lectura de dichas células se establecía el estado luminotécnico del túnel y se activaban o desactivaban los circuitos correspondientes para alcanzar dicho estado.

La siguiente figura muestra las curvas de luminancia asociadas a los diferentes estados luminotécnicos del planteamiento clásico. Habitualmente, como se ha mencionado en el capítulo anterior, este esquema clásico introducía un estado denominado nocturno reducido que se activaba en función de un interruptor horario, mediante un regulador de flujo de dos estados situado en cabecera de los circuitos de alumbrado permanente.

Como se ha mencionado, los sistemas de regulación modernos permiten muchas más opciones, gracias a las posibilidades de regulación del flujo lumínico que introducen las luminarias LED. En los siguientes capítulos se describen diferentes estrategias de regulación, que por sí solas o combinadas permiten optimizar el rendimiento del sistema de alumbrado del túnel.

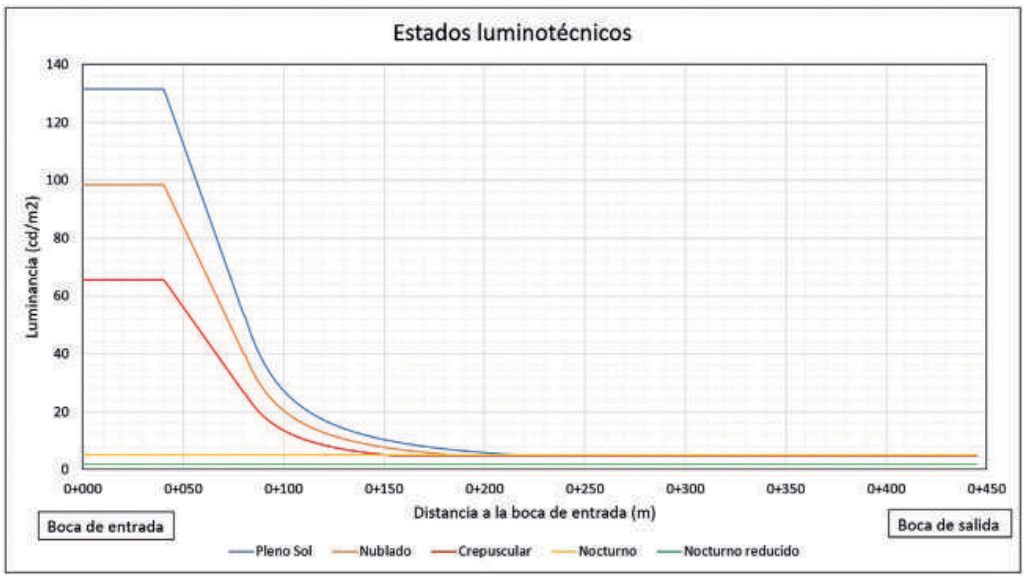


Figura 4 Curvas $L_t(x)$ asociadas a los cincos estados luminotécnicos clásicos

3. REGULACIÓN EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE LUMINANCIA EXTERIOR

La regulación del sistema de alumbrado del túnel en función del nivel de iluminación exterior es algo que ya se viene haciendo de forma habitual, y así se recoge en las distintas normas y recomendaciones. Antes de la implantación de la tecnología LED, el método de regulación más comúnmente utilizado era el de encendido/apagado de grupos de luminarias; esto condicionaba el diseño del sistema de iluminación y limitaba en la práctica el número de estados luminotécnicos que se podían plantear.

Como se ha comentado, la tecnología LED permite un planteamiento de control basado en la regulación del flujo de las luminarias, lo que posibilita la adopción de un mayor número de estados luminotécnicos en el túnel.

Ante esta situación, la pregunta que le surge al diseñador es cuántos estados luminotécnicos son necesarios. Como se ha visto en el capítulo 1, las normas hablan de 3-4 estados luminotécnicos en régimen diurno y 1-2 en régimen nocturno. Sin embargo, estas normas están pensadas para tecnología VSAP, y el uso del LED permite incrementar notablemente ese número de estados.

Para ilustrar cómo el número de estados luminotécnicos que se planteen afecta al rendimiento del sistema de iluminación, se ha realizado el análisis que se describe a continuación.

En primer lugar, se han recopilado datos registrados por luminancímetros de diversos túneles. Hay que decir que esto no ha sido una tarea fácil, dado que el elemento sensor que se utiliza con más frecuencia en los túneles españoles son las células fotoeléctricas, que generalmente proporcionan un valor discreto (todo/nada) en función de si se rebasa un determinado nivel de iluminancia (luxes). En aquellos túneles que cuentan con luminancímetros, no siempre se registran los datos proporcionados por éstos. Hay que resaltar que disponer de la información proporcionada por dichos elementos es fundamental para ajustar y optimizar el sistema de regulación de alumbrado.

En cuanto a la estrategia de muestreo/registro de datos de los luminancímetros, se considera que una lectura cada 5 ó 10 minutos puede ser suficiente tanto para el control del alumbrado como para el posterior análisis de datos. En cuanto al almacenamiento de datos, pueden registrarse todos los datos (cada 5 ó 10 minutos, lo que no supone un gran volumen de datos al cabo del año), o registrarse sólo los datos cuando éstos cambien respecto a la muestra previa. En este segundo caso el tratamiento de datos posterior es más laborioso.

En segundo lugar, se han considerado los datos de la boca Sur del túnel de Bielsa y se han establecido seis escenarios de regulación, con 3, 4, 6, 7, 11 y 15 estados luminotécnicos para el régimen diurno respectivamente. Se ha considerado en todos los escenarios de regulación que el rango de valores de luminancia exterior asociado a cada estado luminotécnico es de igual amplitud para todos los estados.

Para cada escenario de regulación, se ha calculado el consumo energético que se tendría, teniendo en cuenta los valores de luminancia registrados por el luminancímetro a lo largo de un año, y se ha comparado con la situación óptima, que sería aquélla en la que el túnel dispone de tantos estados luminotécnicos como posibles valores del luminancímetro. (Figura 5)

La gráfica siguiente muestra el exceso de energía consumida en función del número de estados. Como se puede apreciar, a mayor número de estados, menor es ese exceso. (Figura 6)

Extrapolando los valores obtenidos, se concluye que con 20 estados el exceso de energía no supera el 5% del mínimo teórico, con 25 estados el exceso queda por debajo del 2% y con 30 estados ese exceso se sitúa por debajo del 1%. (Figura 7)

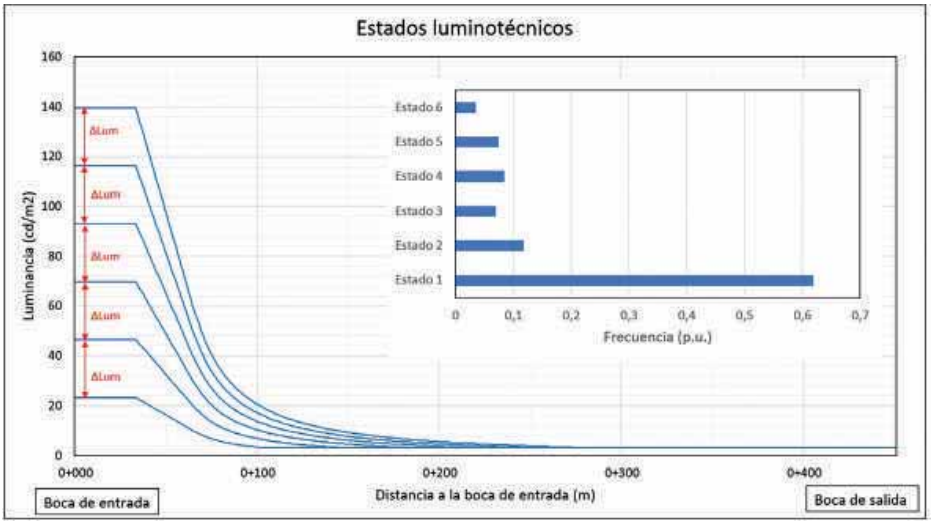


Figura 5 Curvas Lt(x) de estados luminotécnicos asociados a rangos de luminancia exterior de igual amplitud (arriba). Frecuencia de activación de dichos estados (debajo)

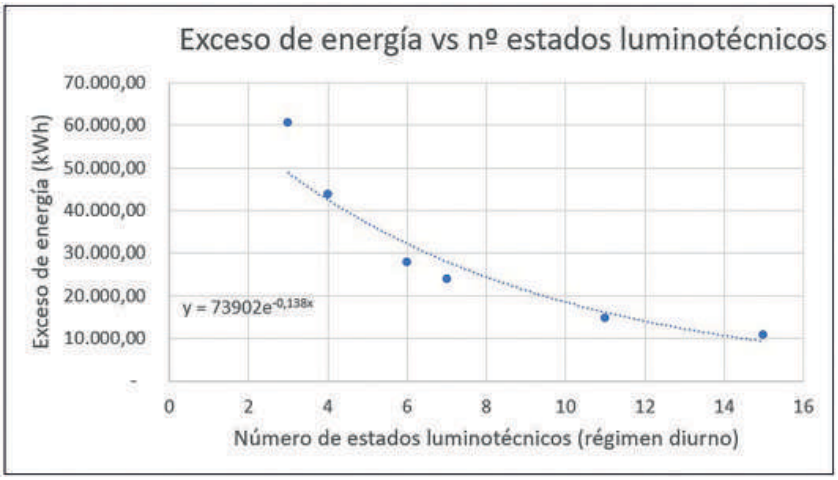


Figura 6 Exceso de energía en función del número de estados planteado

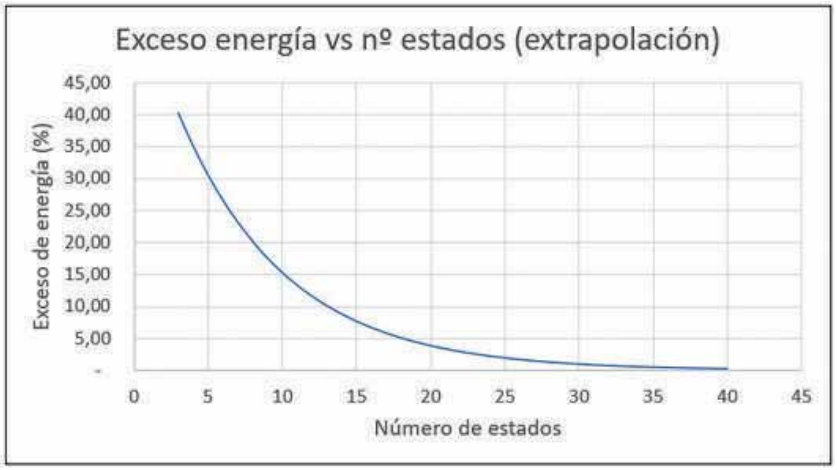


Figura 7 Exceso de energía (%) sobre el consumo mínimo teórico en función del número de estados planteados. Túnel de Bielsa

Un ejercicio similar se ha realizado con los datos registrados por el luminancímetro de la boca Sur del túnel de Vielha Juan Carlos I, obteniéndose resultados similares. En este caso, al tratarse de un túnel de mayor longitud, la energía consumida por el alumbrado base (que se mantiene constante independientemente del nivel de alumbrado exterior) es mayor y es por ello que el exceso de energía, que integra tanto alumbrado base como refuerzo, en términos porcentuales, es menor.

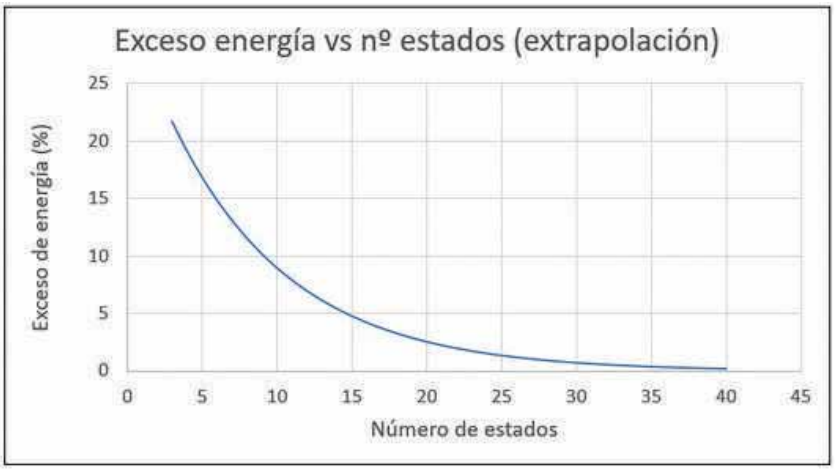


Figura 8 Exceso de energía (%) sobre el consumo mínimo teórico en función del número de estados planteados. Túnel de Vielha Juan Carlos I

El motivo de que al incrementar el número de estados luminotécnicos se reduzca la energía consumida por el sistema de alumbrado del túnel se ilustra en las gráficas siguientes.

En la figura 9 se muestra un túnel con tres estados luminotécnicos en régimen diurno, cada uno de ellos proporciona una determinada curva de luminancia (en azul). En un momento dado, la lectura del luminancímetro (luminancia L_{20}, en cd/m^2) toma un valor tal que la curva de luminancia teórica en el túnel L(x) es la que se muestra en color naranja. En ese caso, el sistema de control analiza dicha lectura y decide que el estado luminotécnico que debe activar es el estado 02, que proporciona la curva de luminancia inmediatamente superior.

En ese caso, el exceso de energía consumida por el hecho de que el sistema de alumbrado del túnel proporciona un nivel de iluminación superior al requerido viene representado por el área sombreada en verde en la figura.

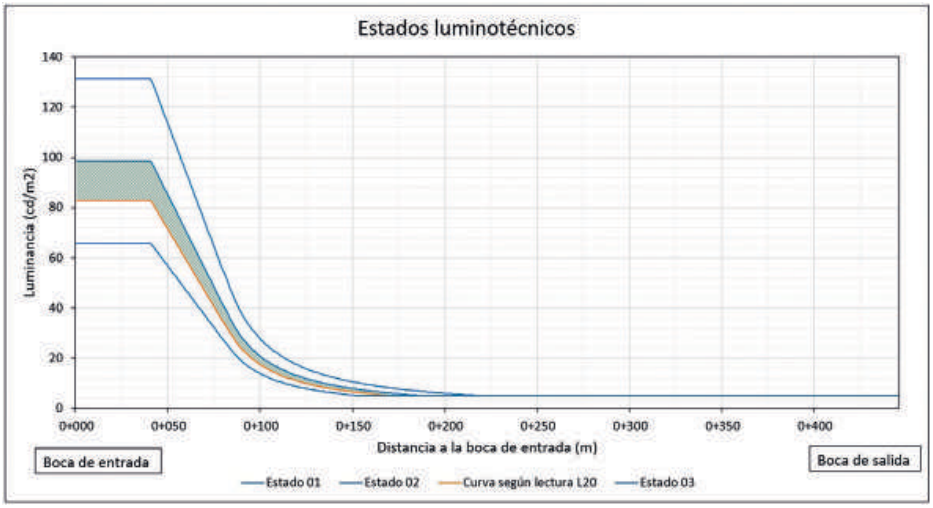


Figura 9 Identificación del exceso de energía asociado a un determinado valor de luminancia exterior para un sistema de regulación de tres estados luminotécnicos

Si en lugar de contar con tres estados luminotécnicos, el túnel contase con siete estados luminotécnicos, la situación sería la que se muestra en la gráfica 10.

En este caso, el exceso de energía sería menor, dado que el estado luminotécnico inmediatamente superior proporciona una curva que está más próxima a la curva teórica requerida.

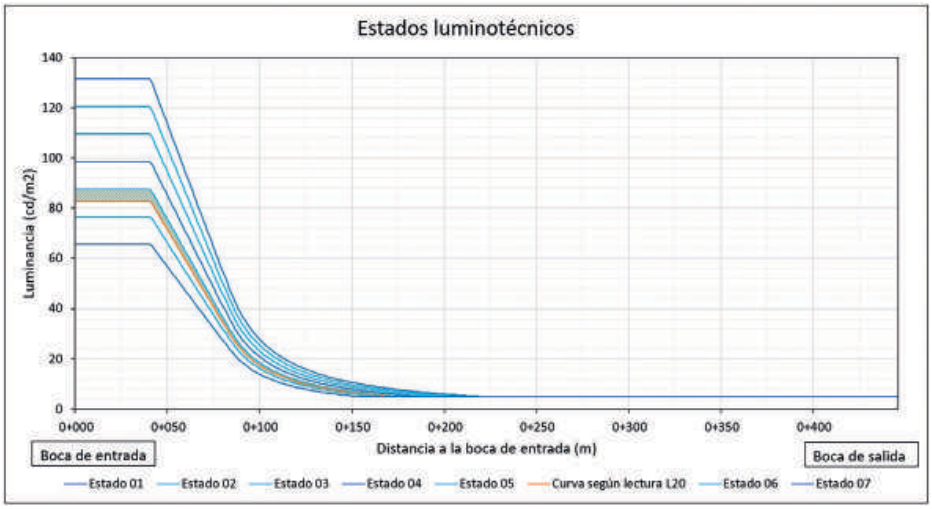


Figura 10 Identificación del exceso de energía asociado a un determinado valor de luminancia exterior para un sistema de regulación de siete estados luminotécnicos

Además de la estrategia de incrementar el número de estados, si se dispone del registro de datos del luminancímetro, se pueden aplicar otras estrategias para reducir el consumo energético.

Una de ellas es la de ajustar los umbrales de activación de los diferentes estados luminotécnicos de tal manera que la frecuencia de activación de cada estado sea similar. En efecto, en las gráficas anteriores se mostraban estados luminotécnicos que estaban asociados a rangos de luminancia de igual amplitud. En ese caso, la frecuencia de activación de cada estado es diferente.

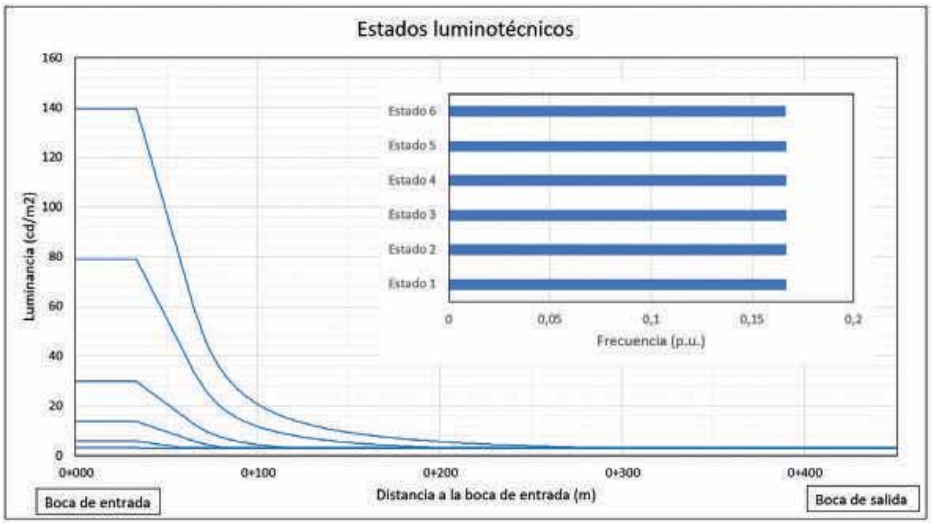


Figura 11 Curvas $L_i(x)$ de estados luminotécnicos de misma frecuencia de activación (arriba). Frecuencia de activación de dichos estados (abajo)

Otra estrategia que se ha analizado es la de fijar los umbrales de luminancia de los diferentes estados luminotécnicos de tal manera que la suma de excesos de energía a lo largo de un año asociado a cada estado sea similar.

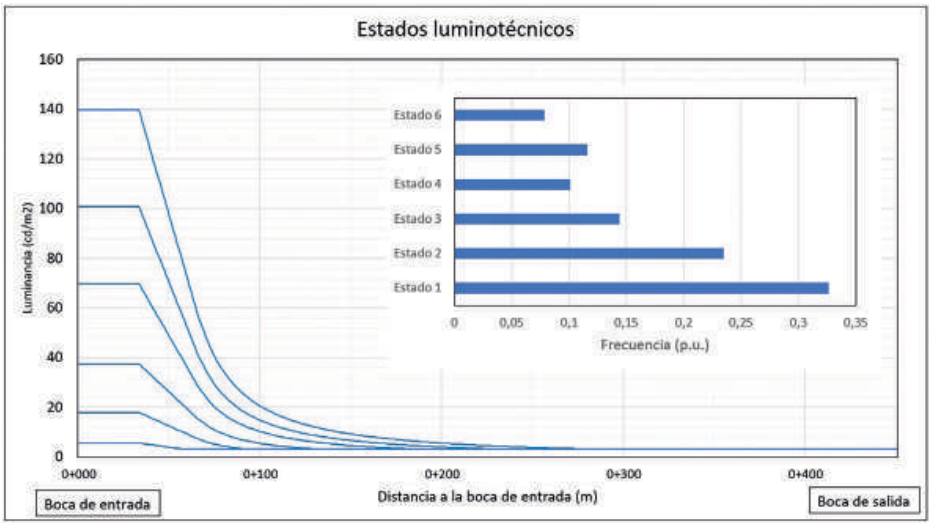


Figura 12 Curvas $L_t(x)$ de estados luminotécnicos que generan un exceso de energía similar

Los resultados de la aplicación de estas dos estrategias se muestran en la gráfica siguiente, comparándose con la estrategia inicial:

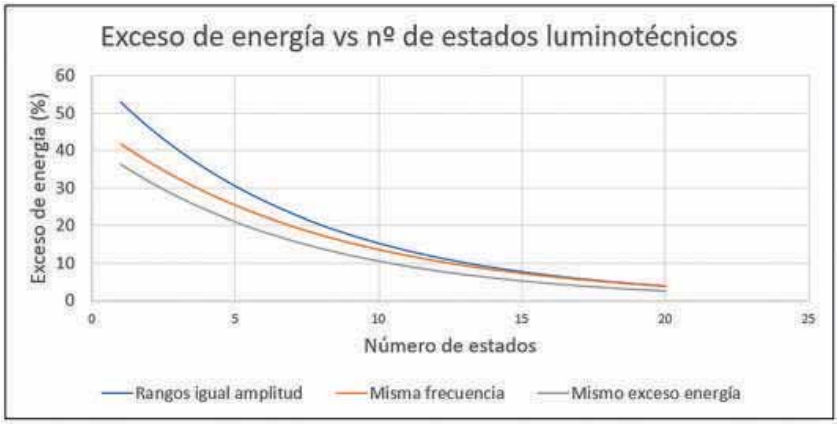


Figura 13 Comparativa de la eficacia de las diferentes estrategias de regulación

Como se puede observar, ambas estrategias mejoran los resultados con respecto a la estrategia inicial de estados luminotécnicos con rangos de luminancia de igual amplitud. Esta mejora es más significativa cuando el número de estados adoptado es reducido.

Se observa también que la estrategia de igualar los excesos de energía es la que permite una mayor reducción del consumo. Para poder plantear esta estrategia, como se ha comentado, se requiere disponer del registro de datos del luminancímetro a lo largo de un año.

Con todo ello se concluye que plantear un elevado número de estados luminotécnicos es la mejor estrategia.

4. REGULACIÓN EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN

La regulación del sistema de alumbrado del túnel en función de la velocidad de circulación no es algo habitual. Como se ha visto en el capítulo 1, las normas y recomendaciones no mencionan este tipo de regulación explícitamente.

Una de las cuestiones que hay que resolver a la hora de diseñar esta regulación es qué velocidad es la que se toma para determinar el estado luminotécnico del túnel: el límite de velocidad establecido por el operador a través del SCADA y que se muestra en los paneles de mensaje variable, etc. o la velocidad media del tráfico proporcionada por los aforadores. En los túneles donde se regula el alumbrado en función de la velocidad es el límite de velocidad establecido lo que se suele tomar como señal de entrada, ya que los datos que proporcionan los aforadores suelen tener mucha variabilidad.

Al reducirse la velocidad, se reduce la distancia de parada y como consecuencia, de acuerdo con el esquema de la figura 2, la curva de luminancia teórica $L_t(x)$ que tiene que proporcionar el sistema de alumbrado del túnel se reduce por varios motivos:

1. Por un lado, la medida de luminancia exterior L_{20} debe tomarse a una distancia de la boca de entrada del túnel igual a la distancia de parada. Si se reduce la distancia de parada, generalmente la medida de L_{20} se reduce ya que la boca del túnel, la calzada de acceso, etc., qué son elementos más oscuros, suponen en ese caso un porcentaje mayor sobre el círculo de visión del conductor. No obstante, esto no siempre es así, debiendo verificarse con medidas in situ.

Figura 14 Círculo utilizado para la estimación de la luminancia exterior a diferentes distancias de parada. Boca Norte del túnel de Bielsa

   En la práctica no es habitual disponer de más de un luminancímetro (uno por cada posible distancia de parada) en la boca de entrada de un túnel; lo habitual es que exista sólo uno, ubicado a la distancia de parada más desfavorable (velocidad máxima, calzada mojada, etc.). En ese caso se puede tomar la lectura de luminancia a la distancia de parada más desfavorable como lectura para el resto de distancias de parada. Como se ha mencionado, eso implica considerar un valor de luminancia superior al que se obtendría para distancias de parada menores, despreciando esta posible reducción de la curva de luminancia teórica $L_t(x)$, pero permaneciendo siempre en el lado de la seguridad.

2. Por otro lado, la curva de luminancia teórica $L_t(x)$ tiene un primer tramo, de longitud igual a la mitad de la distancia de parada, con un valor de luminancia máximo (la luminancia umbral L_{th}). A continuación, hay un segundo tramo, de la misma longitud, donde la luminancia decae linealmente de L_{th} a $0.4 \cdot L_{th}$. Por tanto, una reducción de la distancia de parada implica una contracción de la curva de luminancia teórica en el eje horizontal (ver figura 17).

3. Por último, de acuerdo con la figura 2, una reducción de la distancia de parada implica una reducción de la constante k que relaciona L_{20} y L_{th}, e implica también una reducción de la luminancia interior L_{in}. Eso implica en la práctica que la curva de luminancia teórica se contraiga en el eje vertical (ver figura 17).

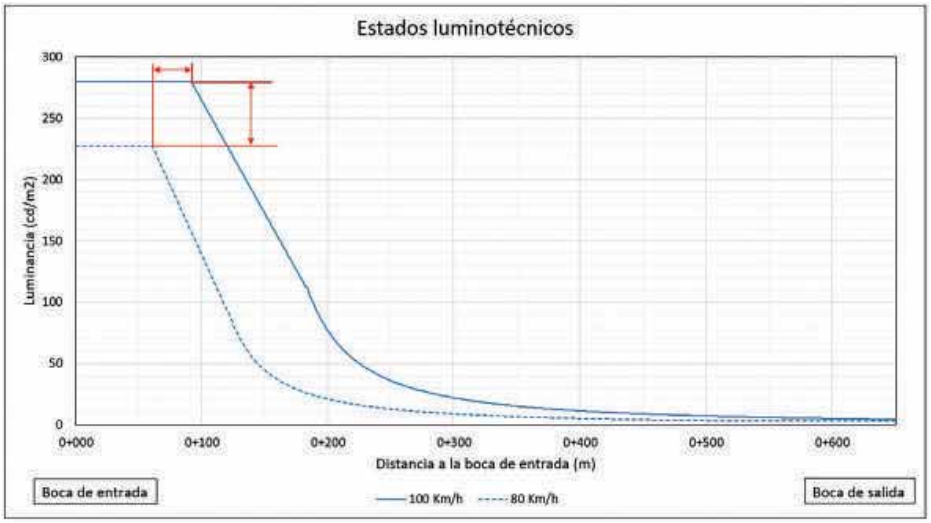


Figura 15 Contracción de la curva $L_t(x)$ en el eje horizontal y vertical

Para cuantificar el ahorro energético obtenido al reducirse la velocidad de circulación en un túnel se ha considerado un túnel unidireccional genérico de 1000 m de longitud, con una pendiente del 0%, de clase 3 según la OC 36/2015 [3]. Se ha considerado la calzada mojada (condición más desfavorable) y varios valores de luminancia exterior L_{20} (2000, 3000 y 4000 cd/m^2 respectivamente) y velocidad de circulación. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 16 Reducción del consumo para diferentes velocidades de acceso y valores de L20

Velocidad [km/h]	Asfalto	SD [m]	L20 [kcd/m2]	k	Lth [cd/m2]	Lint [cd/m2]	Inicio zona Lint	Área bajo curva Lt(x) [cd/m] (α pot. elect.)	% respecto a curva Lt(x) 100km/h
100	Mojado	182,6	2,00	0,070	140,0	4,82	0+438	28313,4	100,00%
80	Mojado	120,8	2,00	0,057	113,8	3,25	0+361	16424,2	58,01%
60	Mojado	71,6	2,00	0,043	85,8	2,58	0+244	8673,8	30,64%
40	Mojado	36,9	2,00	0,040	80,0	2,00	0+171	5151,5	18,19%
100	Mojado	182,6	3,00	0,070	210,0	4,82	0+542	41128,3	100,00%
80	Mojado	120,8	3,00	0,057	170,7	3,25	0+455	23664,0	57,54%
60	Mojado	71,6	3,00	0,043	128,7	2,58	0+312	12020,9	29,23%
40	Mojado	36,9	3,00	0,040	120,0	2,00	0+223	6920,4	16,83%
100	Mojado	182,6	4,00	0,070	280,0	4,82	0+636	54297,9	100,00%
80	Mojado	120,8	4,00	0,057	227,6	3,25	0+541	31003,7	57,10%
60	Mojado	71,6	4,00	0,043	171,6	2,58	0+374	15528,5	28,60%
40	Mojado	36,9	4,00	0,040	160,0	2,00	0+270	8723,2	16,07%

Como se puede observar, la reducción de potencia al reducirse la velocidad es relevante, y porcentualmente no tiene gran dependencia del valor de L_{20}. Estos valores de reducción se mantienen igualmente en ese orden para túneles de mayor longitud, dado que en ese caso la zona extendida está iluminada con un valor de luminancia reducido (L_{int}). En túneles más cortos la reducción sería menor, si la longitud del túnel es tal que la curva de luminancia teórica $L_t(x)$ no se extiende hasta la zona interior de luminancia L_{int}.

Si bien la reducción de potencia es relevante, la reducción del consumo sólo será significativa si los escenarios con velocidad inferior a la de diseño se repiten con cierta frecuencia. Generalmente en los Manuales de Explotación se plantea una reducción del límite de velocidad en determinados escenarios (determinados incidentes, lluvia, etc.) aunque en ocasiones en esos mismos escenarios se incrementa el nivel de alumbrado del túnel por motivos de seguridad. Por ello, se debe estudiar cada túnel de forma específica para determinar si este criterio de regulación aporta un beneficio significativo. Si estos escenarios con velocidad reducida son poco frecuentes (menos de 100 horas al año), este criterio de regulación podría descartarse.

5. REGULACIÓN EN FUNCIÓN DEL ESTADO DE LA CALZADA

La regulación del sistema de alumbrado del túnel en función del estado seco/mojado de la calzada tampoco es algo habitual. Las normas y recomendaciones mencionadas en el capítulo 1 no hacen referencia a este criterio de regulación explícitamente.

De acuerdo con la OC 36/2015 [3] el diseño del sistema de alumbrado del túnel se lleva a cabo considerando la distancia de parada más desfavorable, aplicando el coeficiente de rozamiento del pavimento húmedo. El uso de un coeficiente de rozamiento de pavimento seco en vez de húmedo influye en la distancia de parada. Efectivamente, el pavimento seco presenta un coeficiente de rozamiento mayor y, en consecuencia, la distancia de parada se reduce. Como se ha visto en el capítulo 3, una reducción de la distancia de parada supone que la curva de luminancia teórica $L_t(x)$ se reduzca por diversos motivos.

En la tabla siguiente se muestra el ahorro energético obtenido al considerarse el estado de la calzada seca/mojada. Al igual que en el capítulo 3, se ha considerado un túnel unidireccional genérico de 1000 m de longitud, con una pendiente del 0%, de clase 3 según la OC 36/2015 [3], con un valor de luminancia exterior L_{20} de 3000 cd/m^2. Se han considerado varias velocidades de circulación, como se puede observar en la figura siguiente, donde las líneas continuas corresponden a curvas de luminancia para calzada mojada y las líneas discontinuas curvas de luminancia para calzada seca.

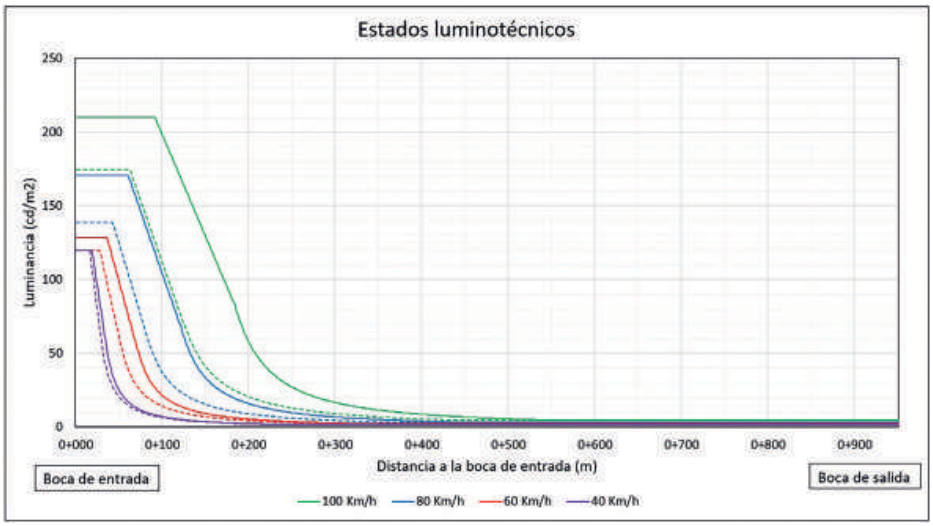


Figura 17 Curvas $L_t(x)$ para diferentes velocidades de acceso y estados de la calzada

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 18 Reducción del consumo para diferentes velocidades de acceso y estados de la calzada

Velocidad [km/h]	Asfalto	SD [m]	L20 [kcd/m2]	k	Lth [cd/m2]	Lint [cd/m2]	Inicio zona Lint	Área bajo curva Lt(x) [cd/m] (α pot. elect.)	% respecto a curva Lt(x) pav. húm.
100	Mojado	182,6	3,00	0,070	210,0	4,82	0+542	41128,3	100,00%
80	Mojado	120,8	3,00	0,057	170,7	3,25	0+455	23664,0	100,00%
60	Mojado	71,6	3,00	0,043	128,7	2,58	0+312	12020,9	100,00%
40	Mojado	36,9	3,00	0,040	120,0	2,00	0+223	6920,4	100,00%
100	Seco	124,6	3,00	0,058	174,6	4,82	0+433	26352,0	64,07%
80	Seco	85,1	3,00	0,046	138,9	3,25	0+368	15501,2	65,51%
60	Seco	54,8	3,00	0,040	120,0	2,00	0+334	9300,2	77,37%
40	Seco	31,6	3,00	0,040	120,0	2,00	0+218	6395,7	92,42%

Como se puede observar la reducción de consumo que se obtiene al aplicar este criterio de regulación es significativo, especialmente cuanto mayor es la velocidad de circulación. Dado que esta situación (calzada seca) se repite con una frecuencia elevada, la aplicación de este criterio de regulación implica una disminución del consumo energético relevante. En el caso concreto del túnel de Bielsa, que se mencionaba en el capítulo 2, en el año 2019 se registraron 155 días de lluvia (según registros de la estación meteorológica del túnel), eso implica que este criterio de regulación se podría haber aplicado el 57.5% del tiempo. Hay que destacar que el túnel de Bielsa se encuentra ubicado en la zona pirenaica, donde las precipitaciones son abundantes. Se trata por tanto de un criterio de regulación a tener en cuenta porque aporta una reducción de consumo significativa.

6. REGULACIÓN EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE TRÁFICO

La regulación del sistema de alumbrado de un túnel en función del nivel de tráfico no es algo habitual, aunque si bien es cierto que hay alguna referencia normativa al respecto [6].

La regulación de acuerdo con este criterio consiste en utilizar los datos de tráfico que proporcionan los aforadores del túnel para reducir el nivel de alumbrado cuando el nivel de tráfico sea inferior al nominal. De acuerdo con [6] esta estrategia puede ser rentable en túneles urbanos con posibilidad de congestión.

Considerando la OC 36/2015 [3], la implementación de este criterio puede ser compleja, dado que la determinación del nivel lumínico en el túnel no viene dado por el nivel de tráfico instantáneo, que es lo que proporcionan los aforadores, sino por el valor de la IH100, que es un valor anual. Si se adoptara el nivel de tráfico instantáneo como variable en función de la que se regula el sistema de alumbrado no se estaría cumpliendo la norma estrictamente.

Una alternativa sería realizar un análisis de los datos de tráfico anuales y adoptar estrategias de acuerdo con dicho análisis (por ejemplo, la reducción del nivel de alumbrado los fines de semana y festivos en un rango de horas determinado si tras el análisis se comprueba que la intensidad de tráfico en esos periodos está por debajo del umbral que marque la norma). Se trataría por tanto de una estrategia de regulación en bucle abierto.

Otra opción sería asumir los datos de tráfico instantáneos como válidos y regular en función de ellos. En ese caso es posible que se deban tratar los datos proporcionados por el sistema de contaje de vehículos para evitar una variabilidad excesiva de los mismos, que provocaría repetidos cambios del estado luminotécnico del túnel.

Como se puede observar en la figura 2, de acuerdo con la OC 36/2015 [3] el nivel de tráfico determina la clase del túnel, y ésta determina por un lado la constante k que relaciona la iluminación exterior L_{20} y la luminancia umbral L_{th} que se debe proporcionar en el túnel, y por otro lado el nivel de iluminación en la zona interior L_{in}.

En la tabla siguiente se cuantifica el ahorro energético obtenido al considerar que el nivel de tráfico se reduce y el túnel cambia de clase.

Tabla 19 Reducción del consumo para diferentes niveles de tráfico

Velocidad [km/h]	Asfalto	SD [m]	L20 [kcd/m2]	Clase de túnel	k	Lth [cd/m2]	Lint [cd/m2]	Inicio zona Lint	Área bajo curva Lt(x) [cd/m] (α pot. elect.)	% respecto a curva Lt(x) Clase 4
80	Mojado	120,8	3,00	4	0,074	221,6	7,39	0+331	32675,7	100,00%
80	Mojado	120,8	3,00	3	0,057	170,8	4,69	0+369	24533,1	75,08%
80	Mojado	120,8	3,00	2	0,043	130,4	2,69	0+434	18194,3	55,68%

Al igual que en los capítulos anteriores, para ilustrar esta circunstancia se ha considerado un túnel unidireccional genérico de 1000 m de longitud, con una pendiente del 0%, con una velocidad de circulación de 80 Km/h y con un valor de luminancia exterior L_{20} de 3000 cd/m2. Se han considerado un túnel con tráfico mixto (pueden circular bicicletas), de clase 2, 3 y 4 (la clase 1 está asociada a túneles con tráfico exclusivamente motorizado).

Como se puede observar, las reducciones de consumo son también en este caso considerables, y la aplicación de este criterio de regulación dependerá de la frecuencia en la que el túnel se pueda considerar de una clase inferior a la nominal (al margen de la viabilidad de implementación de este criterio, según se ha mencionado anteriormente).

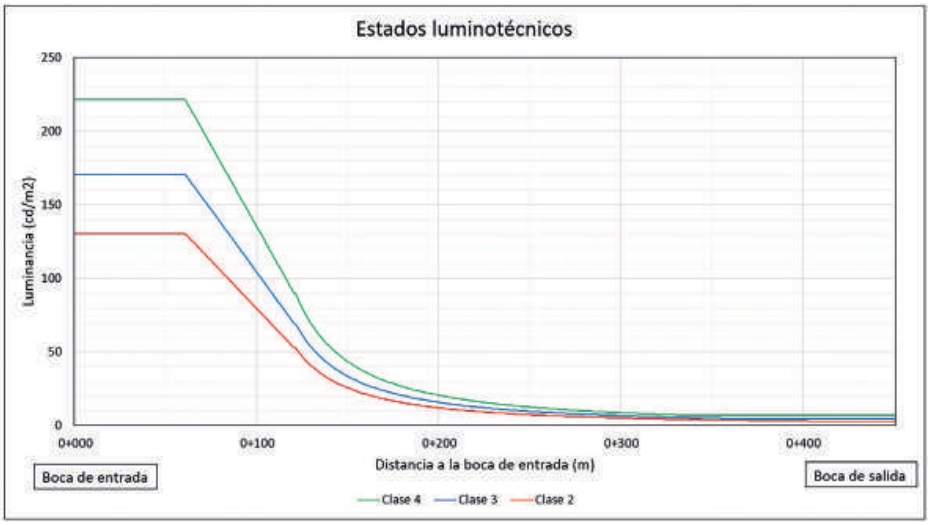


Figura 20 Curvas Lt(x) de estados luminotécnicos asociados a diferentes niveles de tráfico

Cabe destacar que de acuerdo con la norma OC 36/2015 [3], los túneles con tráfico exclusivamente motorizado (por ejemplo, los que se encuentran en una autovía) y un nivel de tráfico (IH100) inferior a 500 veh/h y carril no requerirán alumbrado normal (sólo alumbrado de guiado). Ello daría pie por tanto a apagar el alumbrado normal de un túnel de clase 2 o superior en periodos de baja intensidad de tráfico (por debajo del umbral citado); por ejemplo, en horario nocturno. Sin embargo, los autores no conocen ningún túnel en la que esta

medida se haya llevado a la práctica de momento; algunos gestores de túneles están estudiando la posibilidad de apagar el túnel cuando éste se encuentre vacío, y encenderlo cuando se detecte la presencia de algún vehículo aproximándose a alguna de las bocas de entrada.

7. REGULACIÓN EN FUNCIÓN DEL FACTOR DE MANTENIMIENTO

El factor de mantenimiento (FM) es la relación entre la iluminancia media en la zona iluminada después de un determinado periodo T de funcionamiento de la instalación de alumbrado (Et=T, medido en luxes) y la iluminancia media proporcionada por dicha instalación al inicio de su funcionamiento como instalación nueva (Et=0, medido en luxes).

$$FM = \frac{E_{t=T}}{E_{t=0}}$$

La OC 36/2015 [3] remite a la ITC-EA-06 del RD 1890/2008 [1] para estimar el FM que se debe aplicar en una determinada instalación. Cabe destacar que en dicha ITC-EA-06 no se mencionan las lámparas de tecnología el LED. El factor de mantenimiento depende de varios parámetros y en el ámbito de la iluminación de túneles suele tomar valores entre 0.7 y 0.8.

En la práctica, la introducción de este factor de mantenimiento supone que el sistema de alumbrado se sobredimensione para que proporcione un nivel de iluminación tal que al final del periodo de funcionamiento T, cuando las luminarias alcanzan su mayor degradación, los niveles luminotécnicos proporcionados en el túnel sean los exigidos por la norma. Esto implica en la práctica que, si no hay regulación, el sistema de alumbrado esté proporcionando un nivel de iluminación por encima del requerido la mayor parte del tiempo, y, por tanto, consumiendo más energía de la requerida.

A modo de ejemplo, si para conseguir el nivel de iluminación requerido se necesitan luminarias de 10 000 lúmenes, al considerar el factor de mantenimiento (por ejemplo FM=0.8), deberán instalarse luminarias de 10 000 / 0.8 = 12 500 lúmenes. Eso implica que, si no se regula convenientemente, al principio de su vida útil, las luminarias está proporcionando una potencia lumínica un 25% mayor de lo necesario, y por tanto, consumiendo un 25 % más (suponiendo que el ratio lúmen/W es igual para las luminarias de 10 000 y 12 500 lúmenes). A medida que pasa el tiempo y las luminarias se van degradando, ese exceso de consumo no es tan significativo. Sólo al final de su vida útil, cuando han alcanzado su máximo nivel de degradación, las luminarias de 12 500 lúmenes proporcionarían exactamente el nivel de iluminación requerido, sin que hubiera en ese momento un exceso de consumo.

La regulación en función del nivel de degradación de las luminarias puede ser:

a) En bucle cerrado: en este caso, se utiliza un elemento sensor (un luxómetro) para medir el nivel de iluminación de la calzada del túnel, y en función de la lectura de dicho sensor, se regula el flujo lumínico de las luminarias. Este sistema es más complejo que el sistema en bucle abierto, y además no resulta fácil de implantar, especialmente en túneles con alto nivel de tráfico, dado que éste puede distorsionar la lectura del luxómetro.

b) En bucle abierto: en este caso, el sistema de control del alumbrado regula el flujo de las luminarias en función de las horas de funcionamiento de las mismas, conocida la vida útil de las mismas. Se considera por tanto que la degradación de las luminarias es un proceso lineal, proporcional al tiempo de funcionamiento. Este sistema es el que habitualmente se adopta en túneles con iluminación LED y sistemas de regulación modernos.

En el caso del sistema de regulación en bucle abierto, la depreciación del flujo de las luminarias se rige por la siguiente fórmula:

$$F(t) = F_N\left(1 + \frac{(FM-1)t}{T}\right)$$

En el que F es el flujo lumínico proporcionado por las luminarias en el instante t, F_N es el flujo nominal (al inicio de su vida útil), FM es el factor de mantenimiento, t son las horas de funcionamiento en un momento dado y T es el periodo en horas desde el inicio de la vida útil hasta el momento en el que la degradación de las luminarias es tal que su flujo lumínico es igual al nominal por el factor de mantenimiento. Dado que F_N y T son parámetros fijos, proporcionados por el fabricante de las luminarias, y FM también (definido por el diseñador de acuerdo con las normas) F es una función de t.

La regulación de las luminarias para que el flujo de las mismas proporcionen siempre el nivel luminotécnico requerido viene dado por la expresión:

$$R(t) = \frac{FM}{1 + \frac{t}{T}(FM-1)}$$

Obsérves que $F(t) \cdot R(t) = F_N \cdot FM$ en todo momento (para cualquier valor de t), y que $F_N \cdot FM$ es el flujo lumínico requerido por las normas.

Cuando no se regula el sistema de alumbrado con este criterio el consumo de dicho sistema es el nominal ($C_N(t)$). Suponiendo que la reducción de consumo es equivalente a la reducción de flujo lumínico, cuando se aplica la regulación, el consumo se reduce de acuerdo con R(t). La reducción de consumo, en términos pro-

$$Reducción\ (\%) = \left(1 - \frac{\int_0^T C_N(t)R(t)dt}{\int_0^T C_N(t)dt}\right) \cdot 100$$

centuales, que se obtiene al aplicar este criterio de regulación viene dado por la siguiente expresión:

$$Reducción\ (\%) = \left(1 - \frac{FM \cdot \ln FM}{FM-1}\right) \cdot 100$$

Suponiendo que el consumo nominal $C_N(t)$ es constante a lo largo del tiempo, esa expresión depende sólo del factor de mantenimiento FM y toma el siguiente valor:

Considerando las suposiciones anteriores, con un FM=0.7 la reducción de consumo sería de un 16.77% y con un factor de FM=0.8, la reducción sería de un 10.75%. Como se puede observar, son valores significativos, lo que implica que este criterio de regulación es un criterio a tener en cuenta.

8. IMPLANTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN DE ALUMBRADO. ALGUNAS CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

De manera general, la arquitectura de control de la iluminación de los túneles mediante la tecnología LED más actual es muy similar, y se basa en una jerarquía centralizada con varios niveles de ejecución, como se puede ver en el siguiente esquema:

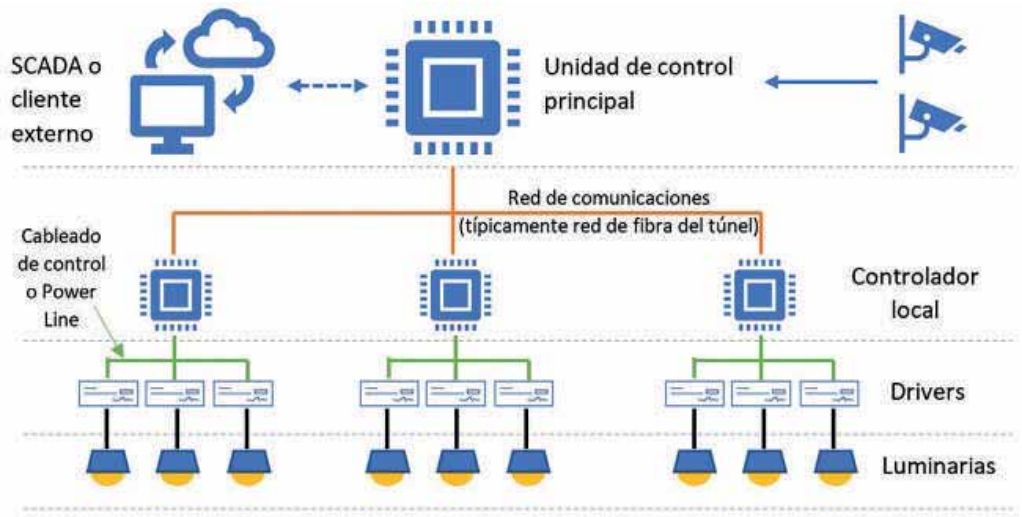


Figura 21 Arquitectura típica del sistema de control de alumbrado de un túnel

De una forma sintética, la base del control de la iluminación es la unidad de control principal, la cual se encarga de obtener las lecturas de los elementos sensores (luminancímetros, estaciones meteorológicas, aforadores, etc.) y establecer el estado luminotécnico que se debe implementar en el túnel. Dependiendo de si el túnel dispone de centro de control o no, esta unidad podrá ser integrada en el SCADA del túnel o ser totalmente autónoma.

La unidad de control principal (UCP) envía instrucciones a las unidades de control local mediante la red de comunicaciones del túnel (típicamente es una red de fibra óptica, pero en túneles con poco equipamiento o cortos podría ser otro tipo de red). Estas unidades interpretan las instrucciones recibidas, por ejemplo, el nivel de regulación de la luminaria, y envían dicha información a los drivers mediante cableado de control específico o mediante Power Line (información a través del cable de alimentación), de tal modo que finalmente la luminaria adquiere el estado deseado.

Dependiendo del grado de complejidad de la instalación (túneles bitubo, túneles de gran longitud, túneles con varios accesos, etc.) y del grado de redundancia con el que se quiera dotar al sistema en caso de fallo, puede ser necesario repetir el esquema mostrado varias veces, o incluir unidades de control intermedias entre la UCP y las unidades locales, etc.

Hay que tener en cuenta una serie de aspectos prácticos que condicionan el diseño de los sistemas de regulación:

En primer lugar, las luminarias LED permiten regular su flujo lumínico en un rango amplio, pero existen ciertos límites. Efectivamente, con niveles de regulación bajos (por debajo del 30%) el rendimiento de la luminaria baja considerablemente. Se puede apreciar en la curva siguiente, facilitada por un fabricante. Para paliar este hecho, si fuera necesario regular por debajo de ese límite, se puede plantear la instalación de un mayor número de luminarias de menor potencia. Por ejemplo, en vez de regular una luminaria de 10 000 lúmenes al 20%, se puede plantear la instalación de 2 luminarias de 5 000 lúmenes en su lugar, y regular una de ellas al

40%, apagando la otra. El diseñador deberá estudiar cuidadosamente esta alternativa, ya que implica un mayor coste de instalación que se puede compensar mediante una disminución del consumo eléctrico.

Figura 22 Límite de regulación de las luminarias LED

Como se ha visto en los capítulos anteriores, determinadas estrategias de regulación implican la introducción de curvas de luminancia que se contraen tanto en el eje vertical como en el horizontal. Para poder llevar a cabo la contracción en el eje horizontal se requiere un sistema de control punto a punto, que es más complejo y con un mayor coste que un sistema de control por grupos de luminarias. Igualmente, el diseñador deberá valorar las ventajas de plantear un sistema de regulación punto a punto.

Por otro lado, determinados fabricantes ofrecen sistemas de regulación que permiten plantear un número de estados luminotécnicos limitado (unas pocas decenas). Eso puede representar un problema, dado que, como se ha visto, la mejor estrategia para regular el sistema de alumbrado en función de la iluminación exterior es plantear un número de estados significativo y, si a eso se añaden otras estrategias de regulación (en función del estado de la calzada, de la velocidad de circulación, etc.) el número de estados luminotécnicos se multiplica, pudiendo darse el caso de que el sistema no permita plantear tantos estados como sería deseable. El diseñador deberá evaluar en esos casos cuál es la mejor opción. Una posible alternativa es la de aprovechar estados luminotécnicos de la estrategia de regulación en función de la iluminación exterior para otras estrategias (por ejemplo, utilizar la misma curva de luminancia para el estado de 100 Km/h, calzada mojada y 2000 lm y el de 100 Km/h calzada seca y 3000 lm). De esta manera se minimiza el número de estados, aunque la curva aplicada no sea la óptima (en el ejemplo mencionado, se perdería la contracción horizontal y por tanto, algo de ahorro energético).

Existen otras limitaciones técnicas, en función del protocolo de comunicación utilizado (DALI, DMX, etc.), el fabricante, etc. Estas limitaciones son por ejemplo el número de drivers que puede gestionar un mismo controlador local, o el número de controladores que puede gestionar una UCP, las distancias máximas entre controlador local y driver, etc. El diseñador deberá considerar estos condicionantes cuando proyecte el sistema de regulación.

Un aspecto también a tener en cuenta es el tiempo de reacción del sistema, desde que la unidad de control realiza la lectura de los distintos sensores hasta que se lanzan las distintas actuaciones a los drivers y las luminarias alcanzan el estado deseado. En sistemas complejos (punto a punto, con un elevado número de drivers/controladores locales, etc.) este tiempo puede ser de hasta unos pocos minutos. Este punto no suele ser crítico, pero puede ser relevante en algunos casos; por ejemplo, si se adopta una estrategia de regulación en función del tráfico (p. ej., apagar el túnel si no hay vehículos), dado que en ese caso se requiere una respuesta rápida del sistema (si se aproxima un vehículo, el encendido de las luminarias debe ser muy rápido).

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las posibilidades de regulación del LED permiten plantear nuevas estrategias de regulación del alumbrado de los túneles. Hay que destacar que cada túnel es diferente y requiere un análisis específico. Las consideraciones descritas en este artículo tienen como objeto proporcionar a los diseñadores una visión general de estas nuevas posibilidades de regulación y un orden de magnitud de su eficacia.

Para poder optimizar los sistemas de regulación es imprescindible contar con datos registrados por los luminancímetros del túnel, idealmente durante un año. Se debe insistir a los distintos gestores sobre la importancia de instalar luminancímetros y que estos registren datos. Disponer de esa información durante la fase de proyecto permitiría optimizar el sistema dado que condiciona el diseño del mismo.

La estrategia de regular el alumbrado del túnel en función del nivel de alumbrado exterior parece la más rentable, dada la frecuencia con la que la luminancia exterior se sitúa en valores inferiores a los de diseño. Para ello se recomienda plantear un número de estados luminotécnicos elevado (de 20 a 30) asociados a distintos rangos de L20, lo que proporciona una reducción del consumo considerable.

Igualmente, la estrategia de ajustar el alumbrado del túnel al estado de la calzada y la compensación del factor de mantenimiento son estrategias de fácil implantación y que resultan muy rentables, combinadas con la anterior.

La estrategia de regular el alumbrado en función del nivel de tráfico o de la velocidad de circulación debe analizarse en cada caso, ya que pueden generar ahorros de consumo en determinados túneles (urbanos con congestiones frecuentes, etc.).

El estudio llevado a cabo y descrito en este artículo es un estudio teórico. Se deben tener en cuenta las limitaciones de los diferentes sistemas de regulación y analizar cuidadosamente cuando corresponda la necesidad de instalar un sistema de regulación más complejo, valorando si los costes asociados compensan el ahorro que adicional que se podría obtener.

Los cálculos y resultados presentados en el este artículo se basan en la Orden Circular OC 36/2015 [3] publicada por el Ministerio de Fomento (actual Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana) de España. Un análisis similar debería desarrollarse en caso de aplicar otras normas o recomendaciones.

BIBLIOGRAFÍA

[1] R.D. 1890/2008 del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07

[2] Comisión Internacional de Iluminación (CIE). Informe Técnico CIE 88:2004. Guía para el alumbrado de túneles de carretera y pasos inferiores.

[3] Ministerio de Fomento. Orden Circular 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles. Tomo II "Recomendaciones para la iluminación de túneles".

[4] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Informe UNE-CR 14380 IN "Aplicaciones de iluminación. Iluminación de túneles". 2007.

[5] Sociedad de Ingenieros en Iluminación de Norteamérica (IESNA). American National Standard Institute (ANSI). ANSI/IES RP-8-21 "Recommended practice: Lighting roadway and parking facilities". 2021.

[6] Centro de Estudios de Túneles de Francia (CETU). Dossier Pilote des tunnels. 4.2 Éclairage. 2000.

[7] Centro de Estudios de Túneles de Francia (CETU). Note d'information nº4. Commande de l'éclairage des tunnels routiers. 1994.

[8] J. Borja, Q. Hernández. "Sistemas de iluminación de túneles eficientes". VII Simposio Nacional de Túneles de Carretera. ATC-PIARC. Barcelona. 2019.

DÉVELOPPEMENT D'ÉCLAIRAGES LEDS ÉCONOMES EN ÉNERGIE, CONFORTABLES ET SÛRS POUR L'USAGER

Dorian Talón
CETU, Bron, France
Severine Besson
CETU, Bron, France

Dans le cadre d'un travail de thèse et du projet DELTA, le CETU a mené des recherches sur des pistes d'économies d'énergie en tunnel en tirant parti des possibilités offertes par la technologie LED. Le travail de thèse s'est séparé en deux étapes majeures. Une première partie expérimentale a été menée en laboratoire, elle était orientée vers l'impact du spectre des sources de lumière sur la visibilité des conducteurs en section courante de tunnel. La seconde partie consistait en des simulations informatiques et en la création d'un modèle dynamique permettant de reproduire les conditions d'exploitation d'un ouvrage réel (prise en compte du climat et de la vitesse de trafic notamment). Cette partie s'intéressait plus particulièrement aux économies d'énergie liées à un pilotage intelligent de l'installation de renfort d'un tunnel. L'exemple pris en compte pour les premiers résultats de ce modèle dynamique est la tranchée couverte d'Antony. Ce tube non exploité est utilisé dans le cadre du projet DELTA qui réunit de nombreux acteurs du monde des tunnels pour créer une plateforme de test et de démonstration pour l'éclairage LED. Les résultats obtenus pour la partie expérimentale n'ont pas permis de faire émerger des pistes d'économies d'énergie conséquentes liées à la modification du spectre des sources utilisées en section courante. En revanche, le modèle dynamique a mis en évidence de potentiels gains énergétiques importants en asservissant l'installation de renfort à la vitesse de trafic, ainsi qu'à l'état de la chaussée (mouillée / verglacée ou sèche).

DESARROLLO DE UNA ILUMINACIÓN LED ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE, CÓMODA Y SEGURA PARA LOS USUARIOS

Como parte de un trabajo de tesis y del proyecto DELTA, el CETU realizó una investigación sobre formas de ahorrar energía en túneles aprovechando las posibilidades que ofrece la tecnología LED. El trabajo de tesis se dividió en dos grandes etapas. En el laboratorio se realizó una primera parte experimental, orientada al impacto del espectro de las fuentes de luz sobre la visibilidad de los conductores en el tramo interior del túnel. La segunda parte consistió en simulaciones por ordenador y la creación de un modelo dinámico que permitiera reproducir las condiciones de funcionamiento de una estructura real (teniendo en cuenta el clima y la velocidad del tráfico en particular). Esta parte estaba más particularmente interesada en el ahorro energético vinculado a la gestión inteligente de la instalación de refuerzo de un túnel. El ejemplo que se tiene en cuenta para los primeros resultados de este modelo dinámico es el tubo sin explotación de el falso túnel de Antony, utilizado en el marco del proyecto DELTA que reúne a numerosos actores del mundo de los túneles para crear una plataforma de ensayo y demostración para Iluminación LED. Los resultados obtenidos por la parte experimental no permitieron encontrar pistas de ahorros energéticos significativos ligados a la modificación del espectro de las fuentes utilizadas en el tramo interior. Por otro lado, el modelo dinámico ha puesto de manifiesto importantes ganancias energéticas potenciales al controlar la instalación de refuerzo a la velocidad del tráfico, así como al estado de la carretera (húmeda/con hielo o seca).

DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT, COMFORTABLE AND SAFE LED LIGHTING FOR USERS

As part of a PhD work and of the DELTA project, the CETU has done research on energy savings in tunnel by using the possibilities of the LED technology. The thesis was split into two main steps. A first experimental one was lead in laboratory, it was oriented towards the impact of the spectrum of the light sources on drivers' visibility in tunnels interior zones. The second one was about creating a dynamic model which allowed us to recreate the operating conditions of a real tunnel (climate and traffic conditions notably). The main goal of this step was to determine the possible energy savings linked to an intelligent control of the reinforcement lighting installation of a tunnel. The example used for the first results of this dynamic model is the unexploited tube of the cut and cover of Antony, used in the DELTA project. The latter gathers numerous actors of the tunnel field to create a demonstration and test platform for LED lighting. The results obtained for the experimental part didn't highlight any significant energy savings leads by modifying the spectrum of the light sources used in interior zones. However, the dynamic model showed potential major energy gains by enslaving the reinforcement installation to the traffic speed, and to the state of the road (wet / icy or dry).

1. INTRODUCTION

Le développement de la technologie LED et sa généralisation dans les projets d'éclairage, notamment en tunnels routiers, soulève plusieurs questions. Les concepteurs et les exploitants s'interrogent sur l'impact que peut avoir cette nouvelle technologie sur les règles de dimensionnement actuellement utilisées en tunnel. Un des aspects particulièrement investigués est celui des économies d'énergie que la technologie LED pourrait permettre de réaliser. Ces réductions de consommations peuvent être atteintes de différentes façons, en s'appuyant sur les nombreuses caractéristiques de la LED qui en font une source de lumière très différente des sources « classiques » (lampes Sodium Haute Pression ou tubes fluorescents). Les deux aspects plus particulièrement développés dans cette étude sont l'impact du spectre des sources LED sur la visibilité des conducteurs, et les possibilités de gradation du flux lumineux qu'offre cette technologie.

Trois problématiques liées à l'impact du spectre sur la visibilité des conducteurs en tunnel routier ont été développées dans cette étude :

RQ1. Est-ce que le changement de spectre, dû au passage de sources SHP à des sources LEDs de températures de couleur potentiellement élevées (jusqu'à 5000 K) impacte la visibilité des conducteurs dans leur champ de vision central ?

RQ2. L'excitation des CGRips impacte-t-elle la visibilité pour des niveaux lumineux typiquement rencontrés en section courante de tunnel ?

RQ3. A partir des réponses apportées aux questions 1 et 2, est-il possible de trouver une distribution spectrale optimisée qui offrirait une bonne visibilité aux conducteurs tout en permettant de réaliser des économies d'énergie significatives ?

Pour répondre aux questions de cette première partie portant sur le spectre des sources LEDs, une expérience psycho-visuelle en laboratoire a été développée, elle est décrite ci-après dans la partie « 2 Expérience psycho-visuelle (section courante) ». Elle s'appuie sur une maquette de tunnel dans laquelle seulement l'éclairage de section courante a été reproduit. Les observateurs sollicités devaient noter la visibilité d'un objet situé sur la chaussée de la maquette selon différents spectres et différents niveaux de luminance présentés.

Dans un second temps, la capacité intrinsèque à la technologie LED de gradation du flux lumineux ouvre de nouvelles possibilités pour économiser de l'énergie en zone de renfort. En effet, les sources utilisées en zone d'entrée en tunnel étaient principalement des sources sodium (SHP) avant l'arrivée massive de la technologie LED sur le marché. Ces sources permettaient relativement peu de souplesse, que ce soit en termes de forme, de photométrie ou de gradation du flux lumineux. Or, comme le dimensionnement est fait pour des hypothèses majorantes en termes de sécurité, c'est-à-dire que les conditions de référence choisies sont défavorables, l'installation une fois dimensionnée ne pouvait pas s'adapter aux besoins réels. L'arrivée des sources LEDs et de leur grand panel de photométries différentes, de leur taille adaptable et de leur flux gradable, a ainsi permis d'optimiser grandement l'adaptabilité de l'installation.

Au vu des éléments apportés ci-dessus, les problématiques suivantes se posent logiquement.

RQ4. Sur quels paramètres les installations de renfort pourraient être asservies afin de maximiser les économies d'énergie possibles ?

RQ5. Quelles économies d'énergie sont imputables aux différents asservissements ainsi mis en place ?

Afin d'investiguer ces deux questions, un travail de simulation informatique a été réalisé sur la tranchée couverte d'Antony. L'ouvrage, ainsi que les tenants et aboutissants de cette étape de modélisation sont présentés dans la partie « 3 Projet DELTA, modélisation dynamique (zone de renforcement) ».

2. EXPÉRIENCE PSYCHO-VISUELLE (SECTION COURANTE)

2.1 Contexte et état des lieux scientifique

La variété de spectres disponibles encourage les scientifiques à tenir plus précisément compte du rôle de chaque type de photorécepteur, afin de choisir la distribution spectrale la plus efficace pour offrir un compromis idéal entre confort, visibilité et économies d'énergie. Actuellement, 5 types de photorécepteurs sont considérés par la communauté scientifique : les bâtonnets (vision scotopique), les cônes L-M-S (vision photopique) et les CGRips. Les CGRips sont les Cellules Ganglionnaires Rétiniennes intrinsèquement photosensibles qui ont été découvertes il y a seulement 20 ans (Berson, Dunn, et Takao 2002). Ces cellules contiennent un photopigment appelé mélanopsine. Elles sont connues pour leurs effets non-visuels (notamment pour leur rôle sur la régulation des rythmes circadiens), tandis que leur impact visuel direct est moins clair (Zele, Feigl, et al. 2018). La Figure 1 présente la sensibilité relative spectrale de chacun des types de photorécepteurs énoncés ci-dessus (CIE 2018).

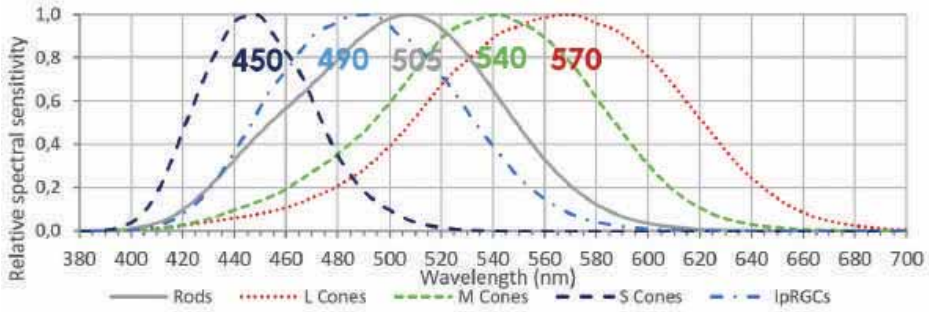


Figure 1 Sensibilité spectrale relative des photorécepteurs humains. Les nombres indiqués donnent la longueur d'onde (en nm) correspondant au maximum de sensibilité de la courbe.

Les recommandations actuelles pour le dimensionnement de l'éclairage des tunnels routiers imposent des niveaux de luminance basés sur la fonction d'efficacité lumineuse spectrale pour la vision photopique, même en section courante où les niveaux de luminance sont relativement faibles (entre 1 et 15 cd/m^2) (CIE 2004; CEN 2006; CETU 2000). Cependant, plusieurs études ont montré que, pour ces niveaux de luminance, la fonction photopique n'était pas nécessairement la plus adaptée pour décrire la vision des conducteurs (Yong et al. 2011). Par conséquent, ces études introduisirent un domaine de vision transitoire entre scotopique et photopique dans lequel les cônes et les bâtonnets sont stimulés simultanément : la vision mésopique. Les limites hautes et basses de ce domaine varient d'un modèle à l'autre (Rea et al. 2004; Eloholma et Halonen 2005), mais le modèle intermédiaire développé par la CIE (CIE 2010) indique des limites basse et haute de 0.005 cd/m^2 et 5 cd/m^2 respectivement. On notera que pour ces limites, de nombreuses sections courantes de tunnels sont concernées, cela signifiant que les niveaux de luminance mesurés pour ces zones ne représentent pas de manière fidèle la perception des conducteurs. En effet, les bâtonnets ne sont pas pris en compte dans la vision photopique, alors qu'ils jouent vraisemblablement un rôle dans le processus de vision pour des niveaux lumineux faibles.

Les conditions mésopiques modifient la valeur de luminance pour des faibles niveaux lumineux, du fait qu'elles prennent en compte le rôle des bâtonnets dans le processus de vision. Elles sont plus précises puisqu'elles considèrent ce processus de manière plus complète, physiologiquement parlant. Ainsi, il semble logique d'investiguer l'influence d'autres photorécepteurs afin de réduire encore l'écart entre grandeurs photométriques et perception des utilisateurs. Ces photorécepteurs récemment étudiés pour leur potentiel impact direct sur la vision sont les CGRips. Des études ont en effet montré leur rôle sur le réflexe pupillaire et sur la perception de luminosité (Gamlin et al. 2007; Zaidi et al. 2007; McDougal et Gamlin 2010; Brown et al. 2012). Les résultats obtenus ont montré qu'une excitation mélanopique accrue résultait en une augmenta-

tion de la luminosité perçue par l'observateur (Zele, Adhikari, et al. 2018). Ils montrèrent également que l'impact des CGRips se faisait principalement ressentir dans le champ de vision périphérique (Esquiva et al. 2017; Zele, Feigl, et al. 2018).

Il est à noter que les niveaux de luminance présentés aux observateurs pour les stimuli lumineux utilisés dans les expériences citées précédemment étaient supérieurs à 100 cd/m^2, et qu'aucune d'entre elles ne s'est intéressée à l'impact des CGRips sur la tâche de conduite. Or, plusieurs études tendent à montrer un impact direct de ces cellules sur le processus de vision, ce qui signifie qu'elles pourraient modifier les performances visuelles des conducteurs. C'est donc dans le but de combler ces lacunes qu'une expérience psycho-visuelle a été montée en laboratoire. Le protocole associé et les résultats obtenus sont détaillés ci-après.

2.2. Panel

Quarante-huit participants ont été sollicités pour cette expérience (25 femmes et 23 hommes), ils étaient âgés de 19 à 29 ans (Moyenne = 22.2, ET = 2.6). Deux tests visuels étaient réalisés avant l'expérience afin de mesurer les performances visuelles des participants : le test d'Ishihara pour la vision des couleurs et un test d'acuité visuelle en conditions photopiques à 3.5m (Echelle à main de Parinaud pour illettrés). Tous les participants ont signé un formulaire de consentement avant le début des tests et ils ont tous été indemnisés à l'issue de ces derniers. La durée de la phase d'observation pour chaque sujet était d'approximativement une heure.

2.3. Matériel et méthode

Maquette de tunnel

Une maquette de tunnel à l'échelle 1/20 (tube unidirectionnel avec deux voies) a été conçue pour cette expérience. Le choix d'une maquette a été fait plutôt que celui de simulations sur écran pour deux raisons principales : (1) Pour créer des conditions de visibilité proches de la réalité (meilleure immersion, l'environnement lumineux est reproduit fidèlement) et (2) pour s'assurer que les observateurs seraient exposés à des spectres réels (plus difficile sur écran). Les dimensions du tunnel et les conditions d'observation de la cible sont données en Figure 2.

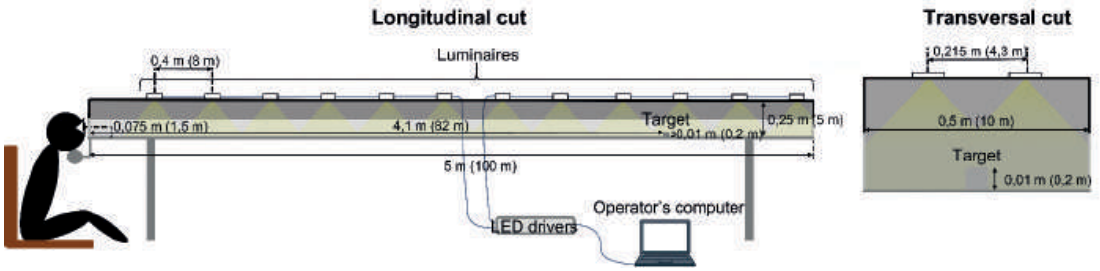


Figure 2 Dispositif expérimental. Les dimensions du tunnel réel théorique sont données entre parenthèses. Les autres dimensions sont celles de la maquette

Les observateurs s'asseyaient sur une chaise (zaisu) et regardaient directement à l'intérieur du tunnel. Leurs yeux étaient situés à 7.5 cm au-dessus de la chaussée, cette valeur était maintenue constante grâce à une mentonnière. La maquette était éclairée par 2 rangées de 12 LEDs « Chips On Board » (COB) LZ7 04M100 de la marque LED Engin, faisant office de luminaires. Un moteur pas-à-pas était placé sous la maquette, sur lequel 4 différentes cibles étaient fixées (un carré, un triangle, un rond, et une étoile, voir Figure 3). Le moteur était contrôlé à distance afin de choisir quelle cible était présentée dans le tunnel. Il était également possible de ne montrer aucune cible (position entre deux cibles). Les surfaces des cibles étaient maintenues constantes et égales à 1 cm^2. La Figure 3 montre la cible carrée à l'intérieur du tunnel.

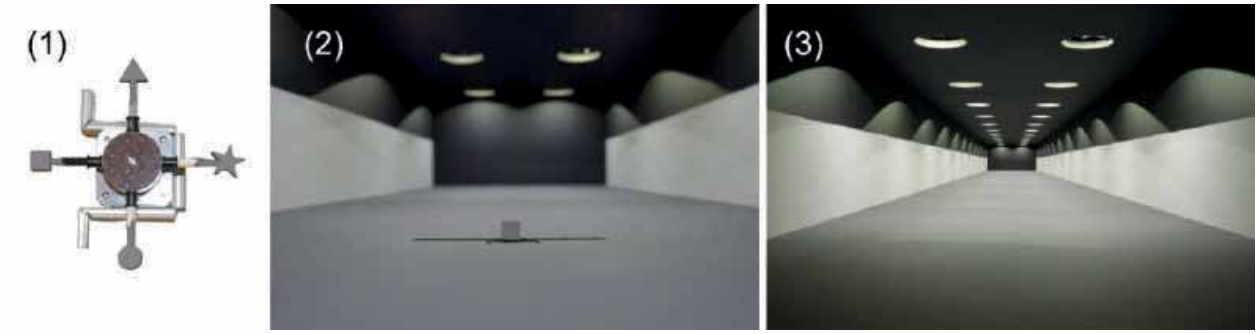


Figure 3 (1) Cibles utilisées dans l'expérience. (2) Cible carrée dans le tunnel (vue proche). (3) Vue depuis la position de l'observateur

Stimuli lumineux

Sans précision supplémentaire, les termes « luminance » et « éclairement » font référence à des luminances ou des éclairements photopiques.

Les COB LZ7 04M100 sont composées de sept puces LEDs différentes (rouge, vert, bleu, blanc à 6500 K, ambre, cyan et violet) qui peuvent être contrôlées individuellement pour créer une large gamme de spectres différents. En l'occurrence, six spectres ont été créés pour cette expérience. Trois d'entre eux représentaient des spectres de SHP, de LED blanche à 3000 K et de LED blanche à 5000 K. Ils étaient créés pour répondre à la problématique du passage de sources SHP à des sources LEDs blanches (RQ1). Pour créer ces spectres, nous nous sommes appuyés sur les coordonnées trichromatiques associées aux spectres de Planck typiques de chaque température de couleur (2000K, 3000K et 5000K). Ensuite, une échelle logarithmique de 45 paliers d'éclairement a été créée entre 0 et 410 lx (valeur maximale d'éclairement que nous avons pu atteindre sur la chaussée avec les LEDs). Les valeurs de coordonnées trichromatiques théoriques de chaque spectre étaient ajustées pour chacun de ces paliers (Y est l'éclairement et reste par conséquent théoriquement constant d'un spectre à l'autre).

Les trois autres spectres étaient des métamères des trois premiers. Ils ont été créés afin d'investiguer l'impact de la mélanopsine sur la visibilité pour des niveaux lumineux faibles (RQ2). Ces trois spectres étaient créés grâce à un programme d'optimisation Matlab. Ce dernier permettait de trouver les spectres métamères qui essaient de reproduire le plus fidèlement possible les valeurs de coordonnées trichromatiques (moyennes des différences pour tous les paliers d'éclairement et tous les spectres = -0.6% ; écart-type des différences = 6.5%) et d'indice de fidélité des couleurs R_f (moyenne des différences pour tous les paliers d'éclairement et tous les spectres = -9.9% ; écart-type des différences =9.6%) d'un spectre de référence, tout en maximisant son potentiel d'excitation mélanopique (jusqu'à deux fois plus élevé pour le spectre SHP). Les spectres de référence étaient appelés « spectres à faible excitation mélanopique » (LM), et les spectres qui maximisaient le potentiel d'excitation mélanopique étaient appelés « spectres à forte excitation mélanopique » (HM). Les trois spectres créés pour investiguer RQ1 sont les spectres LM. Les six spectres au palier d'éclairement maximal sont présentés en Figure 4.

Pour résumer, chaque spectre était présenté à 45 paliers d'éclairement différents et la création de ces stimuli visait à remplir deux objectifs : atteindre le niveau d'éclairement fixé pour le palier considéré, et conserver une distribution spectrale relative constante. La limite haute des paliers d'éclairement correspondait au maximum atteignable par tous les spectres (410 lx sur la route, juste devant la cible). La limite basse correspondait à une absence totale de lumière. Les niveaux intermédiaires décrivaient une échelle logarithmique entre les limites basse et haute. Le choix d'une telle échelle a été fait car la perception de luminance de l'œil humain est plutôt bien décrite par la fonction logarithmique.

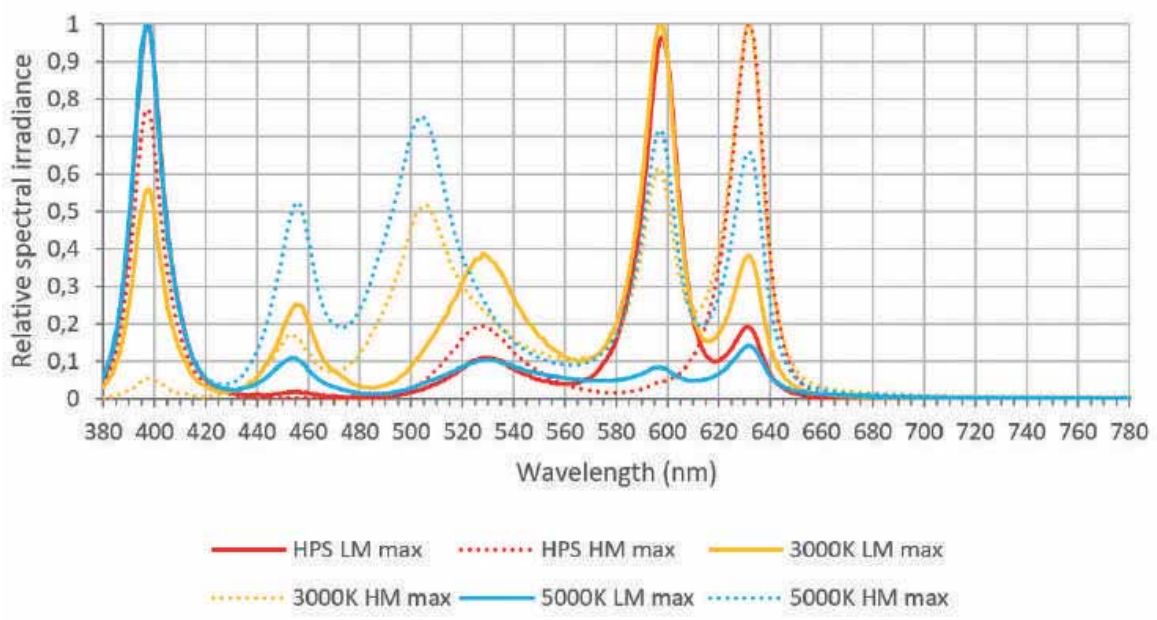


Figure 4 Eclairement énergétique spectral relatif des six spectres au palier d'éclairement maximal

La distribution de luminance sur les surfaces à l'intérieur de la maquette a été mesurée pour les 45 paliers d'éclairement des six spectres, en utilisant un photo luminancemètre LMK-5L-5MP (n°TTF8625, étalonné en avril 2020). La cible présentée pendant les mesures était la cible carrée. Ces mesures ont été utilisées pour déterminer les luminances sur la chaussée et sur la cible. Les valeurs de luminance de chaussée pour les 45 paliers d'éclairement allaient de 0 à environ 20 cd/m^2.

Protocole expérimental

Pendant l'expérience, les différents paliers d'éclairement, pour un même spectre, étaient vus alternativement par les observateurs dans un ordre croissant (également appelé montée dans la suite) et dans un ordre décroissant (également appelé descente dans la suite). Les montées débutaient dans le noir total pendant 1 minute, afin de permettre une adaptation partielle de l'œil des observateurs aux faibles niveaux lumineux. Ensuite, les différents paliers d'éclairement étaient présentés successivement du minimum de luminance jusqu'au maximum. Chaque palier durait 4 secondes avant de passer au suivant. La montée (ou la descente) prenait 3 minutes pour couvrir la plage de luminance 0 – 20 cd/m^2. Une fois le palier maximum atteint et présenté pendant 4 secondes, la montée touchait à sa fin et le programme de présentation des stimuli poursuivait avec une descente. Cette descente pouvait avoir le même spectre que la montée précédente, ou elle pouvait en présenter un nouveau (l'ordre de présentation des différents spectres était contrebalancé pour éviter les impacts associés à un effet d'ordre sur les résultats). Le palier d'éclairement de cet éventuel nouveau spectre était présenté pendant 1 minute pour assurer une adaptation chromatique partielle de l'œil de l'observateur, puis les différents paliers d'éclairement étaient présentés dans un ordre décroissant jusqu'à ce que l'observateur soit à nouveau plongé dans le noir. Ensuite, une nouvelle montée démarrait, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'expérience soit terminée.

Une cible était associée à chaque montée et chaque descente. La cible ne changeait pas avant que la montée ou la descente ne soit terminée. Elle pouvait changer après cela, quand le programme entamait une nouvelle montée ou une nouvelle descente.

Le principal but de cette expérience était de comparer les performances visuelles des observateurs pour les six spectres différents. Dans notre étude, les performances visuelles signifiaient la capacité des observateurs à identifier un obstacle sur la chaussée. Afin de mesurer ces performances, nous avons choisi d'utiliser une

échelle de visibilité présentée en Tableau 1. Cette échelle comprend cinq seuils de visibilité, qui peuvent être vus à la fois en montée et en descente. Ils étaient atteints par les observateurs dans le même ordre que celui présenté dans l'échelle de visibilité. En pratique, la montée ou la descente démarrait et l'observateur arrêtait l'opérateur quand il jugeait qu'il avait atteint le seuil de visibilité qu'il était supposé reconnaître. L'opérateur enregistrait le numéro du palier d'éclairement correspondant et relançait ensuite la montée ou la descente. L'observateur l'arrêtait à nouveau pour le prochain seuil de visibilité et ainsi de suite.

Tableau 1 Echelle de visibilité

Seuil de visibilité	Intitulé pour les montées	Description détaillée pour les montées	Intitulé pour les descentes	Description détaillée pour les descentes
VT1	Cible juste perceptible	L'observateur distingue un point singulier sur la chaussée mais ne peut affirmer avec précision qu'il s'agit d'un obstacle.	Disparition de l'objet	L'observateur ne voit plus du tout la cible.
VT2	Cible discernable	L'observateur est certain que le point singulier cité précédemment s'avère être un obstacle.	Présence incertaine	L'observateur ne peut affirmer avec certitude que le point singulier qu'il distingue est un objet.
VT3	Cible reconnaissable	L'observateur pense reconnaître la forme de l'objet, il n'en est cependant pas sûr à 100%.	Forme non reconnaissable	L'observateur ne parvient plus à identifier la forme de l'objet.
VT4	Bonne visibilité de la cible	La forme de l'objet est formellement identifiée par l'observateur, il n'y a pas de doute possible.	Conditions de visibilité dégradées	L'observateur n'est plus sûr et certain de la forme de l'objet, mais il pense la distinguer tout de même.
VT5	Excellente visibilité de la cible	L'observateur distingue bien tous les détails de la scène, sa visibilité est excellente et un apport de lumière ne lui semble pas nécessaire (puisque ce dernier n'apporterait pas grand-chose en termes de visibilité).	Bonne visibilité de la cible	L'observateur perd son excellente visibilité, il sent que quelques détails de la scène lui échappent.

Les étapes de passage des observateurs sont résumées ci-dessous. Une fois les tests de vision effectués et les instructions relatives à l'expérience données, ils s'asseyaient sur le zaisu en face du tunnel et participaient à un entraînement pour tester leur compréhension de l'expérience. Ils assistaient à une montée et une descente spécifiquement créées pour cet entraînement (le spectre était différent de ceux utilisés par la suite dans l'expérience). La cible carrée était toujours utilisée pendant ces entraînements. Ensuite l'expérience démarrait : les observateurs voyaient alternativement une montée et une descente, exception faite des deux derniers stimuli qui étaient deux montées. Sans compter l'entraînement, les observateurs voyaient un total de 8 montées et 6 descentes. Les descentes étaient les 6 spectres différents associées à une cible, et les montées étaient les 6 spectres différents associés à une cible, plus un de ces 6 spectres présentés sans cible (pour tester la compréhension de VT1) et une répétition de la première montée avec une cible (pour tester la répétabilité de l'expérience). Pour chaque observateur, un spectre était associé à une unique cible : cela signifie que quand ce même spectre était vu en montée et en descente, la même cible était présentée dans le tunnel pour minimiser l'impact de la forme de la cible sur les résultats. La montée redondante finale présentait la même cible que la montée initiale qu'elle copiait.

Il est à noter que l'ordre de présentation des spectres était contrebalancé afin d'éviter un impact d'un effet d'ordre sur les résultats. De la même façon, l'association cible / spectre était également contrebalancée pour éviter un impact de la forme de la cible sur les résultats.

2.4. Résultats

L'analyse statistique des résultats collectés s'appuie sur un modèle mixte (Khi-deux de type II de de Wald) (Knoblauch et Maloney 2012) qui permet d'évaluer la significativité de l'impact de différents facteurs, sur la valeur de luminance à laquelle le seuil de visibilité étudié était atteint par l'observateur. Un test post hoc de Tukey était ensuite utilisé afin de détailler l'impact entre deux modalités d'une même variable. L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel Rstudio.

Une observation (c'est-à-dire une montée ou une descente vue par un observateur) comporte 10 variables : « Sujets » qui indique le numéro de l'observateur, « Mélanopsine » qui indique si le spectre est un spectre excitant faiblement la mélanopsine (LM) ou excitant fortement la mélanopsine (HM), « Température de couleur » qui indique la température de couleur du spectre (2000K, 3000K ou 5000K), « Montée / Descente » qui indique si le spectre a été vu pour des niveaux de luminance croissants ou décroissants, « Cible » qui indique la forme de la cible présentée, et 5 variables « VT1 », « VT2 », …, « VT5 » qui indique la luminance de chaussée pour laquelle le seuil considéré a été atteint par l'observateur (entre 0 et 22.7 cd/m^2).

Ensuite, une analyse statistique spécifique a été conduite pour chaque seuil de visibilité. Pour ces analyses, on a cherché à déterminer quel impact avaient les variables « Température de couleur », « Montée / Descente » et « Mélanopsine » sur les résultats obtenus pendant l'expérience et stockés dans les variables « VT1 », « VT2 », …, « VT5 ».

Les résultats de ces analyses sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 Significativité des résultats de l'analyse statistique (p-value<0.001 (***) et p-value<0.01 (**))

Seuil de visibilité	Variable	Significativité du modèle mixte (p-value)	Comparaison du test post hoc	Significativité du test post hoc (p-value)
VT1	Température de couleur	2.02e-05 (***)	2000 K – 3000 K	8e-03
			2000 K – 5000 K	<1e-04
			3000 K – 5000 K	>0.05
	Montée / Descente	2.73e-06 (***)		
VT2	Température de couleur	4.03e-05 (***)	2000 K – 3000 K	4.5e-03
			2000 K – 5000 K	<1e-04
			3000 K – 5000 K	>0.05
	Montée / Descente	5.61e-08 (***)		
VT3	Température de couleur	5.68e-03 (**)	2000 K – 3000 K	>0.05
			2000 K – 5000 K	4.4e-03
			3000 K – 5000 K	>0.05
	Montée / Descente	1.68e-10 (***)		
VT4	Température de couleur	>0.05		
	Montée / Descente	1.73e-05 (***)		
VT5	Température de couleur	>0.05		
	Montée / Descente	3.33e-12 (***)		

La variable « Mélanopsine » n'a pas montré d'impact significatif sur les résultats, quel que soit le seuil de visibilité considéré.

Les résultats obtenus pour la variable « Montée / Descente » sont bien connus de la communauté scientifique et nous intéressent peu ici.

La luminance moyenne pour chaque température de couleur, correspondant aux différents seuils de visibilité, est présentée dans le Tableau 3. Les résultats montrent que les 3 premiers seuils de visibilité sont atteints pour une luminance de chaussée plus faible quand la température de couleur diminue. Il est à noter que la comparaison 3000 K – 5000 K n'a pas montré de différence significative, quel que soit le seuil de visibilité considéré. Enfin, l'impact de la température de couleur sur la visibilité est significatif seulement pour les 3 premiers seuils.

Tableau 3 Luminances moyennes pour chaque catégorie de température de couleur, chaque seuil de visibilité et chaque spectre (SD = Standard Deviation = Ecart type divisé par la racine carrée du nombre d'observations)

Seuil de visibilité	SHP-2000K (luminance de chaussée en cd/m²)	LED-3000K (luminance de chaussée en cd/m²)	LED-5000K (luminance de chaussée en cd/m²)
1	0.1 (SD=0.009)	0.13 (SD=0.013)	0.15 (SD=0.013)
2	0.35 (SD=0.024)	0.45 (SD=0.038)	0.49 (SD=0.042)
3	0.81 (SD=0.059)	0.94 (SD=0.069)	1.02 (SD=0.073)
4	2.08 (SD=0.132)	2.27 (SD=0.141)	2.35 (SD=0.136)
5	6.03 (SD=0.26)	6.14 (SD=0.296)	6.18 (SD=0.265)

2.5. Discussion

Explications des résultats

Comme mentionné précédemment, les résultats obtenus pour la variable « Montée / Descente » sont connus de la communauté scientifique et ne seront pas plus particulièrement étudiés dans cette section.

Néanmoins, les résultats ont également montré un impact de la variable « Température de couleur » pour les trois premiers seuils de visibilité. Il s'est avéré que pour une valeur de luminance de chaussée comprise entre 0.1 et 1 cd/m², plus la température de couleur de la source était faible et meilleures étaient les performances visuelles des observateurs. Ce résultat ne correspond pas aux observations habituellement faites dans la littérature concernant des études comparatives entre sources de température de couleur élevée et faible. En effet, la plupart des résultats obtenus par les autres auteurs ont montré la tendance inverse. Cependant, ces études ont été principalement conduite en se basant sur des détections de cibles en champ de vision périphérique, que ce soit en éclairage routier classique (Bullough et Rea 2000) ou en éclairage de tunnel (He et al. 2017), tandis que notre expérimentation se base sur une observation en champ de vision central. Pour des conditions d'expérimentations similaires, certains auteurs ont trouvé des résultats semblables aux nôtres (Bisketzis, Bouroussis, et Topalis 2009). L'hypothèse explicative pour justifier ces résultats est la suivante : les niveaux de luminance pour lesquels les résultats significatifs de la variable « Température de couleur » ont été observés étaient dans le domaine scotopique ou mésopique (CIE 2010). Cela signifie que les bâtonnets jouaient un rôle dans le processus de vision à ces niveaux lumineux, et n'étaient pas saturés. Ainsi, pour simplifier, plus la température de couleur de la source sera élevée et plus les bâtonnets seront sollicités. De plus, comme ces photorécepteurs sont principalement localisés en périphérie de la rétine (Curcio et al. 1990), cela signifie que la scène va apparaître plus lumineuse à l'observateur dans son champ de vision périphérique. D'un autre côté, comme la densité de bâtonnets est très faible dans la fovéa, l'augmentation de luminosité perçue par l'observateur dans son champ de vision central ne sera pas aussi importante que celle de son champ de vision périphérique. En conséquence, il est possible que cette augmentation de luminosité perçue

en champ de vision périphérique joue le rôle d'une pseudo luminance de voile qui détériorerait le contraste perçu de la cible. Cette hypothèse pourrait expliquer les résultats obtenus dans cette expérience : les spectres présentant des températures de couleur plus élevées vont affecter les performances visuelles des observateurs dans leur champ de vision central en produisant une luminance de voile plus élevée dans leur champ de vision périphérique.

Ces résultats indiquent que le passage de sources SHP à des sources LEDs pourrait avoir un impact sur la visibilité des conducteurs dans leur champ de vision central pour des niveaux de luminance de chaussée inférieurs à 1 cd/m^2. Cet impact dépend de la température de couleur de la source LED utilisée : plus elle sera élevée, et plus les performances visuelles des conducteurs seront dégradées.

Les résultats ont également montré que l'excitation des CGRips n'avait pas un impact significatif sur la visibilité des observateurs pour les niveaux lumineux (de 0 à environ 20 cd/m^2 sur la chaussée) et les conditions d'observation (champ de vision central) considérés.

Applicabilité des résultats en conditions réelles

Les résultats obtenus durant l'expérience et détaillés en Tableau 3 ne tiennent pas compte de l'impact du facteur de transmission du pare-brise (τ_pb) sur la luminance de chaussée perçue par les observateurs. Afin que les luminances perçues soient égales aux valeurs obtenues grâce à l'expérience, les luminances de chaussée réelles mises en œuvre doivent être égales aux résultats de l'expérience divisés par τ_pb=0.8 (CIE 2004). Le Tableau 4 résume les valeurs de luminances de chaussée réelles à mettre en œuvre pour les seuils de visibilité susceptibles d'assurer la sécurité des usagers (VT4 et VT5).

Tableau 4 Niveaux de luminance de chaussée à mettre en œuvre d'après les résultats de l'expérience

Variable	Modalité	Luminance de chaussée (cd/m^2)	
		VT4 (conditions de sécurité)	VT5 (plateau de visibilité)
Moyenne totale		2.8	7.6
Température de couleur	2000K	2.6	7.5
	3000K	2.8	7.7
	5000K	2.9	7.7

Les résultats obtenus semblent cohérents avec les recommandations faites par le CETU ou la CIE en ce qui concerne les niveaux de luminance de chaussée en section courante de tunnels. On peut néanmoins noter que les niveaux les plus élevés recommandés par la CIE sont supérieurs au plateau de visibilité trouvé dans l'expérience. Tous les résultats obtenus sont résumés en Figure 5.

Les résultats de l'expérience ont montré que l'impact de la température de couleur était significatif pour des niveaux de luminance de chaussée allant jusqu'à 1 cd/m^2, et que les températures de couleur plus faibles offraient de meilleures conditions de visibilité. De telles niveaux sont éventuellement observables de nuit dans certains ouvrages, mais les potentielles économies d'énergie qui pourraient en résulter ne sont pas évidentes. En effet, les gains associés à la baisse des niveaux de luminance sur la chaussée en utilisant des LEDs de température de couleur plus faibles, doivent être comparés aux pertes associées à la moins bonne efficacité lumineuse de la technologie (pour des sources LEDs, une température de couleur plus faible vient avec une dégradation de l'efficacité lumineuse) (Morgan Pattison, Hansen, et Tsao 2018). Ainsi, au regard des observations précédentes, les économies d'énergie potentielles seraient vraisemblablement très faibles.

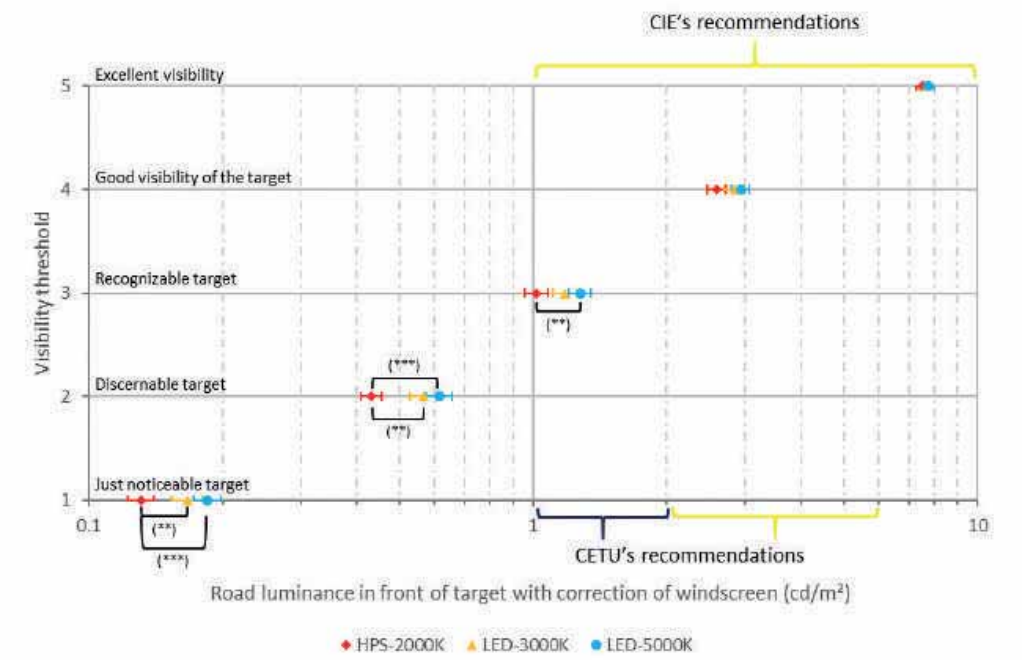


Figure 5 Luminances de chaussée photopiques moyennes (telles que vues par le conducteur au travers d'un pare-brise) en face de la cible (située au milieu de la chaussée) pour les différentes températures de couleur et chaque seuil de visibilité. La significativité des résultats du test post hoc est indiquée (p-value<0.001 (***) et p-value<0.01 (**)). Les accolades bleu foncé indiquent les recommandations nocturnes et les accolades jaunes indiquent les recommandations diurnes

3. PROJET DELTA, MODÉLISATION DYNAMIQUE (ZONE DE RENFORCEMENT)

3.1 Présentation du projet

La DiRIF, le Cluster Lumière, Lombardi, SDEL, Comatelec Schréder, le CETU, Phoenix Contact et le CEREMA se sont associés en créant un consortium d'acteurs du monde des tunnels pour développer un démonstrateur grandeur nature sur l'éclairage LED des tunnels. L'opportunité de cette création est permise par la mise à disposition du tube sud non circulé de la tranchée couverte d'Antony, exploitée par la Direction des Routes d'Île-de-France (DiRIF). La configuration du site, l'exposition Est-Ouest, la largeur et la hauteur importante (16.5 m et 6.5 m respectivement), ainsi que sa profondeur de 260 m en font un espace particulièrement propice à la réalisation de diverses expérimentations. Sur les 80 premiers mètres de ce tube non circulé, la chaussée a été entièrement rénovée et les marquages au sol ont été refaits. Le consortium profite des travaux réalisés dans le tube nord par un de ses acteurs (SDEL) afin d'équiper le tube expérimental et de mettre notamment en place les luminaires fournis par Comatelec.

Actuellement, les enjeux identifiés dans ce projet et qui feront l'objet d'expérimentations sont les suivants :

- Mettre à jour la doctrine sur l'éclairage portée par le CETU, en intégrant notamment de manière plus approfondie l'impact de la LED sur les recommandations ;
- Développer des produits performants et répondant aux exigences du CETU ;
- Travailler sur les économies d'énergie envisageables en tunnel pour les zones de renfort, en tirant parti des propriétés intrinsèques à la technologie LED.

Cet article se concentrera principalement sur le dernier point, en réalisant un focus sur une étude théorique des économies d'énergie envisageables, menée dans le cadre de travaux de thèse.

Figure 6 Portion du tube non exploité de la tranchée couverte d'Antony dont la chaussée a été rénovée

Une liste d'expérimentations a été constituée par les acteurs du projet en fonction des attentes et besoins de chacun. Elles ont ensuite été hiérarchisées par consensus entre tous les membres du consortium. Les thèmes envisagés sont notamment la validation des profils de décroissance de luminance mis en place par le CETU, l'évaluation des gains d'énergie liés à l'asservissement à la vitesse de l'installation de renfort, l'impact de l'indice de rendu des couleurs, … A ces expériences initiales axées sur l'éclairage, d'autres possibilités viendront potentiellement s'ajouter à plus long terme : des travaux sur la Détection Automatique d'Incidents (DAI), sur les protocoles de communications en tunnel, …

3.2. Contexte et recommandations actuelles

Au vu des hypothèses prises pour le dimensionnement, les luminances de voile prises en compte sont plus élevées que celles rencontrées en pratique sur la majeure partie de l'année, et la vitesse utilisée pour le dimensionnement est la vitesse limite sur la portion de route considérée. Du fait que les sources SHP ne pouvaient quasiment pas être gradées, la solution retenue pour adapter l'éclairage de renfort aux conditions de luminosité extérieure était l'allumage / extinction de ces sources. Cette méthode permettait d'abaisser les paliers initiaux de la zone de renfort dans le cas de jours moins ensoleillés notamment, mais elle n'offrait pas une grande variété de régime (2 ou 3 maximum) du fait que l'extinction de certaines sources venaient rapidement dégrader les niveaux d'uniformités de luminance sur la chaussée. La possibilité de gradation du flux lumineux des sources LEDs est venue bouleverser la méthode de pilotage des sources et de dimensionnement de l'installation, puisqu'elle permettait d'adapter le flux lumineux aux conditions de luminosité extérieure de manière beaucoup plus précise. Ainsi, les recommandations actuelles du CETU pour le dimensionnement et la gradation des installations d'éclairage LED de renfort sont les suivantes : l'installation de renfort est asservie aux conditions de luminosité extérieures par le biais d'un luminancemètre mesurant le L_{20} (luminance moyenne dans un cône de 20° d'ouverture centré sur le portail d'entrée du tunnel considéré) aux abords du tunnel. En pratique, cet asservissement est réalisé par paliers de 10% de la courbe de décroissance initiale (par exemple, si le L_{20} mesuré par le luminancemètre vaut 85% du L_{20} de référence pris en compte dans le dimensionnement de la zone de renforcement, alors toutes les valeurs de la courbe de décroissance sont égales à 90% des valeurs de la courbe initiale).

Cet asservissement plus précis à la luminance est une première étape pour réaliser des économies d'énergie sur les installations de renfort. Cependant, d'autres paramètres rentrent en ligne de compte dans le calcul de la courbe de besoins de luminance, et un asservissement de l'installation à ces derniers pourrait permettre de diminuer encore les consommations énergétiques. Des études ont été menées sur ce sujet et notamment sur un autre paramètre relativement simple à prendre en compte : la vitesse de trafic. Certaines de ces études ont été menées par simulations informatiques (Shuguang 2015; Salata et al. 2016; Zhao, Feng, et Yang 2021) et d'autres directement sur le terrain (Zeng et al. 2011).

3.3. Développement du modèle de simulation dynamique

Dans le cadre des travaux de thèse intitulés « Mesures des champs de luminance en tunnel, développement d'éclairages économes en énergie, confortables et sûrs pour l'usager », une phase de modélisation informatique a été réalisée. L'objectif était de reproduire les conditions de dimensionnement et d'exploitation d'un tunnel, puis de proposer différents scénarios d'éclairage afin d'investiguer de potentielles sources d'économies d'énergie tout en assurant la sécurité des conducteurs. Le choix de cette étape de modélisation s'est donc porté sur la tranchée couverte d'Antony, puisque les résultats obtenus par simulation pourraient être, à terme, testés directement sur le tube expérimental. En pratique, le modèle dynamique vise à produire une simulation de l'éclairage dans un tunnel sur un an. Cette simulation doit en outre permettre de prendre en compte les variations climatiques (variations de conditions lumineuses aux abords du tunnel), ainsi que les variations de trafic (vitesse, débit de véhicules). Un des buts recherchés est notamment d'évaluer la consommation énergétique annuelle de plusieurs scénarios d'éclairage appliqués à la tranchée couverte d'Antony. Un des scénarios est dit de référence et reprend des règles de dimensionnement et de pilotage pouvant actuellement être mises en œuvre sur des ouvrages en circulation. Les autres scénarios viennent proposer des variations par rapport à ces règles et permettent d'évaluer les écarts en termes de consommations énergétiques qui en découlent.

Le modèle s'appuie sur de nombreux éléments d'entrée pour déterminer les besoins de luminance de chaussée pour la zone de renforcement, la luminance de chaussée réelle produite par l'installation, ainsi que les consommations énergétiques de cette dernière. La première étape est donc la détermination de la courbe de besoin. Plusieurs méthodes existent pour cela, on citera notamment les méthodes L_{seq}, L_{20} ou CETU (CIE 2004; CEN 2006; CETU 2000). En première approche, l'algorithme développé devait s'appuyer sur la méthode CETU telle que présentée dans le document « Méthode de dimensionnement de l'éclairage des tunnels routiers » (CETU 1998). Il est cependant apparu assez rapidement que l'absence de profil de décroissance de luminance prédéterminé, et l'utilisation d'un processus itératif dans le calcul des luminances de besoin, complexifiait grandement l'algorithme et risquait d'aboutir à des temps de calcul beaucoup trop longs. Il a donc été choisi de baser le modèle sur la méthode L_{seq} présentée dans le guide de la CIE de 2004, celle-ci prenant en compte un plus grand nombre de paramètres que la méthode L_{20}. L'objectif principal de ce modèle climatique est de déterminer un ordre de grandeur d'économie d'énergie imputable aux différents asservissements mis en place. Comme les procédés d'évaluation des luminances de voile restent relativement similaires d'une méthode de dimensionnement à l'autre, l'ordre de grandeur ainsi obtenu est vraisemblablement transposable pour les autres méthodes citées.

La méthode L_{seq} se base sur la prise en compte de trois luminances de voile distinctes : la luminance de voile équivalente (L_{seq}) due à l'environnement plus ou moins lumineux à l'approche d'un tunnel et perçu par le conducteur comme autant de sources éblouissantes, la luminance de voile d'atmosphère (L_{atm}) due à la dispersion de la lumière dans l'atmosphère dans toutes les directions, et la luminance de voile de pare-brise (L_{pb}) due à la dispersion de la lumière dans toutes les directions lorsque celle-ci traverse le pare-brise d'un véhicule.

Le guide de la CIE propose une méthode graphique pour l'évaluation de la luminance L_{seq}, et des valeurs fixes pour les luminances de voile d'atmosphère et de pare-brise.

La détermination de la luminance L_{seq} nécessite d'avoir une image du tunnel afin d'évaluer l'impact des différents éléments de décor dans le champ de vision du conducteur à l'approche de l'ouvrage. Ce modèle dynamique s'appuie sur des simulations physico-réalistes de la tranchée couverte d'Antony. Pour ce faire, l'ouvrage est dans un premier temps modélisé sous Sketchup, puis le modèle 3D est importé dans le logiciel OCEAN (logiciel de tracés de rayons générant des résultats physiques justes) afin de produire des images de l'entrée du tunnel, dont un exemple est donné en Figure 7.

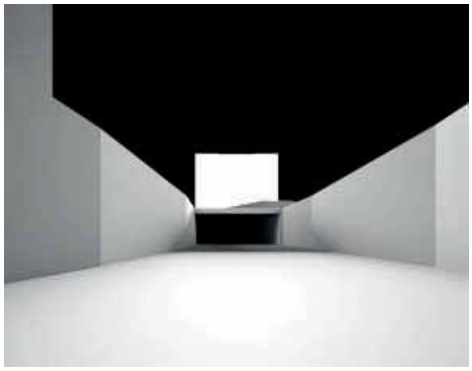


Figure 7 Représentation de l'entrée du tunnel sous OCEAN avec la 139ème zone de ciel allumée

En pratique, 145 simulations de l'entrée du tunnel sont produites sous OCEAN. Elles correspondent à une séparation de la voûte céleste telle que présentée dans la thèse de John Mardaljevic (Mardaljevic 1999). Ces 145 simulations constituent des données d'entrée dans l'algorithme utilisé pour déterminer le besoin en termes de luminance de chaussée dans le tunnel. Les autres éléments utilisés sont les conditions climatiques à l'année pour le site de la tranchée couverte d'Antony, les conditions de trafic pour la portion de route considérée, ainsi que les conditions de visibilité et d'état du sol. Toutes ces données ont été prises pour l'année 2019. La prise de vue des 145 simulations correspond à une caméra placée à la distance d'arrêt du portail d'entrée du tunnel, à une hauteur de 1.5 m. Cette distance d'arrêt est calculée selon l'équation 1.

$$DA = v * t_0 + \frac{v^2}{2*g*f(v)} \quad [1]$$

Avec DA la distance d'arrêt (m) ; v la vitesse ($m.s^{-1}$) ; t_0 le temps de réaction (s) ; g l'accélération de la pesanteur à la surface de la terre ($m.s^{-2}$) et f le coefficient de friction de la chaussée comme fonction de la vitesse. Pour le calcul de la distance d'arrêt de référence (position de la caméra dans les simulations), la vitesse correspond à une vitesse de 70 km/h (19.4 m/s), le temps de réaction est pris égal à 1 s, le coefficient de friction est pris pour une chaussée mouillée. La distance d'arrêt de référence est donc égale à 74.3 m.

Evaluation de la luminance de voile équivalente

Le fichier de conditions climatiques donne, tous les quarts d'heure, les valeurs de luminance des 145 zones de ciel. Ces données, combinées aux 145 simulations de l'entrée du tunnel faites pour chacune de ces zones de ciel, permettent de créer une vue de l'entrée correspondant aux conditions climatiques du moment. La méthode utilisée pour ce faire est présentée dans l'équation 2.

$$L_{pixel_{ij}} = \sum L_{pixel,ref_{kij}} * \frac{L_{ciel_k}}{L_{ciel,ref_k}} \quad [2]$$

Avec $L_{pixel\ ij}$ la luminance du pixel situé ligne i colonne j dans l'image résultant des conditions climatiques prises en compte ($cd.m^{-2}$) ; $L_{pixel,ref\ k\ ij}$ la luminance du pixel i,j pour la simulation de référence effectuée avec la zone de ciel k allumée ($cd.m^{-2}$) ; $L_{ciel\ k}$ la luminance moyenne de la zone de ciel k pour la condition climatique considérée (cd.m-2) ; $L_{ciel,ref\ k}$ la luminance moyenne de la zone de ciel k prise en compte dans les simulations ($cd.m^{-2}$).

Le calcul de L_{seq} se fait ensuite sur cette image recomposée en utilisant la formule de Styles-Holladay (Padmos 1984) présentée en équation 3.

$$L_{seq} = \sum(L_{pixel_{ij}} * \tau_{pb} + L_{atm} * \tau_{pb} + L_{pb}) * \Omega_{ij} * \frac{10 * \cos\theta_{ij}}{\theta_{ij}^2} \quad [3]$$

Avec τ_{pb} le facteur de transmission du pare-brise (pris égal à 0.8) ; Ω_{ij} l'angle solide sous lequel est vu le pixel i,j depuis la position d'observation (sr) ; θ_{ij} l'angle entre le centre de l'image et le pixel i,j (degré). Cette somme est faite pour des angles θ_{ij} compris entre 1 et 20°, les pixels ne correspondant pas à ce critère ne sont pas pris en compte dans le calcul.

L_{atm} et L_{pb} doivent donc être connus pour mener ce calcul à bien. Comme mentionné précédemment, le guide de la CIE indique des valeurs fixes pour l'évaluation de ces luminances de voile, ce qui n'est pas adéquat dans une optique d'asservissement de l'installation de renfort à la luminance extérieure. De la même manière, la méthode CETU s'appuie sur des constantes dépendant du niveau de voile pour évaluer ces deux grandeurs. Ces deux méthodes sont bien adaptées pour des dimensionnements, mais plus limitées dans le cadre d'un asservissement puisqu'elles sont discrétisées. Ainsi, notre choix s'est plutôt porté sur la méthode proposée par Padmos (Padmos 1984), présentée en équation 4 et 5. Ces expressions présentent l'avantage d'être des fonctions continues donnant des résultats plus adaptés dans le cadre d'un asservissement.

$$L_{atm} = \left(3.8 * \frac{DA}{V_m}\right) * L_0 * \left(1 + \frac{3.8 * 150}{V_m}\right) \quad [4]$$

Avec V_m la visibilité météorologique (m) ; L_0 la luminance moyenne dans un cône de 20° d'ouverture totale évaluée 150 m en amont de l'entrée du tunnel (cd.m-2).

$$\begin{cases} L_{pb} = \frac{(0.093 + 0.00018 * 40) * L_0 * \left(1 + \frac{3.8 * 150}{V_m}\right)}{40} * DA \quad si\ DA < 40m \\ L_{pb} = (0.093 + 0.00018 * DA) * L_0 * \left(1 + \frac{3.8 * 150}{V_m}\right) \qquad si\ DA \geq 40m \end{cases} \quad [5]$$

La luminance L_0 est évaluée à partir de l'image finale représentant les conditions de luminance du quart d'heure pris en compte dans le fichier climatique. Pour ce faire, l'angle d'ouverture de 20° à 150 m doit être adapté pour la distance d'arrêt utilisée dans les simulations. La relation 6 permet de répondre à cette problématique.

$$\theta_{DA} = \arctan\left(\frac{\tan 10 * 150}{DA}\right) \quad [6]$$

Avec θ_{DA} le demi-angle au sommet du cône à prendre en compte depuis la distance d'arrêt de référence, pour avoir un champ de vision équivalent à celui offert par le cône de demi-angle au sommet 10° à 150m.

Etablissement du profil de décroissance de luminance admissible dans l'ouvrage

La méthode L_seq s'appuie sur un profil de décroissance prédéterminé, présenté en Figure 8. Cette méthode est relativement simple puisqu'une fois la variable L_th évaluée, le besoin en luminance de chaussée en tous points de la courbe peut être calculé à partir de cette valeur.

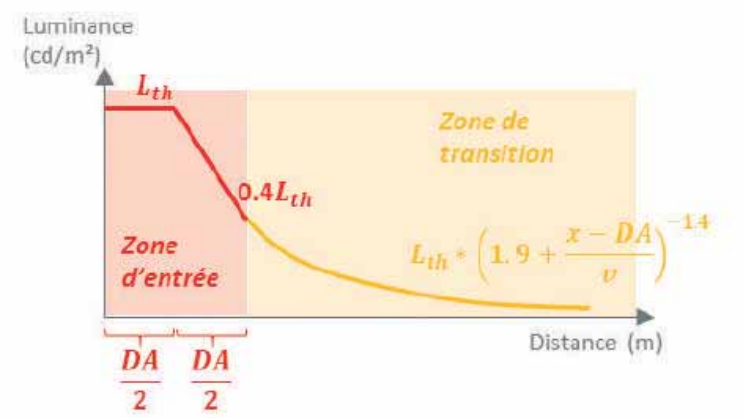


Figure 8 Profil de décroissance des niveaux de luminance utilisé par la CIE pour l'éclairage des tunnels routiers

La luminance de seuil (L_{th}) est calculée grâce à l'équation 7.

$$L_{th} = \frac{\tau_{ws} L_{atm} + L_{pb} + L_{seq}}{\left(\tau_{ws}\frac{\tau_{atm}}{C_m}\right)\left(\frac{\rho_t}{\pi q_c} - 1\right) - \tau_{ws}\tau_{atm}} \quad [7]$$

Avec τ_{atm} le facteur de transmission de l'atmosphère (pris égal à 1) ; C_m le seuil de contraste perçu (pris égal à -0.28) ; ρ_t le facteur de réflexion de la cible (pris égal à 0.2) ; q_c le paramètre de qualité de contraste (pris égal à 0.6 pour une installation contre-flux).

La courbe de décroissance de luminance admissible en fonction des conditions de luminances de voile peut ainsi être établie.

Modélisation des niveaux de luminance réels théoriques dans le tunnel pour les installations de renfort et de base

L'étape suivante de la modélisation est de déterminer les niveaux de luminance produits par l'installation d'éclairage pour répondre au besoin établi précédemment. Pour cela, de nouvelles modélisations sont menées sous OCEAN, le capteur utilisé n'est plus une caméra permettant de mesurer la luminance de chaque pixel de l'image, mais un capteur appelé « Surface light map » mesurant toutes les valeurs d'éclairement sur un matériau du modèle 3D choisi. La chaussée est segmentée en zones de mesure transversales de 40 cm de large et espacées de 2 m (première zone à 1 m du portail d'entrée). Une première simulation (présentée en Figure 9) permet de repérer la position des zones de mesure sur l'image résultante. Ensuite, une simulation est faite pour chaque rangée de luminaires de l'installation de renfort (62 rangées), et pour chacune de ces simulations, la valeur moyenne d'éclairement sur chaque zone de mesure est récupérée. Les résultats sont stockés dans un tableau de la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} E_{ref_{11}} & \cdots & E_{ref_{1n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{ref_{m1}} & \cdots & E_{ref_{mn}} \end{pmatrix}$$

, avec n le nombre de rangées de luminaires et m le nombre de zones de mesure.

Figure 9 Modélisation des valeurs d'éclairement sur la chaussée à l'intérieur du tunnel effectuée sous OCEAN. Les barres noires indiquent les zones de mesure prises en compte.

Afin de pouvoir comparer les besoins et les niveaux réels théoriques mis en place, le profil de décroissance de luminance admissible est converti en profil de décroissance des niveaux d'éclairement grâce à l'équation 8.

$$E = \frac{\pi}{c_{renf}} * L \quad [8]$$

Avec c_{renf} le coefficient de clarté de la chaussée (valable pour l'installation de renfort, pris égal à 0.24 (CETU 2000)).

Un algorithme développé sous Matlab permet ensuite d'optimiser le flux de sortie des luminaires de renfort afin d'obtenir des éclairements les plus proches possibles de ceux stipuler dans les besoins. Cet algorithme s'appuie sur la fonction 'fmincon' (minimum d'une fonction non linéaire à plusieurs variables avec contraintes), en cherchant le vecteur colonne x tel que la valeur $\sum_i \sum_j E_{ref\,ij} * x_j$ soit minimale, tout en vérifiant que

$$\begin{pmatrix} \sum_j E_{ref_{1j}} * x_j \\ \cdots \\ \sum_j E_{ref_{mj}} * x_j \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} E_{besoin_1} \\ \cdots \\ E_{besoin_m} \end{pmatrix}$$

Le vecteur x donne ainsi les facteurs correctifs à appliquer à chaque rangée de luminaires, afin d'obtenir les éclairements les plus performants possibles en termes de consommations énergétiques, tout en assurant la sécurité des usagers (c'est-à-dire que la courbe « réelle » des éclairements était supérieure à la courbe de besoin tout en en étant la plus proche possible).

Les éclairements effectivement mis en œuvre peuvent ensuite être reconvertis en niveaux de luminance à l'aide de l'équation 8. On peut ainsi comparer le besoin en luminance de chaussée et les niveaux produits par l'installation.

La même méthode que celle présentée ci-dessus est reproduite pour l'installation de base. Les luminances trouvées pour les deux installations sont ensuite sommées pour obtenir la luminance totale issue de l'éclairage artificiel pour les différentes zones de mesure.

Il est à noter que lorsque l'éclairement horizontal global donné dans le fichier climatique passe en dessous de 100 lx, l'installation de renfort est éteinte et le tunnel bascule en régime nuit.

Calcul des consommations énergétiques de l'installation de renfort

La formule de calcul pour les consommations énergétiques s'appuie sur le ratio du flux émis par le luminaire sur le flux maximum de ce même luminaire (Zhao, Feng, et Yang 2021). L'équation 9 donne le flux pour une rangée de luminaire à un instant donné. L'équation 10 donne le ratio du flux d'une rangée à un instant donné sur le flux maximum de cette rangée. L'équation 11 détaille le calcul de la consommation énergétique d'une rangée pour un quart d'heure donné.

$$\phi_j = \phi_{ref_j} * x_j \quad [9]$$

Avec Φ_j le flux de la rangée j pour un quart d'heure donné (lm), $\Phi_{ref\,j}$ le flux de référence (flux maximal) d'un seul luminaire utilisé sur la rangée j (lm).

$$d = \frac{\phi_j}{2 * \phi_{ref_j}} \quad [10]$$

$$En_j = 0.25 * 2 * P_{ref_j} * d \quad [11]$$

Avec En_j l'énergie consommée par la rangée j pour un quart d'heure donné (Wh), $P_{ref\,j}$ la puissance de référence d'un seul luminaire de la rangée j (W).

La consommation totale de l'installation de renfort pouvait ensuite être obtenue en sommant les En_j.

A nouveau, la même méthode permet de calculer les consommations énergétiques de l'installation de base.

Prise en compte de l'impact de la lumière naturelle

Pour cette étape, 145 nouvelles simulations sous OCEAN sont nécessaires en utilisant à nouveau le capteur permettant de mesurer les valeurs d'éclairement sur la chaussée du tunnel. Une simulation est réalisée pour chaque zone de ciel, et les valeurs moyennes d'éclairement pour chaque zone de mesure et chaque zone de ciel sont à leurs tours stockées dans une matrice de la forme :

$$\begin{pmatrix} E_{nat,ref_{11}} & \cdots & E_{nat,ref_{1p}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{nat,ref_{m1}} & \cdots & E_{nat,ref_{mp}} \end{pmatrix}$$

, avec p le nombre de zones de ciel. L'équation 12 donne ensuite l'éclairement moyen sur la zone de mesure i provenant de la zone de ciel j.

$$E_{nat_{ij}} = E_{nat,ref_{ij}} * \frac{L_{ciel\,j}}{L_{ciel,ref_j}} \quad [12]$$

Avec $L_{ciel\ j}$ la luminance moyenne de la zone de ciel j pour la condition climatique considérée ($cd.m^{-2}$) ; $L_{ciel,ref\ j}$ la luminance moyenne de la zone de ciel j prise en compte dans les simulations ($cd.m^{-2}$).

Les éclairements peuvent être convertis en luminances en utilisant le coefficient de clarté de la chaussée (pour rappel, ce coefficient dépend de la source de lumière), tel qu'indiqué en équation 13. L'équation 14 donne la luminance résultant des conditions de luminosité extérieures sur la zone de mesure i à l'intérieur du tunnel.

$$L = \frac{c_{nat}}{\pi} * E \quad [13]$$

Avec c_{nat} le coefficient de clarté de la chaussée (valable pour la lumière naturelle, pris égal à 0.18 (CETU 2000)).

$$L_{nat_i} = \sum_j E_{nat_{ij}} * \frac{c_{nat}}{\pi} \quad [14]$$

Avec $L_{nat\ i}$ la luminance issue de l'éclairage naturel et mesurée sur la zone de mesure i ($cd.m^{-2}$).

La somme des luminances issues de l'éclairage artificiel et des luminances issues de l'éclairage naturel permet d'obtenir la luminance résultante totale sur chaque zone de mesure à l'intérieur du tunnel.

3.4. Scénarios d'éclairage testés

Une fois le modèle développé, différents scénarios sont testés afin d'envisager des pistes de recherche pour réaliser des économies d'énergie sur les installations d'éclairage LEDs en tunnel. Quatre scénarios sont développés et évalués grâce au modèle dynamique décrit ci-dessus. La première étape est de faire tourner le programme climatique simplement pour évaluer les luminances de voile à l'année afin d'identifier les conditions de dimensionnement de l'ouvrage (conditions les plus défavorables prises en compte pour la conception du profil de décroissance maximal). Pour ce faire, les quarts d'heure du fichier climatique pour lesquels le soleil est directement dans le champ de vision du L_{seq} ne sont pas pris en compte puisque l'installation d'éclairage ne peut pas permettre de compenser une luminance de voile aussi élevée. En pratique les données de luminance de voile obtenues tous les quarts d'heure dans le fichier climatique sont moyennées sur une heure. Ensuite, la 75ème heure la plus défavorable est prise en compte pour le dimensionnement de l'installation

d'éclairage. Afin de calculer L_{atm} et L_{pb} pour ce dimensionnement, la valeur de V_m dépassée 85 % du temps (Padmos 1984) est également prise en compte. Les données utilisées pour le dimensionnement sont donc : $L_{seq\,dim}$ =162.3 cd/m² ; $L_{20\,dim}$= 3957 cd/m² ; $L_{0\,dim}$ = 4721 cd/m² ; $V_{m\,dim}$ = 8500 m ; v_{dim}=70 km/h. Le profil de décroissance admissible associé à ces valeurs est présenté en Figure 10 (profil de décroissance de 19h08). Les différences de pilotage entre scénarios portent sur l'installation de renfort, puisqu'on ne constate pas de différence significative en termes de gain d'énergie en pilotant uniquement le renfort ou en pilotant toute l'installation (Shuguang 2015).

Scénario de référence (ref)

Le premier scénario constitue un état de référence pour lequel les règles de pilotage de l'installation sont les plus proches possibles de celles actuellement recommandées par le CETU pour les LEDs. Le profil de décroissance maximum est celui présenté en Figure 10 (profil de décroissance de 19h08). Il est décliné en 9 autres profils (90 % des valeurs de la courbe, 80 %, 70 %, …). L'installation est pilotée par l'intermédiaire de l'évaluation du L_{20} tous les quarts d'heure : le rapport $L_{20}/L_{20\,dim}$ donne le profil de décroissance à mettre en œuvre dans le tunnel (pour exemple, si $L_{20}/L_{20\,dim}$ est compris entre 0.81 et 0.90, le besoin de luminance dans le tunnel est celui correspondant à 90% du profil de décroissance maximum).

Scénario test asservi en luminance (L)

Un premier scénario test consiste à établir un nouveau profil de décroissance de luminance chaque quart d'heure, en prenant en compte les conditions du fichier climatique et de visibilité météorologique (pour l'évaluation de la luminance de voile d'atmosphère et de pare-brise).

Scénario test asservi en luminance et à la vitesse de trafic (LT)

Un deuxième scénario repose sur le même principe, mais tient également compte de la vitesse de trafic (disponible tous les quarts d'heure également dans un fichier dédié). En pratique, la distance d'arrêt est recalculée tous les quarts d'heure en fonction des conditions de trafic, puis les luminances de voile sont évaluées pour cette distance d'arrêt effective, et non pas nécessairement pour la distance d'arrêt de dimensionnement.

Scénario test asservi en luminance, à la vitesse de trafic et à l'état du sol (LTES)

Comme précédemment, ce scénario recalcule la distance d'arrêt tous les quarts d'heure en fonction des conditions de trafic, mais il tient également compte des conditions de sol (disponibles dans un fichier récupéré auprès de Météo France). En effet, la distance d'arrêt prise en compte en tunnel est toujours la distance d'arrêt correspondant à une chaussée mouillée, afin d'éviter que l'installation ne soit sous dimensionnée en cas de pluie. Cependant, dans le cas d'une chaussée sèche la distance d'arrêt diminue et ce scénario permet donc de tenir compte de ce paramètre. Les luminances de voile sont ensuite évaluées pour la distance d'arrêt calculée.

3.5. Résultats obtenus

La Figure 10 présente les profils de décroissance, ainsi que la luminance de chaussée résultant de l'installation et de la lumière naturelle, toutes les 2 h pour la journée du 14 mai 2019 prise en exemple (seuls les résultats du scénario L sont présentés ici). Cette étape a été faite pour de nombreuses journées afin de vérifier que l'installation fournissait les niveaux lumineux nécessaires à la sûreté des usagers.

Le reste de cette section traitera principalement des consommations énergétiques de l'installation de renfort. Les consommations mensuelles et annuelles de l'installation sont présentées en Figures 11 et 12. Les réductions de consommations sont présentées en Tableau 5.

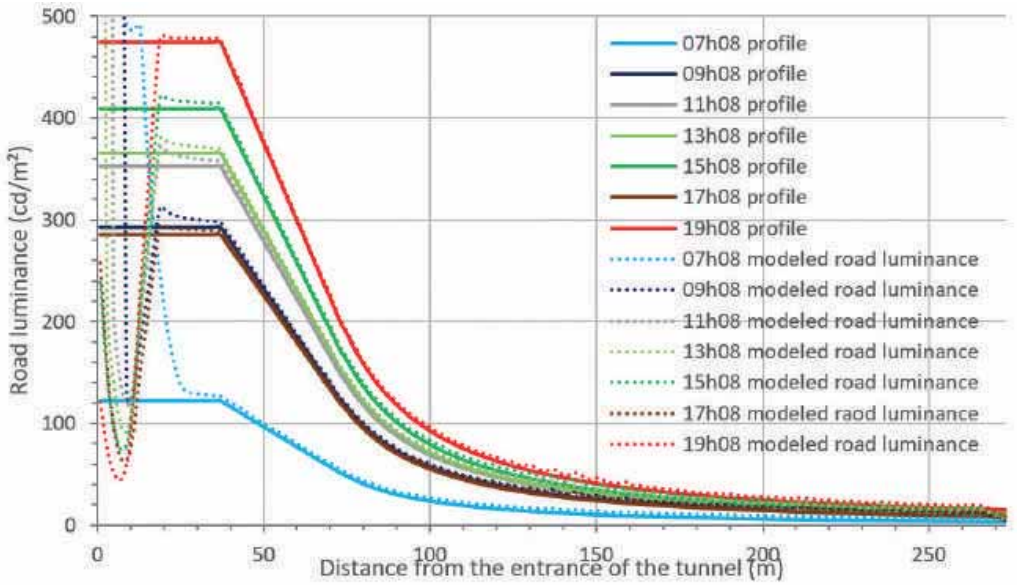


Figure 10 Profils de décroissance admissibles et luminance de chaussée modélisée pour la journée du 14 mai 2019

Tableau 5 Consommations énergétiques annuelles de chaque scénario évalué avec le modèle dynamique. Ecarts entre les différents scénarios

Scénarios	Consommations énergétiques annuelles (kWh)	Ecart par rapport à la référence	Ecart par rapport au scénario précédent
Référence	141100		
Scénario L	119932	-15.0%	-15.0%
Scénario LT	78569	-44.3%	-34.5%
Scénario LTES	58991	-58.2%	-24.9%

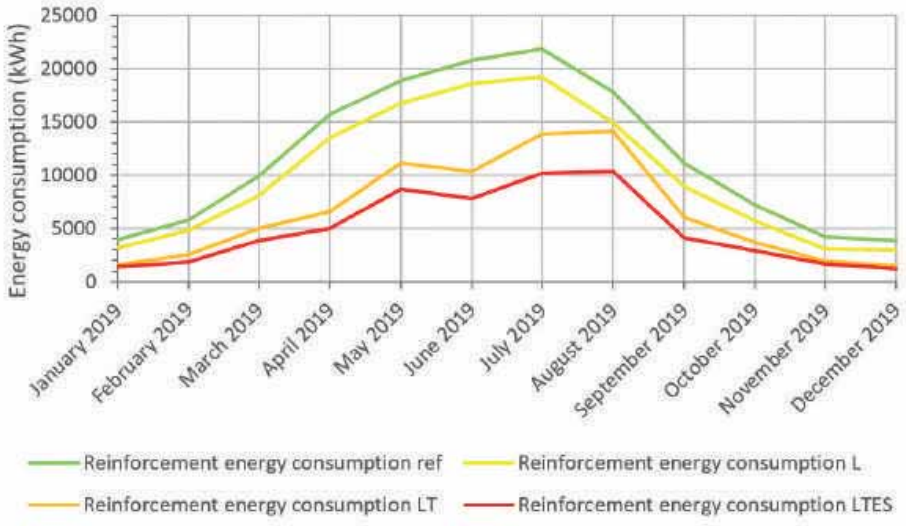


Figure 11 Consommations énergétiques mensuelles de l'installation de renfort pour l'année 2019

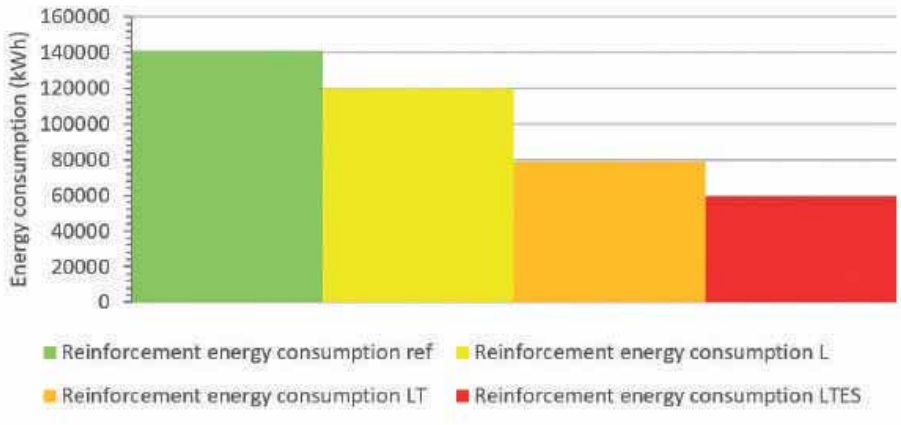


Figure 12 Consommations énergétiques annuelles totales de l'installation de renfort pour les différents scénarios évalués avec le modèle dynamique

3.6. Discussion

Les scénarios tests sont évidemment des scénarios théoriques idéaux puisqu'un dimensionnement est réalisé pour chaque condition évaluée (tous les quarts d'heure). Ils ne permettent donc pas de mettre en place des profils de décroissance préétablis comme le fait le scénario de référence.

Le scénario test d'asservissement en luminance montre qu'en optimisant au maximum l'asservissement de l'installation de renfort aux conditions lumineuses extérieures, on pourrait obtenir un gain de 15% en termes de consommations énergétiques. Ces économies ne sont pas négligeables mais elles restent moins importantes que celles associées à la prise en compte de la vitesse du trafic (gain de 34.5%) ou de l'état du sol (gain de 24.9%).

Le tube circulé de la tranchée d'Antony est sujet aux congestions, principalement pendant les horaires de départ ou de retour du travail (7h - 10h et 15h - 19h). Le modèle dynamique montre que pour ce type de tunnel, un asservissement parfait de l'installation de renfort à la vitesse de trafic permettrait de diminuer sa consommation énergétique d'un tiers sur une année complète. Il est à noter que la mise en œuvre réel d'un tel asservissement se ferait probablement via la mise en place de différents scénarios prédéfinis, applicables en fonction de la vitesse mesurée aux abords du tunnel. Les gains seraient donc moindres, puisque les niveaux de luminance mis en place seraient légèrement surdimensionnés par rapport aux besoins réels. Cette congestion liée aux déplacements pendulaires est également mise en exergue par la réduction des écarts de consommations entre les scénarios L et LT pour le mois d'août.

Enfin, le scénario LTES montre que la prise en compte de l'état du sol permettrait d'économiser un quart des consommations énergétiques de l'installation de renfort sur une année. Logiquement, ces économies sont très importantes en été, d'une part puisque le sol est souvent sec et que le dimensionnement en chaussée mouillée perd de son sens, et d'autre part car les vitesses moyennes de trafic sont plus élevées du fait des congestions moins fréquentes, ce qui entraîne des différences entre distance d'arrêt pour chaussée mouillée et pour chaussée sèche plus importantes.

En ce qui concerne la mise en œuvre pratique de ces asservissements, l'utilisation de radars, de capteurs de trafic ou d'autres dispositifs (Shuguang 2015; Zeng et al. 2011; Zhao, Feng, et Yang 2021) est envisageable, et a déjà été réalisée dans des études précédentes. Pour ce qui est de l'asservissement à l'état du sol, plusieurs méthodes ont été étudiées (Misener 1998; S. Silion et Fosalau 2014; 2014).Des systèmes relativement compacts basés sur la détection de réflexions infrarouges existent et sont envisageables pour un asservissement de l'installation de renfort à l'état de la chaussée.

4. CONCLUSION

Une approche expérimentale en laboratoire (section courante), ainsi qu'un travail de simulation informatique (zone de renfort) ont été menés, afin d'investiguer les pistes de potentielles économies d'énergie pouvant être réalisées grâce aux sources LEDs en tunnel.

Les résultats de l'expérience, principalement axée autour de l'impact du spectre sur la visibilité, ont montré que la température de couleur des sources de lumière pouvait influencer les performances visuelles des observateurs dans leur champ de vision central, pour des niveaux lumineux entre 0 et 1 cd/m^2 sur la chaussée. L'impact observé était le suivant : plus la température de couleur de la source était basse, meilleures étaient les performances visuelles des observateurs (RQ1). Nous pensons que cet impact est dû à une luminance de voile plus élevée dans le champ de vision périphérique des observateurs pour des spectres excitant plus fortement les bâtonnets ; cette luminance de voile plus élevée altérerait la perception en champ de vision central. Les résultats n'ont néanmoins montré aucun impact de l'excitation des CGRips sur la visibilité des observateurs (RQ2). Enfin, Les potentielles économies d'énergie liées à ces résultats ne sont pas évidentes puisque l'amélioration des conditions de visibilité s'oppose à l'efficacité lumineuse dégradée des LEDs de plus faibles températures de couleur (RQ3).

La simulation informatique s'est appuyée sur l'exemple du projet DELTA et du tube non exploité de la tranchée couverte d'Antony. Un modèle de simulation dynamique a été créé afin de reproduire le plus fidèlement possible les conditions d'exploitation du tube juxtaposé (conditions climatiques, conditions de trafic, conditions de visibilité météorologique et d'état du sol). Ce modèle a été utilisé pour tester 4 scénarios de pilotage différents : un scénario de référence représentatif des recommandations actuellement dispensées par le CETU, un scénario parfaitement asservi à la luminance extérieure, un autre asservi à la luminance et à la vitesse de trafic, et un dernier asservi à la luminance, à la vitesse de trafic et à l'état du sol. Les résultats obtenus en évaluant ces scénarios à l'aide du modèle dynamique ont montré que l'asservissement à la vitesse pouvait permettre de réaliser des économies d'énergie de l'ordre de 34.5% sur une année complète (RQ5). De la même manière, l'asservissement à l'état de la chaussée pourrait permettre d'économiser 24.9% de l'énergie consommée annuellement par l'installation de renfort (RQ4 et RQ5). Ces résultats restent à confirmer en les appliquant sur site à échelle réelle dans le cadre du projet DELTA.

BIBLIOGRAPHIE

Berson, David M., Felice A. Dunn, et Motoharu Takao. 2002. « Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock ». Science 295 (5557): 1070-73. https://doi.org/10.1126/science.1067262.

Bisketzis, Nikolas, Constantinos Bouroussis, et Frangiskos Topalis. 2009. « Is the fovea vision only photopic? » In .

Brown, Timothy M., Sei-ichi Tsujimura, Annette E. Allen, Jonathan Wynne, Robert Bedford, Graham Vickery, Anthony Vugler, et Robert J. Lucas. 2012. « Melanopsin-Based Brightness Discrimination in Mice and Humans ». Current Biology 22 (12): 1134-41. https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.04.039.

Bullough, J.D., et M.S. Rea. 2000. « Simulated Driving Performance and Peripheral Detection at Mesopic and Low Photopic Light Levels ». International Journal of Lighting Research and Technology 32 (4): 194-98. https://doi.org/10.1177/096032710003200403.

CEN. 2006. « Eclairagisme - Eclairage des tunnels ». Afnor.

CETU. 1998. Méthode de dimensionnement de l'éclairage d'entrée des tunnels routiers. Bron, France: CETU.

CETU. 2000. « Dossier pilote des tunnels - éclairage ». SPECIFIQUE J.L.P. - Lyon.

CIE. 2004. « Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses ».

CIE. 2010. « Recommended Sytem for Mesopic Photometry Based on Visual Performance ».

CIE. 2018. « CIE System for Metrology of Optical Radiation for IpRGC-Influenced Responses to Light ».

Curcio, Christine A., Kenneth R. Sloan, Robert E. Kalina, et Anita E. Hendrickson. 1990. « Human Photoreceptor Topography ». Journal of Comparative Neurology 292 (4): 497-523. https://doi.org/10.1002/cne.902920402.

Eloholma, Marjukka, et Liisa Halonen. 2005. « MOVE : Mesopic Optimisation of Visual Efficiency ». Helsinki University of Technology.

Esquiva, Gema, Pedro Lax, Juan J. Pérez-Santonja, José M. García-Fernández, et Nicolás Cuenca. 2017. « Loss of Melanopsin-Expressing Ganglion Cell Subtypes and Dendritic Degeneration in the Aging Human Retina ». Frontiers in Aging Neuroscience 9. https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00079.

Gamlin, Paul D. R., David H. McDougal, Joel Pokorny, Vivianne C. Smith, King-Wai Yau, et Dennis M. Dacey. 2007. « Human and macaque pupil responses driven by melanopsin-containing retinal ganglion cells ». Vision Research 47 (7): 946-54. https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.12.015.

He, S. Y., L. Tähkämö, M. Maksimainen, B. Liang, G. B. Pan, et L. Halonen. 2017. « Effects of transient adaptation on drivers' visual performance in road tunnel lighting ». Tunnelling and Underground Space Technology 70 (novembre): 42-54. https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.07.008.

Knoblauch, Kenneth, et Laurence T. Maloney. 2012. Modeling Psychophysical Data in R. Springer Science & Business Media.

Mardaljevic, John. 1999. « Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients ».

McDougal, David H., et Paul D. Gamlin. 2010. « The influence of intrinsically-photosensitive retinal ganglion cells on the spectral sensitivity and response dynamics of the human pupillary light reflex ». Vision Research 50 (1): 72-87. https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.10.012.

Misener, James A. 1998. « Investigation of an Optical Method to Determine the Presence of Ice on Road Surfaces », 21.

Morgan Pattison, Paul, Monica Hansen, et Jeffrey Y. Tsao. 2018. « LED Lighting Efficacy: Status and Directions ». Comptes Rendus Physique, LEDs: The new revolution in lighting / Les LED : la nouvelle révolution de l'éclairage, 19 (3): 134-45. https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.10.013.

Padmos, P. 1984. « Glare and Tunnel Entrance Lighting : Effects of Straylight from Eye, Atmosphere and Windscreen ». CIE Journal, 1984.

Rea, MS, JD Bullough, JP Freyssinier-Nova, et A Bierman. 2004. « A Proposed Unified System of Photometry ». Lighting Research & Technology 36 (2): 85-109. https://doi.org/10.1191/1365782804li114oa.

Salata, Ferdinando, Iacopo Golasi, Alessandro Poliziani, Antonio Futia, Emanuele De Lieto Vollaro, Massimo Coppi, et Andrea De Lieto Vollaro. 2016. « Management Optimization of the Luminous Flux Regulation of a Lighting System in Road Tunnels. A First Approach to the Exertion of Predictive Control Systems ». Sustainability 8 (11): 1092. https://doi.org/10.3390/su8111092.

Shuguang, Li. 2015. « An optimal model for tunnel lighting control systems ». Tunnelling and Underground Space Technology 49 (juin). https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.05.001.

Silion, Stefan, et Cristian Fosalau. 2014. « Wet road surfaces detection by measuring the infrared reflected radiation ». In 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), 738-43. https://doi.org/10.1109/ICEPE.2014.6970007.

Silion, Stefan, et Cristian Fosalau. 2014. « Wet road surfaces detection by measuring the air humidity in two points ». EPE 2014 - Proceedings of the 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, décembre, 744-47. https://doi.org/10.1109/ICEPE.2014.6970008.

Yong, Yang, Bao Zuojun, Zhu Chuanzheng, et Wang Lei. 2011. « Study on the Mesopic Vision Theory Used in Road Tunnel Lighting Measurement ». In 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 3:565-67. https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2011.711.

Zaidi, Farhan H., Joseph T. Hull, Stuart N. Peirson, Katharina Wulff, Daniel Aeschbach, Joshua J. Gooley, George C. Brainard, et al. 2007. « Short-Wavelength Light Sensitivity of Circadian, Pupillary, and Visual Awareness in Humans Lacking an Outer Retina ». Current Biology 17 (24): 2122-28. https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.11.034.

Zele, Andrew J., Prakash Adhikari, Beatrix Feigl, et Dingcai Cao. 2018. « Cone and Melanopsin Contributions to Human Brightness Estimation ». Journal of the Optical Society of America A 35 (4): B19-25. https://doi.org/10.1364/JOSAA.35.000B19.

Zele, Andrew J., Beatrix Feigl, Prakash Adhikari, Michelle L. Maynard, et Dingcai Cao. 2018. « Melanopsin photoreception contributes to human visual detection, temporal and colour processing ». Scientific Reports 8 (1): 3842. https://doi.org/10.1038/s41598-018-22197-w.

Zeng, Hong, Jian Qiu, Xingfa Shen, Guojun Dai, Peng Liu, et Shuping Le. 2011. « Fuzzy Control of LED Tunnel Lighting and Energy Conservation ». Tsinghua Science & Technology 16 (6): 576-82. https://doi.org/10.1016/S1007-0214(11)70077-3.

Zhao, Jiandong, Yingzi Feng, et Cai Yang. 2021. « Intelligent Control and Energy Saving Evaluation of Highway Tunnel Lighting: Based on Three-Dimensional Simulation and Long Short-Term Memory Optimization Algorithm ». Tunnelling and Underground Space Technology 109 (mars): 103768. https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103768.

PLAN PARA LA IMPLANTACIÓN DE SISTEMAS INTELIGENTES DE GESTIÓN DE LA ILUMINACIÓN EN TÚNELES DE CARRETERAS DEL ESTADO

Luis Azcue Rodríguez
Jefe de Servicio
Subdirección General de Conservación
Dirección General de Carreteras. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana

La práctica mayoría de los túneles, excepto los más recientes, utilizan proyectores de Vapor de Sodio a Alta Presión (VSAP). Estos sistemas permiten una regulación del alumbrado muy basta, equiparable a un sistema analógico que permite ajustar de manera poco eficiente la iluminación real del túnel a la curva lumínica de cada tipo de alumbrado mediante amplios escalones.

Dicho sistema de iluminación se encuentra anticuado y en muchos casos con dificultades para el cumplimiento de la O.C. 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles.

Por este motivo, y con el avance de las nuevas tecnologías, la digitalización de la gestión, así como la aparición de proyectores tipo LED, se está desarrollando un Plan, complementario al Plan de Adecuación, para dotar a los túneles de carreteras del Estado de un sistema de iluminación resiliente, que mediante una gestión digital e inteligente permita adaptar la iluminación a las diferentes situaciones con gran eficiencia.

El Plan actual, incluye una intervención más ambiciosa que la sustitución de luminarias VSAP por luminarias tipo LED, incidiendo en la implementación de un sistema de gestión de la iluminación y en la mejora general de la instalación eléctrica, adoptando como normativa de referencia dicha Orden Circular.

Aunque la aplicación de esta norma supone, teóricamente, un mayor consumo de energía, con el desarrollo del nuevo sistema de gestión de la iluminación se produce un importante ahorro respecto a la iluminación actual dispuesta en los túneles, con un plazo estimado de recuperación de la inversión de entre 10 y 16 años.

Se ha previsto actuar en 221 de 309 túneles gestionados directamente por la Dirección General de Carreteras, los cuales se han agrupado en 39 proyectos distribuidos por Demarcaciones.

La inversión estimada del Plan asciende a 279,8 M€ (PBL sin iva).

PLAN FOR THE IMPLEMENTATION OF INTELLIGENT LIGHTING MANAGEMENT SYSTEMS IN STATE ROAD TUNNELS

Practically the majority of the tunnels, except the most recent ones, use High Pressure Sodium Vapor Projectors (VSAP). These systems allow a very coarse regulation of lighting, comparable to an analog system that allows the real lighting of the tunnel to be adjusted in an inefficient way to the light curve of each type of lighting by means of wide steps.

Said lighting system is outdated and in many cases with difficulties in complying with the O.C. 36/2015 on criteria to be applied to the lighting of open-air roads and tunnels.

For this reason, and with the advancement of new technologies, the digitization of management, as well as the appearance of LED-type projectors, a Plan is being developed, complementary to the Adaptation Plan, to equip road tunnels in the State of a resilient lighting system, which through digital and intelligent management allows lighting to be adapted to different situations with great efficiency.

The current Plan includes a more ambitious intervention than the replacement of VSAP luminaires for LED-type luminaires, emphasizing the implementation of a lighting management system and the general improvement of the electrical installation, adopting said Circular Order as a reference regulation.

Although the application of this standard supposes, theoretically, a greater consumption of energy, with the development of the new lighting management system, significant savings are produced with respect to the current lighting arranged in the tunnels, with an estimated period of recovery of the investment of between 10 and 16 years.

It is planned to act in 221 of 309 tunnels managed directly by the General Directorate of Roads, which have been grouped into 39 projects distributed by Demarcations.

The estimated investment of the Plan amounts to €279.8 million (PBL without VAT).

PLAN POUR LA MISE EN ŒUVRE DE SYSTÈMES DE GESTION INTELLIGENTE DE L'ÉCLAIRAGE DANS LES TUNNELS DES ROUTES NATIONALES

La quasi-totalité des tunnels, à l'exception des plus récents, utilisent des Projecteurs à Vapeur de Sodium à Haute Pression (VSAP). Ces systèmes permettent une régulation très grossière de l'éclairage, comparable à un système analogique qui permet d'ajuster de manière inefficace l'éclairage réel du tunnel à la courbe lumineuse de chaque type d'éclairage au moyen de larges marches.

Ledit système d'éclairage est désuet et dans de nombreux cas avec des difficultés à se conformer à l'O.C. 36/2015 sur les critères à appliquer à l'éclairage des routes et des tunnels à ciel ouvert.

Pour cette raison, et avec l'avancée des nouvelles technologies, la digitalisation de la gestion, ainsi que l'apparition des projecteurs de type LED, un Plan est en cours d'élaboration, complémentaire au Plan d'Adaptation, pour équiper les tunnels routiers en l'état d'un réseau résilient. système d'éclairage qui, grâce à une gestion numérique et intelligente, permet d'adapter l'éclairage à différentes situations avec une grande efficacité.

Le Plan actuel comprend une intervention plus ambitieuse que le remplacement des luminaires VSAP par des luminaires de type LED, mettant l'accent sur la mise en place d'un système de gestion de l'éclairage et l'amélioration générale de l'installation électrique, en adoptant ledit Arrêté Circulaire comme règlement de référence.

Bien que l'application de cette norme suppose, théoriquement, une plus grande consommation d'énergie, avec le développement du nouveau système de gestion de l'éclairage, des économies importantes sont réalisées par rapport à l'éclairage actuel disposé dans les tunnels, avec une période estimée de récupération de l'investissement entre 10 et 16 ans.

Il est prévu d'intervenir dans 221 des 309 tunnels gérés directement par la Direction Générale des Routes, qui ont été regroupés en 39 projets répartis par Démarcations.

L'investissement estimé du Plan s'élève à 279,8 millions d'euros (PBL hors TVA).

INTRODUCCIÓN

La práctica mayoría de los túneles, excepto los más recientes, utilizan proyectores de Vapor de Sodio a Alta Presión (VSAP). Estos sistemas permiten una regulación del alumbrado muy basta, que se puede equiparar a un sistema analógico que permite ajustar de manera poco eficiente la iluminación real del túnel a la curva lumínica de cada tipo de alumbrado mediante amplios escalones.

Actualmente los túneles de carreteras del Estado disponen de un sistema de iluminación anticuado y en muchos casos con dificultades para el cumplimiento de la O.C. 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles.

Con el avance de las nuevas tecnologías, la digitalización de la gestión, así como la aparición de proyectores tipo LED, es posible diseñar un sistema inteligente de la gestión de la iluminación en los túneles de carreteras del Estado.

Como se puede observar en la siguiente ilustración, la reducción de potencia que supone una buena regulación de la iluminación en el interior de los túneles, con la comparación entre una regulación continua y saltos discretos, implica un ahorro energético y económico en momentos del día que requieran niveles de iluminación diferentes.

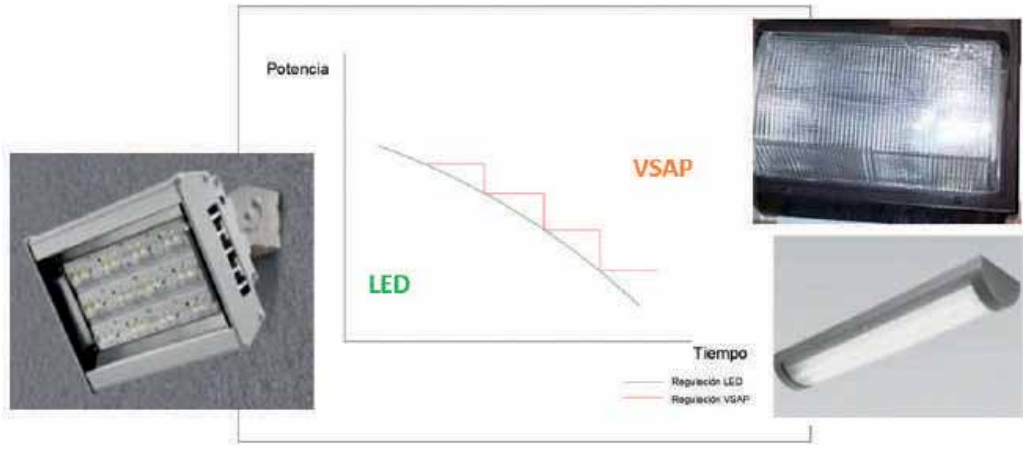


Ilustración 1.Comparación entre regulación continua (LED) y saltos discretos (VSAP)

Uno de los objetivos de la Agenda 2030, concretamente el Objetivo 9. Industria, innovación e infraestructuras, indica que uno de los factores que mide el nivel de desarrollo de un país es del desarrollo de sus infraestructuras y su grado de industrialización. De hecho, el desarrollo de infraestructuras fiables, sostenibles y de calidad debe de ser un estímulo para la recuperación económica, la calidad de vida y creación de empleo y constituye, además, una garantía de vertebración territorial, cohesión social e igualdad de oportunidades.

Ilustración 2.Agenda 2030: Objetivo 9. Industria, innovación e infraestructuras

Por este motivo, se está desarrollando un Plan para dotar a los túneles de carreteras del Estado de un sistema de iluminación resiliente, un sistema de iluminación que mediante una gestión digital e inteligente permita adaptar la iluminación a las diferentes situaciones con gran eficiencia.

Dicho Plan es independiente del "Plan de Adecuación de Túneles al Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de la red de carreteras del Estado". En el Plan de adecuación al Real Decreto 635/2006 únicamente se incluyó actuar en aquellos túneles que no disponían de iluminación normal y que era requisito por el Real Decreto 635/2006 que tuvieran instalación.

Como antecedente al actual Plan de Iluminación, en junio del 2017 se elaboró un borrador del Plan de Iluminación de Túneles de la R.C.E. - Red de Carreteras del Estado – cuyo objetivo consistía en adecuar exclusivamente los niveles lumínicos de los mismos a las exigencias de la O.C. 36/2015, al mismo tiempo que se persiguió conseguir una reducción de consumo energético mediante la sustitución de luminarias aplicando las nuevas tecnologías LED, y que no fue posible desarrollar.

El Plan actual, a diferencia con el borrador mencionado anteriormente, incluye una intervención más ambiciosa que la sustitución de luminarias VSAP por luminarias tipo LED, haciendo especial énfasis en la implementación de un sistema de gestión de la iluminación y en la mejora general de la instalación eléctrica.

A continuación se expone el alcance previsto del Plan de Iluminación, así como su justificación técnica y económica, el desarrollo del mismo, y la inversión estimada.

ALCANCE DEL PLAN DE ILUMINACIÓN

El objetivo del Plan es dotar a los túneles de un sistema de gestión de la iluminación con las siguientes características:

- Al tratarse de un sistema de gestión resiliente, se puede adecuar a cualquier circunstancia complicada, aunque esta sea repentina y transitoria. La digitación e inteligencia del sistema consigue actuar en cualquier momento con gran precisión en la regulación lumínica deseada.
- Por lo tanto, las características anteriores del sistema de gestión logran una mejora sustancial en la eficiencia energética de la instalación. Un mejor ajuste de la iluminación real a las curvas lumínicas genera una reducción del consumo.
- Este nuevo sistema de gestión de la iluminación, lleva aparejado el cambio de los actuales proyectores, a proyectores tipo LED, los cuales permiten la regulación y por lo tanto interactuar con el nuevo sistema de gestión.
- El cambio de los proyectores a tipo LED, favorece el desarrollo de tecnología, ya que se trata de proyectores no convencionales y facilita la sostenibilidad de la infraestructura al demandar una menor potencia eléctrica y un menor consumo energético.

En base a la experiencia adquirida en el desarrollo del Plan de Adecuación de Túneles al Real Decreto 635/2006, en el presente Plan se hace necesario también incluir la sustitución de la instalación eléctrica actual de los túneles en cuanto a cableado y canalización se refiere, debido a su estado, en muchos casos por envejecimiento u obsolescencia de la instalación.

El Plan para la Implantación de Sistemas Inteligentes de Gestión de la Iluminación en los Túneles de las Carreteras de la Red del Estado, adopta como normativa de referencia la O.C. 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles, sin detrimento del cumplimiento de otras normas.

La OC36/2015 requiere mayores niveles de luminancia que las Recomendaciones de 1999, lo cual supone más potencia y mayor consumo de energía. Debido fundamentalmente al aumento de los tiempos de frenado estipulados.

Para llevar a cabo el estudio de lo anterior, se ha establecido una CLASIFICACIÓN DE LOS TÚNELES en distintos tipos de "tubos" para obtener resultados promedio de las variables más influyentes en la luminancia media requerida. Estas variables son:

Clase de túnel según O.C. 36/2015.

Intensidad de tráfico	Alta		Media		Baja	
Tipo de tráfico	M	A	M	A	M	A
Clase de túnel	4	3	3	2	2	1 (guiado)

- Clase 1: Intensidad de tráfico "Baja" y tipo de tráfico solo motorizado "A".
- Clase 2: Intensidad de tráfico "Baja" y tipo de tráfico mixto incluyendo bicicletas "M".
  Intensidad de tráfico "Media" y tipo de tráfico solo motorizado "A".
- Clase 3: Intensidad de tráfico "Media" y tipo de tráfico mixto incluyendo bicicletas "M".
  Intensidad de tráfico "Alta" y tipo de tráfico solo motorizado "A".
- Clase 4: Intensidad de tráfico "Alta" y tipo de tráfico mixto incluyendo bicicletas "M".

- Condición de tubo unidireccional o bidireccional.
- Velocidad máxima permitida en el tubo.
- Longitud del tubo.
- Nº de tubos en rangos de longitud.

La siguiente ilustración muestra como ejemplo la diferencia en los valores de luminancia entre ambas normativas:

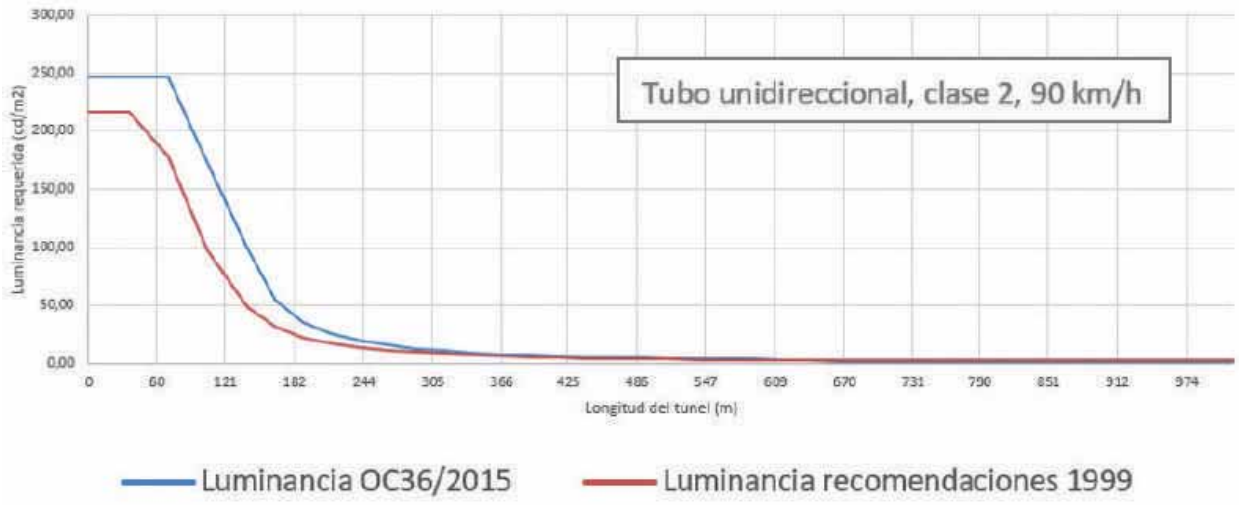


Ilustración 3.Diferencia entre los valores de luminancia de la OC36/2015 y de las Recomendaciones de 1999

Aunque la aplicación de esta norma O.C. 36/2015 supone, teóricamente, un mayor consumo de energía, sin embargo, con el desarrollo de este nuevo sistema de gestión de la iluminación se produce un IMPORTANTE AHORRO respecto a la iluminación actual dispuesta en los túneles:

- Al cambiar los proyectores a tipo LED se produce un menor consumo eléctrico (menos kW.h) respecto a los actuales consumos de los proyectores de VSAP.
- El término de potencia es menor para los proyectores LED, por lo tanto, también se produce un ahorro de coste de la factura eléctrica al disminuir el término de potencia.
- Los proyectores LED poseen una mayor vida útil, por lo que el gasto en mantenimiento de la instalación será menor.
- La regulación de estos proyectores, mediante un sistema de gestión inteligente, permite la adaptación a cualquier situación, lo que hace que también se pueda plantear el apagado selectivo de la instalación, en determinadas franjas horarias sin circulación de vehículos, con el consiguiente ahorro económico.

El estudio realizado parte de los 353 túneles (526 tubos) existentes actualmente en las carreteras del Estado, 309 de los cuales son gestionados directamente por la Dirección General de Carreteras. Después del análisis de la situación actual de estos 309 túneles, se ha previsto actuar en 221 túneles, los cuales se agrupan de la siguiente forma según su ubicación y características:

- 134 túneles unidireccionales en autovía.
- 5 túneles bidireccionales en autovía.
- 72 túneles en carreteras convencionales.
- 3 túneles en autopista libre.
- 2 túneles en ramal de enlace.
- 4 túneles en vía rápida.
- 1 túnel en vía urbana.

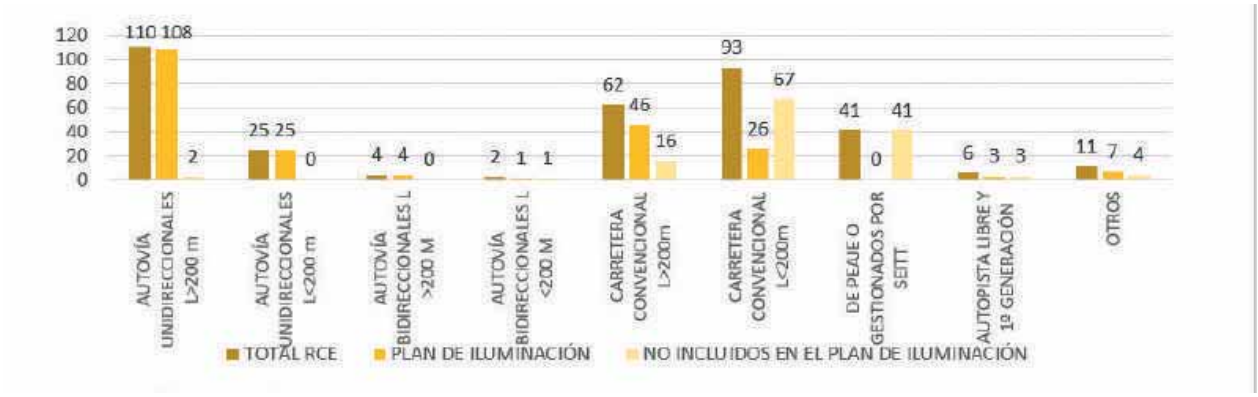


Ilustración 4.Tipos de túneles según ubicación y características

JUSTIFICACIÓN TÉCNICA DEL PLAN

La publicación de la O.C. 36/2015 en febrero de 2015, sobre recomendaciones a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles, obliga a revisar las instalaciones de iluminación de la Red de Carreteras del Estado para adaptarlas a los nuevos niveles de iluminación establecidos en esta Orden Circular.

La solución propuesta de dotar a los túneles de un sistema de gestión inteligente, adaptable a las situaciones que pudieran producirse en la explotación del túnel, conlleva el ajuste de los niveles lumínicos a la situación ideal mediante el cambio del sistema de control.

Un ajuste de la curva de potencia que conlleve una convergencia con la curva ideal lumínica implica un cambio tecnológico que supone la sustitución de luminarias aplicando las nuevas tecnologías LED, cumpliendo en todo caso con los requisitos lumínicos.

La mayor parte de los sistemas de iluminación empleados en un túnel permiten variar el flujo lumínico, con la consiguiente variación de consumo de energía. Esta característica permite establecer condiciones de funcionamiento de menor consumo eléctrico en determinados periodos de tiempo en los que el tráfico es muy bajo.

Los sistemas de gestión que admite la tecnología LED y que no permiten otras tecnologías como la VSAP, consiguen una regulación continua (sin escalones) e individualizada (luminaria a luminaria) o por grupos del flujo lumínico, y posibilitan una adaptación lumínica instantánea a las condiciones de contorno, que eviten el funcionamiento de las instalaciones de alumbrado por encima de las requeridas para un correcto tránsito por el interior del túnel.

En consecuencia, la regulación de las luminarias LED puede gestionarse desde el 0% hasta el 100% de su capacidad lumínica, así como el encendido y apagado instantáneo del punto de luz en función de las horas del día y del tráfico, por lo que su automatización supone un ahorro energético estimado superior al 10% sobre el consumo general de la instalación.

Al mismo tiempo, se consigue justificar la inversión y las consecuencias económicas resultantes de aplicar tecnología LED a través de los siguientes parámetros:

- Mayor eficiencia energética ya que la relación potencia instalada – luminancia producida es mayor que en otras tecnologías de iluminación.
- Disminución de la contratación por la reducción del término de potencia.
- Mayor vida útil con la reducción del coste del mantenimiento anual de la instalación.

La diferencia en los valores de mantenimiento de las dos opciones tecnológicas, mucho más favorables a la instalación LED, se debe tanto a la mayor vida útil (hasta 5 veces más) de estos equipos frente a los VSAP, como al hecho de necesitar menor número de reparaciones en envolvente y electrónica de equipos LED de nueva instalación frente a los existentes de VSAP.

JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA DEL PLAN

Se han analizado estadísticamente los túneles para establecer los criterios de clasificación adecuados desde un punto de vista general. No obstante, se destaca que el estudio no contempla el análisis de un túnel concreto, sino que establece una extrapolación de los valores de luminancia requeridos para cada tipo de túnel y establece así el valor de la inversión.

Para ello, se han recopilado datos reales de cada túnel desde la Base de Datos de Inventario, Inspecciones e Incidencias en Túneles de la R.C.E. del Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, y se han tenido

en cuenta especialmente los datos recogidos en el borrador del "Plan de iluminación de los túneles de la red de carreteras del Estado", de junio de 2017, donde se muestra la clasificación de los túneles mencionada anteriormente (en función de la clase, velocidad máxima permitida en el túnel y longitud), obteniendo resultados promedios sobre la potencia de iluminación instalada y el consumo energético estimado para cumplir los objetivos de luminancia del túnel (cd/m2) según la O.C. 36/2015.

La finalidad del estudio es determinar la rentabilidad económica después de la adaptación a la telegestión digital con el cumplimiento de la O.C. 36/2015. Esto implica analizar el valor actual neto –VAN – de la implantación de las medidas para un periodo de 20 años, que es el plazo recomendado ya que se considera que una instalación de este tipo puede tener de vida útil, comparando las dos situaciones posibles:

a) Implantación de la digitalización de las instalaciones con cambio tecnológico a LED.

b) Adaptación de las actuales instalaciones a la O.C. 36/2015 sin cambio tecnológico (VSAP).

INVERSIÓN MÁS COSTE TOTAL EN EL PERIODO DE 20 AÑOS (M€)

LED: 279,98 M€		**VSAP: 166,40 M€**	
Inversión + Coste Digitalización LED	**Coste Mantenimiento anual**	**Inversión VSAP**	**Coste Mantenimiento anual**
256,43	1,18	29,65	6,84

La diferencia en los valores de mantenimiento de las dos opciones tecnológicas, mucho más favorables a la instalación LED, se debe tanto a la mayor vida útil (hasta 5 veces más) de estos equipos frente a los VSAP, como al hecho de necesitar menor número de reparaciones en envolvente y electrónica de equipos LED de nueva instalación frente a los existentes de VSAP.

Por otra parte, en el borrador del "Plan de iluminación de los túneles de la red de carreteras del Estado", de junio de 2017, se muestran los datos de Facturación por energía en las diferentes opciones de LED y VSAP:

GASTO FACTURA ENERGÍA 2017 **Precio estimado de facturación: 0,1357 euros Kw/h**	
Facturación Energía LED (M€)	**Facturación Energía VSAP (M€)**
11,25	20,76

Es de destacar que, desde el 1 de junio de 2021, se aplica la nueva estructura de peajes y cargos de los términos de energía y de potencia de la factura de electricidad, lo que influye notablemente en el precio de la energía.

La evolución de los precios de la energía en días sucesivos, de p.ej, el mes de noviembre de 2021, refleja las oscilaciones que sufre a lo largo de un periodo de 24 h. Cuando observamos el consumo de energía en un periodo estabilizado, el precio medio de la energía se sitúa en el entorno de los 0,20 €/kwh. En este caso, la estimación de la facturación anual sería de:

Estimación Factura Energía 2022

GASTO FACTURA ENERGÍA 2021 **Precio estimado de facturación: 0,20 euros Kw/h**	
Facturación Energía LED (M€)	**Facturación Energía VSAP (M€)**
16,58	30,61

La DIFERENCIA DE FACTURACIÓN entre ambas tecnologías muestra el ahorro en la facturación anual que supone la tecnología LED, especialmente en períodos con precios elevados del kw/h:

- 2017: 0,1357 €/kwh. AHORRO de 9,51 M€ (600.000 € mensuales aproximadamente).
- 2022: 0,20 €/kwh. AHORRO de 14,03 M€ (1.000.000 € mensuales aproximadamente).

En consecuencia, a continuación se recoge la COMPARACIÓN DE LA INVERSIÓN ANUALIZADA CON LOS COSTES DE MANTENIMIENTO Y GASTOS DE ENERGÍA, para la opción de Digitalización LED y la opción VSAP:

1) en el periodo de 20 años y con un precio de la energía de 0,1357 €/Kwh,

   Inversión + Coste LED: 279,98 M€ — Gastos Factura Energía LED: 11,25 M€/año

   Inversión + Coste VSAP: 166,40 M€ — Gastos Factura Energía LED: 20,76 M€/año

   AHORRO ANUAL CON TECNOLOGÍA LED: 9,51 M€

2) en el periodo de 20 años y con un precio de la energía de 0,20 €/Kwh.

   Inversión + Coste LED: 279,98 M€ — Gastos Factura Energía LED: 16,58 M€/año

   Inversión + Coste VSAP: 166,40 M€ — Gastos Factura Energía LED: 30,61 M€/año

   AHORRO ANUAL CON TECNOLOGÍA LED: 14,03 M€

DESARROLLO DEL PLAN E INVERSIÓN ESTIMADA

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, para el desarrollo del Plan de iluminación se han analizado 309 túneles gestionados directamente por la Dirección General de Carreteras, de los cuales se ha previsto actuar en 221 túneles.

Todos ellos se encuentran agrupado en 39 proyectos, de acuerdo a los siguientes criterios:

- Que estén agrupados de forma racional: por cercanía, pertenencia a la misma carretera, a una misma provincia, o a una misma Demarcación.
- Que los túneles estén gestionados desde el mismo puesto o Centro de Control.
- Que, en la medida de lo posible, el número global de proyectos a redactar en el Plan no supere los 40 proyectos, y que no produzca una desestabilización por la simultaneidad en la ejecución de las obras.

Una vez definidos los 39 proyectos, se ha procedido a una clasificación de éstos de acuerdo con las características comunes en cuanto a su tramitación. Los aspectos que se ha considerado que condicionan en gran medida el plazo de ejecución de las obras son los siguientes:

- Distribución anual por Demarcaciones, con el objeto de no encarecer las instalaciones por saturación del mercado.
- Instalaciones que pertenezcan a un Centro de Control sobre el que haya previstas actuaciones adicionales.
- Pertenencia o no a la RTE.
- Localización en carretera convencional o autovía.

Actualmente ya se ha iniciado la redacción de los primeros 5 proyectos.

Extrapolando los datos obtenidos de coste en euros por metro (€/m) en las diferentes tipologías de túnel y totalizando la suma de la inversión, el PBL sin iva estimado para la inversión necesaria asciende a un total de 279,8 M€ (PBL con iva: 338,8 M€).

SISTEMAS DE EVALUACIÓN DINÁMICA DE LUMINANCIA E ILUMINANCIA EN TÚNELES. CASO PRÁCTICO: TÚNEL DE L'OLLERIA DE LA AUTOVÍA A-7

Alberto Senén Perales García
AMAC EUROPA S.L.

Guillermo Llopis Serrano
Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. España

Una eficiente iluminación en túneles supone una valiosa apuesta desde el punto de vista económico y de la seguridad vial. El avance de las tecnologías ha permitido sustituir las evaluaciones manuales (puntuales) de la iluminación de túneles por evaluaciones dinámicas (continuas) realizadas por los sistemas de alto rendimiento, capaces de evaluar luminancia e iluminancia a la velocidad de la vía y sin interrumpir el tráfico, según determinan las normativas y recomendaciones correspondientes.

Un sistema de alto rendimiento podrá medir luminancia e iluminancia de manera dinámica si y solo si cumple con las normativas y recomendaciones nacionales e internaciones como la UNE-EN-13201-4: "Métodos de medida de las prestaciones fotométricas" y el Technical report CIE-194:2011: "On site measurement of the photometric properties of road and tunnel lighting".

En esta comunicación se muestran los resultados reales de un caso concreto de evaluación dinámica de la iluminación (luminancia) del Túnel de Ollería (compuesto por dos tubos unidireccionales y ubicado en la autovía A-7, en la provincia de Valencia, y con cinco niveles de iluminación) y posterior comparativa con los valores teóricos según normativa aplicable (Orden Circular 36/2015 del Ministerio de Fomento de España). La obtención de medidas continuas procedentes de esta evaluación dinámica, ha permitido la identificación precisa de los tramos específicos de cada tubo en los que es necesaria una actuación optimizada sobre la iluminación para adecuarse a la normativa (en lugar de actuar a lo largo de toda la longitud del túnel): cambios de regulación de la intensidad de las luminarias, aplicación de pinturas porcelánicas, …; siendo verificadas estas actuaciones en una segunda evaluación dinámica.

El interés de esta comunicación radica en la innovación técnica y la aplicabilidad y transferibilidad de los resultados a aquellos túneles que necesitan una adecuación a la normativa aplicable para una eficiente iluminación.

DYNAMIC ASSESSMENT SYSTEM FOR THE LUMINANCE AND ILLUMINANCE IN TUNNELS. PRACTICAL CASE: L'OLLERIA IN THE A-7 MOTORWAY.

An efficient lighting in tunnels means a very valuable bet from the economical point of view and from the road safety too. The advance in the technologies has allowed the substitution of the manual evaluations (occasional ones) of the lighting in tunnels by the dynamic evaluations (permanent or continuous ones) carried out by high performance systems, capable of evaluating luminance and illuminance at the speed of the road without interrupting the traffic, as established by the appropriate regulations and recommendations.

A high-performance system will be able to measure luminance and illuminance in a dynamic way, only if it complies with national and international regulations and recommendations such as EN-13201-4: "Road lighting - Part 4: Methods of measuring lighting performance" and in the Technical Report CIE-194:2011: "On site measurement of the photometric properties of road and tunnel lighting".

In this notice/report, one can see the actual results obtained from a specific dynamic evaluation case in the lighting (luminance) of the Ollería Tunnel (composed of 2 one-way tubes and located in the A-7 motorway, in Valencia province, and with five lighting levels) and the subsequent comparison with the technical values according to the applicable regulation (Order-Circular 36/2015 by the Spanish Ministry of Development (Public Works and Transportation). The obtention of continuous measurements arising from this dynamic evaluation, allowed the accurate identification of the specific road segments from each tube or tunnel where an optimized intervention on the lighting is necessary in order to adapt to the regulations (instead of acting all through the length of the tunnel): changes in the control and adjusting of the luminaires, the applying of porcelain paintings,…; with these actuations being verified in a second dynamic evaluation.

The interest of this notice/report lies in the technological innovation and the applicability and workability, and transferability of the results to those tunnels which do need to comply with the subsequent regulations for an efficient lighting.

SYSTÈME D'ÉVALUATION DYNAMIQUE DE LUMINANCE ET D'ÉCLAIREMENT DANS LES TUNNELS. CAS PRATIQUE: TUNNEL DE L'OLLERIA DE L'AUTOROUTE A-7.

Un éclairage efficace dans les tunnels représente un pari inestimable tant du point de vue économique qu'au niveau de la sécurité routière. L'avancé des technologies a permis de remplacer les évaluations manuelles (ponctuelles) de l'éclairage des tunnels par des évaluations dynamiques (continues) réalisées par les systèmes de haut rendement, capables d'évaluer la luminance et l'éclairement à la vitesse de la route et sans interrompre le trafic, conformément aux normes et aux recommandations correspondantes.

Un système de haut rendement pourra mesurer la luminance et l'éclairement de manière dynamique seulement s'il respecte les normes et recommandations nationales et internationales comme la EN-13201-4: "Road lighting - Part 4: Methods of measuring lighting performance" et le Technical report CIE-194:2011: "On site measurement of the photometric properties of road and tunnel lighting".

Dans cette communication, on montre les résultats réels d'un cas concret d'évaluation dynamique de l'éclairage (luminance) du Tunnel de Ollería (composé par deux tubes unidirectionnels et se trouvant sur l'autoroute A-7, dans la province de Valencia, et avec cinq niveaux d'éclairage) et la comparaison postérieure avec les valeurs théoriques selon la norme applicable (Ordre Circulaire 36/2015 du Ministère de l'Équipement d' Espagne). L'obtention de mesures continues provenant de cette évaluation dynamique, a permis l'identification précise des tronçons spécifiques de chaque tube où il est nécessaire de réaliser une action optimisée sur l'éclairage pour se conformer à la norme (au lieu d'agir sur toute la longueur du tunnel): changements de variation de l'intensité des luminaires, application de peintures porcélaniques,…; ces actions étant vérifiées lors d'une deuxième évaluation dynamiques.

L'intérêt de cette communication se trouve dans l'innovation technique et l'applicabilité et la transférabilité des résultats à ces tunnels qui ont besoin d'une adéquation à la norme applicable pour un éclairage efficace.

1.- ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA PONENCIA.

La adecuación de la iluminación de los túneles existentes en las diferentes redes de carreteras, exige que la instalación de alumbrado deba cumplir una serie de parámetros como los definidos en diferentes normativas o guías al respecto: "Orden Circular 36/2015: Criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles" del Ministerio de Fomento" en el caso de la Red de Carreteras del Estado de España, y así asegurar a los usuarios unos requisitos mínimos de seguridad en los túneles, según se define también en la "Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras" y en su trasposición al ordenamiento jurídico español con el "Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado".

El Objetivo General (OG) de la ponencia es el de mostrar cómo "un análisis adecuado de la iluminación de un túnel puede conllevar por un lado un ahorro en el coste de iluminación del mismo, y por otro, analizar cómo diferentes actuaciones de mantenimiento sobre los hastiales de un túnel pueden mejorar los parámetros lumínicos del mismo y, por lo tanto, la seguridad vial para los usuarios".

El OG de esta ponencia se centra en el caso concreto del túnel de l'Ollería: un túnel compuesto por dos tubos unidireccionales de 580 y 960 m de longitud, con cinco niveles de iluminación y ubicado en la autovía A-7, en la provincia de Valencia.

En septiembre de 2015 se traspasó la titularidad del tramo de carretera en el que se ubica el túnel de la Generalitat Valenciana al antiguo Ministerio de Fomento de España, ahora Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Inicialmente, la iluminación de este túnel estaba formada por lámparas de VSAP, con refuerzo tanto en la boca de entrada como en la de salida, pero a consecuencia de los habituales fallos de luminarias y la dificultad para encontrar repuestos de las mismas, a finales de 2019 se sustituyó el alumbrado permanente del túnel por lámparas LED, manteniendo la iluminación de refuerzo existente de VSAP.

A su vez, este OG puede clasificarse en los siguientes Objetivos Específicos (OE):

OE 1: Análisis de la iluminación (luminancia en los cinco niveles de iluminación) del túnel de l'Ollería mediante sistemas de alto rendimiento.

OE 2: Detección de las zonas de ahorro y de mejora en cuanto a la iluminación del túnel mediante comparativa de los valores medidos con valores teóricos según normativa (OC 36/2015).

OE 3: Análisis de la posible mejora en los parámetros lumínicos tras la aplicación en hastiales de pintura porcelánica en el tubo sentido Alicante, y de limpieza con agua a alta presión en el tubo sentido Valencia.

El interés de esta comunicación radica en la innovación técnica y la aplicabilidad y transferibilidad de los resultados a aquellos túneles que necesitan una adecuación a la normativa aplicable para una eficiente iluminación.

2.- DESARROLLO Y CONTENIDO DE LA COMUNICACIÓN.

Los retos planteados por el cambio climático, la sostenibilidad y la resiliencia de las infraestructuras, así como la transformación tecnológica del transporte por carretera están suponiendo una redefinición de las normas de diseño y gestión de las carreteras y, por supuesto, de los túneles de carretera. Siendo la iluminación de los túneles un aspecto ya analizado en profundidad hasta la fecha, en este trabajo se pretende abordar cómo evaluar detalladamente los parámetros lumínicos en un túnel con el fin de poder proponer mejoras en el control de este tipo de instalaciones y de esta manera aprovechar esta sinergia en cuanto a la eficiencia energética asociadas a esas mejoras.

La Red de Carreteras del Estado de España (RCE) se compone de más de 26.000 kilómetros de carreteras (autopistas, autovías, carreteras multicarril y convencionales) en los que hay más de 350 túneles, con una longitud total superior a los 300 km. De estos, cerca de 80 túneles se encuentra dentro del ámbito de aplicación de la Directiva 2004/54/CE, es decir, pertenecen a la red transeuropea y tienen más de 500 m de longitud.

Independientemente de lo anterior, la reglamentación que regula los requisitos mínimos de seguridad en todos los túneles de la RCE es la contenida en el Real Decreto 635/2006. Mientras que, lo que respecta a la iluminación de estos túneles, se rige por la "Orden Circular 36/2015: Criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles" del Ministerio de Fomento, en la que se determinan los valores de los parámetros lumínicos que deben cumplir los túneles de la RCE.

2.1.- Evaluación dinámica inicial de la iluminación en el túnel de l'Ollería.

Como ya se ha mencionado anteriormente, este estudio se centra en evaluar la iluminación del túnel de l'Ollería, perteneciente a la RCE y que está compuesto de dos tubos unidireccionales, de 960 y 580 m de longitud, y que cuenta con cinco niveles de iluminación: soleado, nublado, crepuscular, nocturno (permanente al 100%) y nocturno reducido (permanente al 50%).

2.1.1.- Sistema de alto rendimiento ILLUMETRIC.

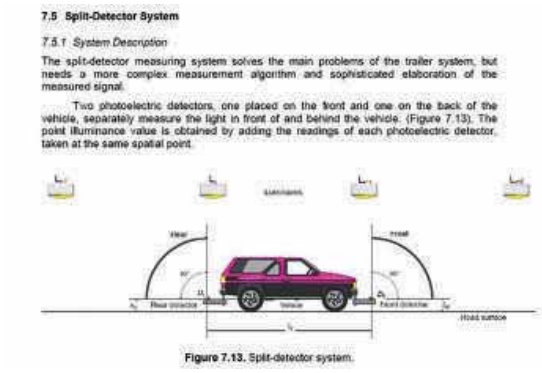
Con el propósito de analizar detalladamente la iluminación (luminancia) de los niveles de iluminación del túnel de l'Ollería (Objetivo Específico 1), se llevó a cabo una evaluación dinámica inicial utilizando sistemas de alto rendimiento que cumplan las normativas/especificaciones adecuadas al respecto. En concreto, se utilizó el sistema dinámico ILLUMETRIC que consiste en un vehículo instrumentado que realiza la toma de medidas luminotécnicas y de inventario a la velocidad máxima permitida de la vía, sin ninguna afección al tráfico ni suponiendo cortes de carril, lo cual es una ventaja importante desde el punto de vista de las tareas de conservación del túnel.

Imagen 1.- Mediciones dinámicas de la iluminación en el túnel de l'Ollería con el vehículo ILLUMETRIC.

Las medidas de luminancia (L) mediante ILLUMETRIC se llevaron a cabo mediante el uso de cámaras calibradas en "L" (lo que se conoce como "ILMD" - Imaging Luminance Measurement Device), en lugar de usar luminancímetros estáticos, como se hacía y aun se sigue haciendo en muchas ocasiones. Esta medición se ha realizado según se describe en la instrucción técnica complementaria EA-08 del proyecto del nuevo "Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior", en la cual se hace referencia a la "UNE-EN-13201-4: "Iluminación de carreteras. Parte 4: Métodos de medida de las prestaciones de iluminación"" y al "Technical report CIE-194:2011: "On site measurement of the photometric properties of road and tunnel lighting" acerca de cómo deben hacerse estas mediciones de luminancia con sistemas ILMD.

Imagen 2.- Medida de luminancia mediante luminancímetros manuales (una vez realizado un corte de carril) y medida de luminacia mediante ILMD instalado en equipo de alto rendimiento (sistema ILLUMETRIC: vehículo capaz de circular a velocidad máxima de la vía sin corte de carril).

Por otra parte, y aunque no es objeto de este trabajo, este sistema ILLUMETRIC también es capaz de la evaluación dinámica de la iluminancia ("E") cumpliendo las especificaciones al respecto, es decir, debe realizarse la medición a una altura menor de 30 centímetros respecto del nivel del suelo (según "UNE-EN-13201-4", ya mencionada anteriormente) y cumpliendo el también citado "Technical report CIE-194:2011" que describe el concepto de "luxómetro partido" para medir "E" de manera dinámica (dos grupos de luxómetros situados uno en la parte delantera y otro en la trasera de un vehículo que circule a la velocidad máxima de la vía).



7.5 Split-Detector System

7.5.1 System Description

The split-detector measuring system solves the main problems of the trailer system, but needs a more complex measurement algorithm and sophisticated elaboration of the measured signal.

Two photoelectric detectors, one placed on the front and one on the back of the vehicle, separately measure the light in front of and behind the vehicle. (Figure 7.13). The point illuminance value is obtained by adding the readings of each photoelectric detector, taken at the same spatial point.

Figure 7.13. Split-detector system.

Imagen 3.- (Izquierda) Definición de "Split-detector system o luxómetro partido" según el informe CIE-194:2011 e (derecha) imagen del sistema ILLUMETRIC dotado de un luxómetro partido instalado a 30 centímetros del nivel del suelo para poder evaluar iluminancia a la velocidad máxima de la vía.

2.1.2.- Resultados de la evaluación dinámica inicial de la iluminación del túnel de l'Ollería.

La caracterización dinámica de los valores de luminancia se llevó a cabo con el sistema de alto rendimiento ILLUMETRIC a una velocidad de 80 Km/h (máxima permitida en el túnel), sobre cada uno de los carriles de los dos tubos en los cinco niveles de iluminación: soleado, nublado, crepuscular, nocturno (circuito permanente al 100%) y nocturno reducido (circuito permanente al 50%).

Los resultados que se obtienen se centran en la variación de luminancia a lo largo del túnel, con los valores de la rejilla de luminancia desplazada a lo largo del túnel en intervalos de 5 metros como máximo y así tener la curva real de cada uno de los carriles por sentido y por cada uno de los niveles de iluminación, aportando además los valores de luminancia media (Lm), luminancia mínima, luminancia máxima, uniformidad global (Uo) y uniformidad longitudinal (UL).

Imagen 4.- Ejemplo de rejilla deslizante en carril lento del túnel de l'Ollería

Una vez obtenidos los valores de la luminancia a lo largo de cada carril y nivel, se llevó a cabo una comparativa de estos valores medidos con los valores reales que se extraen de la normativa aplicable en este túnel, la "Orden Circular 36/2015: Criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles" del Ministerio de Fomento. Mediante esta comparativa, se ha podido detectar el grado de cumplimiento de los niveles mínimos fijados por la normativa, así como en qué zonas del túnel existen posibilidades de ahorro lumínico (sobreiluminación con respecto a la normativa) y en qué zonas sería necesaria una actuación para mejorar los valores lumínicos.

A modo ilustrativo, se muestran a continuación un ejemplo de estas comparativas en cuanto a luminancias, para el caso concreto del "nivel soleado" y en los dos niveles nocturnos: "permanente al 100%" y "permanente reducido al 50%".

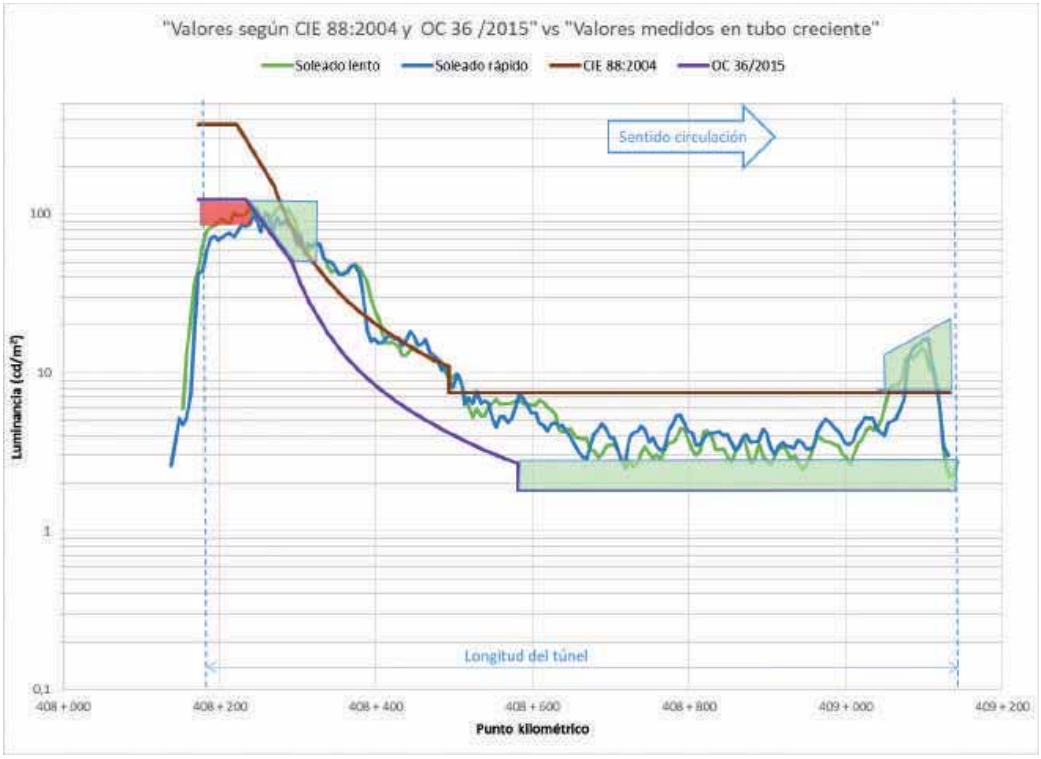


Imagen 5.- Ejemplo de comparativa entre los valores de luminancia en nivel soleado medidos con sistema de alto rendimiento (en carril lento y rápido, sentido creciente) y los valores teóricos según la normativa (OC 36/2015). Se da la circunstancia que se ha realizado también comparativa con valores teóricos según "CIE 88: CIE 88:2004. Guía parea el alumbrado de túneles de carretera y pasos inferiores". Esta comparativa permite detectar zonas de ahorro o de necesidad de mejora.

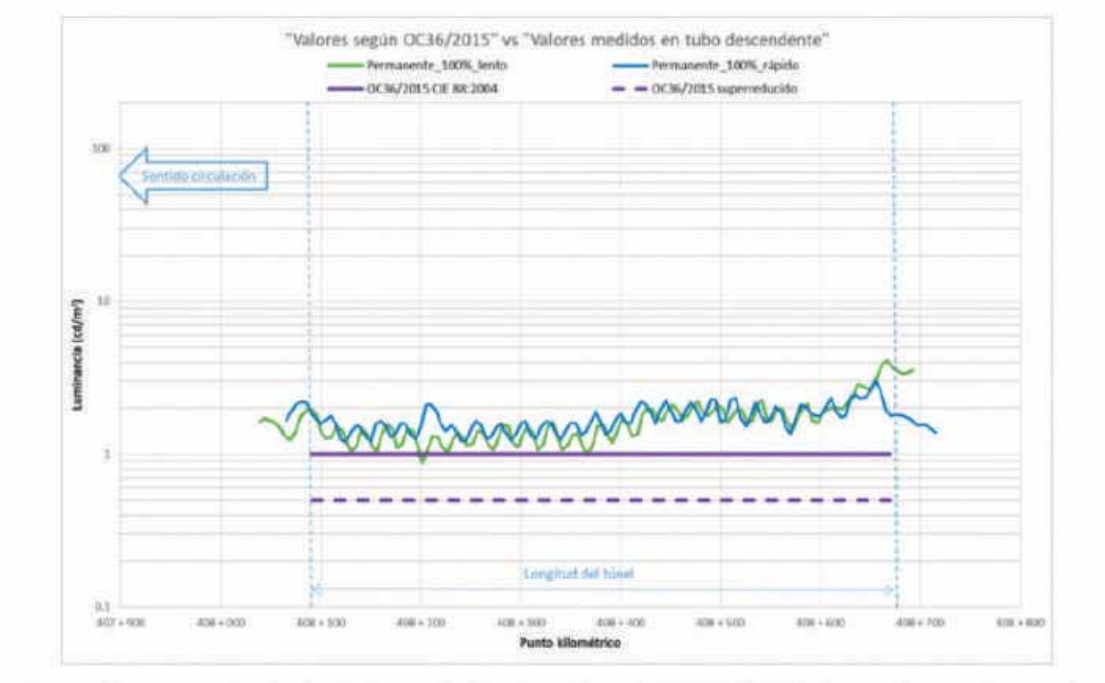


Imagen 6.- Ejemplo de comparativa entre los valores de luminancia en nivel permanente al 100% medidos con sistema de alto rendimiento (en carril lento y rápido, sentido decreciente) y los valores teóricos según la normativa (OC 36/2015).

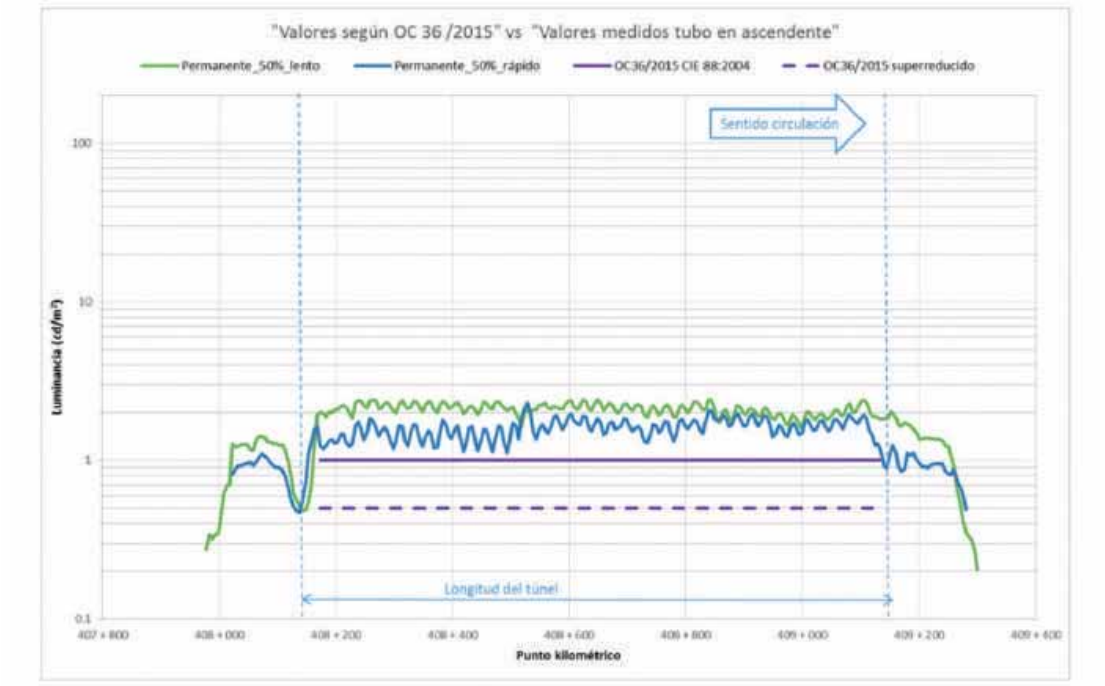


Imagen 7.- Ejemplo de comparativa entre los valores de luminancia en nivel permanente al 50% medidos con sistema de alto rendimiento (en carril lento y rápido, sentido creciente) y los valores teóricos según la normativa (OC 36/2015).

De igual manera, se llevó a cabo una comparativa de los valores de uniformidades en cada uno de los carriles en cada uno de los cinco niveles de iluminación frente a los valores teóricos de la OC 36/2015. En los valores medidos se observaron diversas fluctuaciones, detectándose también zonas en las que las uniformidades no alcanzaban los valores mínimos de la OC 36/2015, y por lo tanto ser zonas susceptibles de mejora (como se podrá observar en el apartado 2.2, en el que se describen las actuaciones llevadas a cabo para la mejora de las uniformidades).

El hecho de medir luminancias con cámaras calibradas en luminancia ha permitido obtener imágenes de las zonas donde han podido existir valores anormales y así ayudar a interpretar su origen (por ejemplo, presencia de marcas viales que implican valores de luminancia o uniformidades anormales, presencia de apartaderos iluminados,…). La imagen siguiente muestra un ejemplo (para el caso de las medidas realizadas en el régimen permanente al 100%).

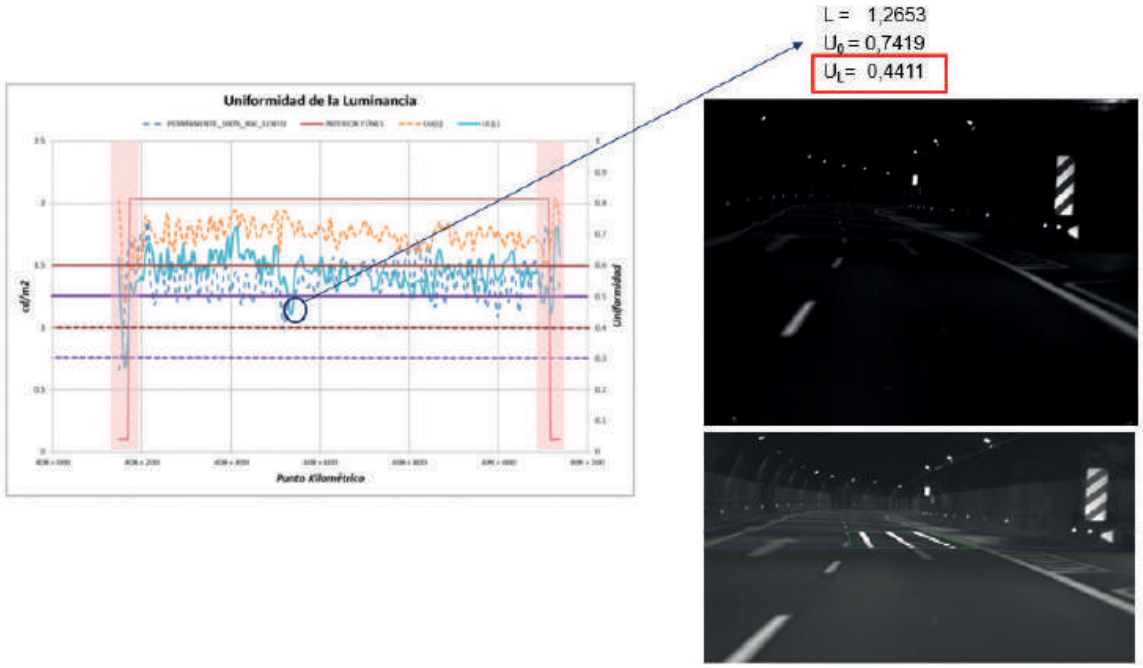


Imagen 8.- Ejemplo de comparativa entre los valores de uniformidades globales y longitudinales en nivel permanente al 100% medidos con sistema de alto rendimiento en carril lento, sentido creciente) y los valores teóricos según la normativa (OC 36/2015). También se ilustran los valores teóricos según "CIE 88: CIE 88:2004". En este ejemplo se ilustra cómo la presencia de una marca vial (símbolo) y la presencia de un apartadero influye en los valores anómalos de las uniformidades.

2.1.3.- Ahorro potencial resultante de la comparativa entre valores medidos de iluminación y valores teóricos.

La precisión de la comparativa realizada entre los valores medidos por el sistema de alto rendimiento ILLUMETRIC y los valores teóricos según la OC 36/2015 ha permitido detectar tanto las zonas de potencial ahorro, como en las que es necesaria una actuación de mejora de iluminación (Objetivo Específico 2). En el caso de las zonas de ahorro, se ha realizado un estudio analizando la cantidad de CO2 emitido a la atmósfera que supondrá el ajuste de los valores de luz que existen a los valores de luz que cumplen estrictamente los de la OC 36/2015 en las zonas donde se ha detectado que existe sobreiluminación.

Para ello, se han estimado las horas de funcionamiento de cada uno de los cinco niveles de iluminación y el ahorro conseguido al eliminar el alumbrado innecesario quedando de la siguiente manera:

- La eliminación del refuerzo en la zona de salida en los niveles soleado, nublado y crepuscular supone un ahorro de 4,8 KW durante 4.850 horas al año.
- La adecuación del nivel permanente reducido, supone un ahorro de 3,54 KW durante 1.725 horas al año.
- De manera global, la adecuación de la iluminación del túnel de l'Olleria a los valores de la normativa (OC 36/2015) permite reducir 21 toneladas de CO2 liberadas a la atmósfera anualmente.

2.2.- Actuaciones para la mejora de los parámetros lumínicos del túnel de l'Ollería.

Una vez realizada la primera evaluación dinámica de la iluminación del túnel en el 2020, se llevaron a cabo una serie de actuaciones para mejorar los parámetros lumínicos (luminancia o uniformidades) en cada uno de los tubos (Objetivo Específico 3). Estas actuaciones han consistido en:

- Tubo sentido Alicante (pp.kk. crecientes): limpieza con agua a presión (unos 400 bares) y posterior aplicación de dos capas de pintura porcelánica en los hastiales.

Imagen 9.- Hidrolimpieza de hastiales del tubo sentido Alicante.

Imagen 10.- Pintura de hastiales del tubo sentido Alicante.

- Tubo sentido Valencia (pp.kk. decrecientes): sólo limpieza con agua a presión (unos 400 bares) de ambos hastiales.

Imagen 11.- Hidrolimpieza de hastiales del tubo sentido Valencia.

2.2.1.- Resultados lumínicos tras las actuaciones de mejora.

Con el fin de conocer la influencia de estas dos actuaciones en la mejora de los valores lumínicos en cada tubo, se llevaron a cabo nuevas evaluaciones dinámicas (sólo en nivel soleado, permanente 100% y permanente reducido al 50%) con el mismo sistema de alto rendimiento (ILLUMETRIC). Previo a estas medidas, se realizó el ajuste de determinadas luminarias en base a los resultados de la primera medición dinámica y su comparación con los valores fijados por la Orden Circular 36/2015:

- Eliminación de luminarias de refuerzo de VSAP en la zona interior y de salida del túnel en los niveles soleado, nublado y crepuscular.
- Ajuste (reducción) de la cantidad de luz emitida por las luminarias LED en algunas zonas del túnel en nivel nocturno (permanente al 100%).
- Revisión del nivel nocturno reducido (permanente al 50%), para hacer efectiva la reducción de iluminación que no se observó en la primera medición.

Las nuevas evaluaciones dinámicas muestran las siguientes consideraciones:

- La eliminación de luminarias de refuerzo (VSAP) en la zona de salida de cada tubo del túnel en nivel soleado, supone un ahorro lumínico al respecto, independientemente de haber aplicado un repintado o una limpieza de las paredes laterales.

Cabe destacar de nuevo, como ya se ha mencionado anteriormente que, junto con la eliminación de las luminarias de refuerzo en la zona de salida, se eliminaron también una serie de luminarias de VSAP en la parte interior del túnel. Es ésta la razón por la que el valor de luminancia en la parte central del túnel se reduce ligeramente, a la vez que posee menos variaciones, como se muestra en la imagen siguiente.

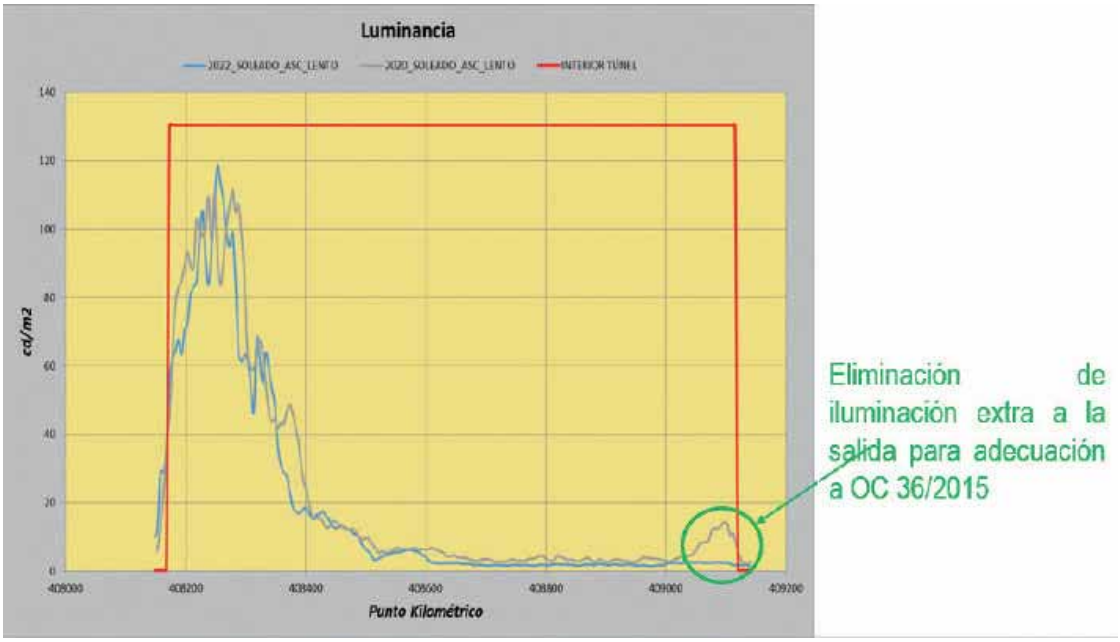


Imagen 12.- Ejemplo de ahorro conseguido en la zona de salida (nivel soleado) tras eliminar luminarias VSAP en zona interior y refuerzo en la zona de salida del tubo creciente.

Imagen 13.- Imagen de la iluminación en el túnel de l'Ollería nivel soleado – zona de salida en 2020, con iluminación LED+VSAP+refuerzo en salida.

Imagen 14.- Imagen de la iluminación en el túnel de l'Ollería nivel soleado – zona de salida en 2022, sólo con iluminación LED.

- El ajuste de luminarias LED en algunas zonas de cada tubo del túnel en el nivel nocturno (permanente al 100%), así como la revisión de la efectiva reducción en el nivel nocturno reducido (permanente al 50%), han supuesto un ahorro lumínico al respecto, independientemente de haber realizado un repintado y/o una hidrolimpieza de los hastiales.

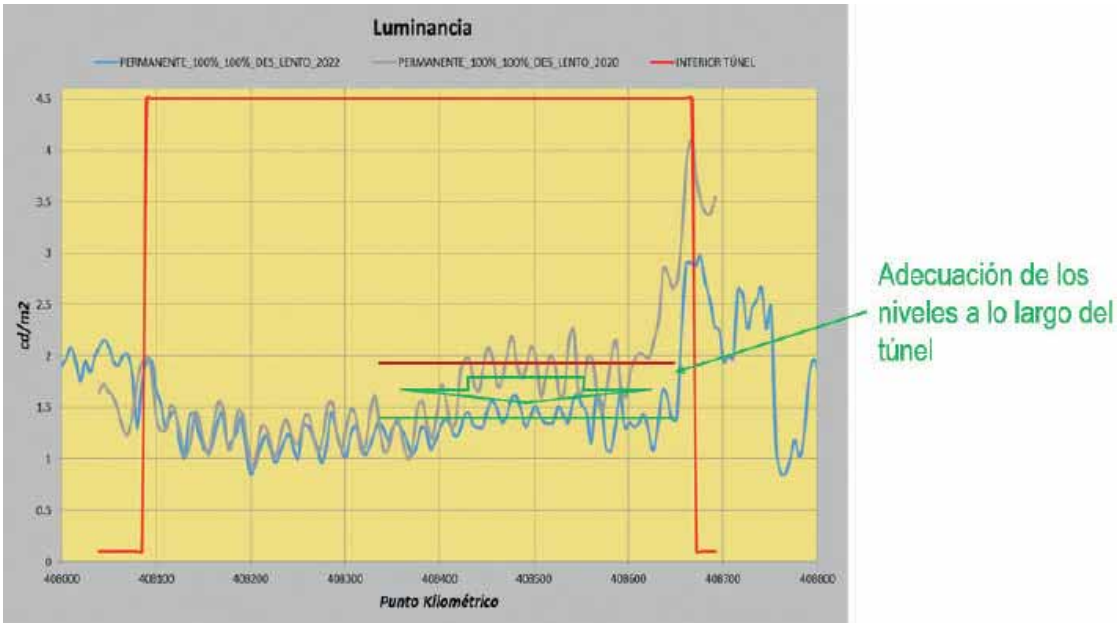


Imagen 15.- Ejemplo de ahorro conseguido en túnel con nivel nocturno (permanente al 100%) sentido decreciente, tras ajuste de luminarias e hidrolimpieza de hastiales).

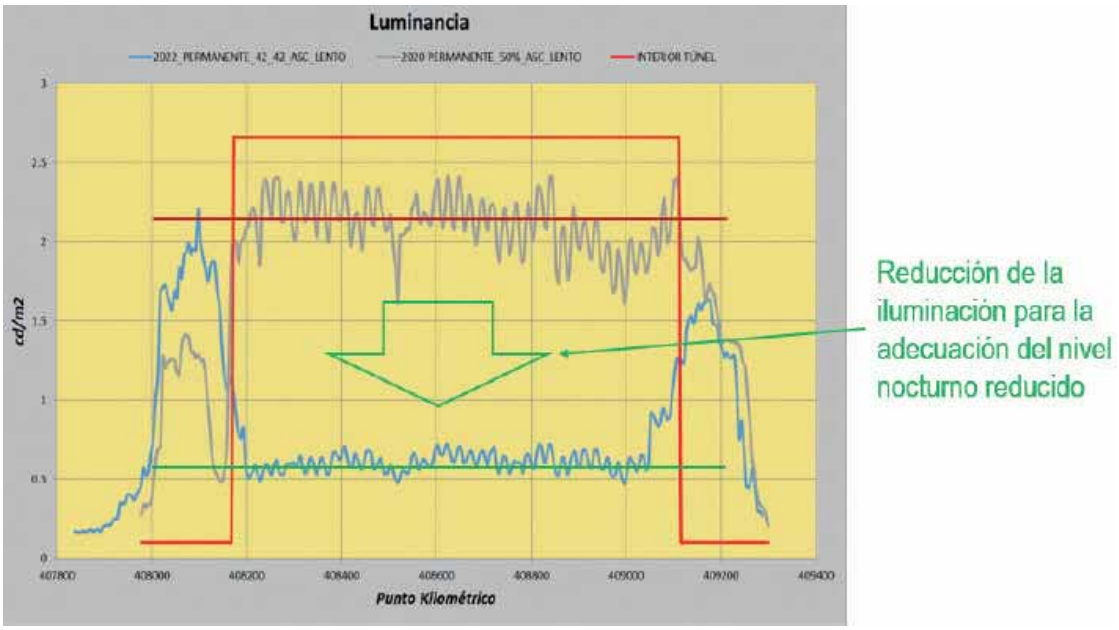


Imagen 16.- Ejemplo de ahorro conseguido en túnel con nivel nocturno reducido (permanente al 50%) sentido creciente, tras ajuste de luminarias, hidrolimpieza y pintado de hastiales).

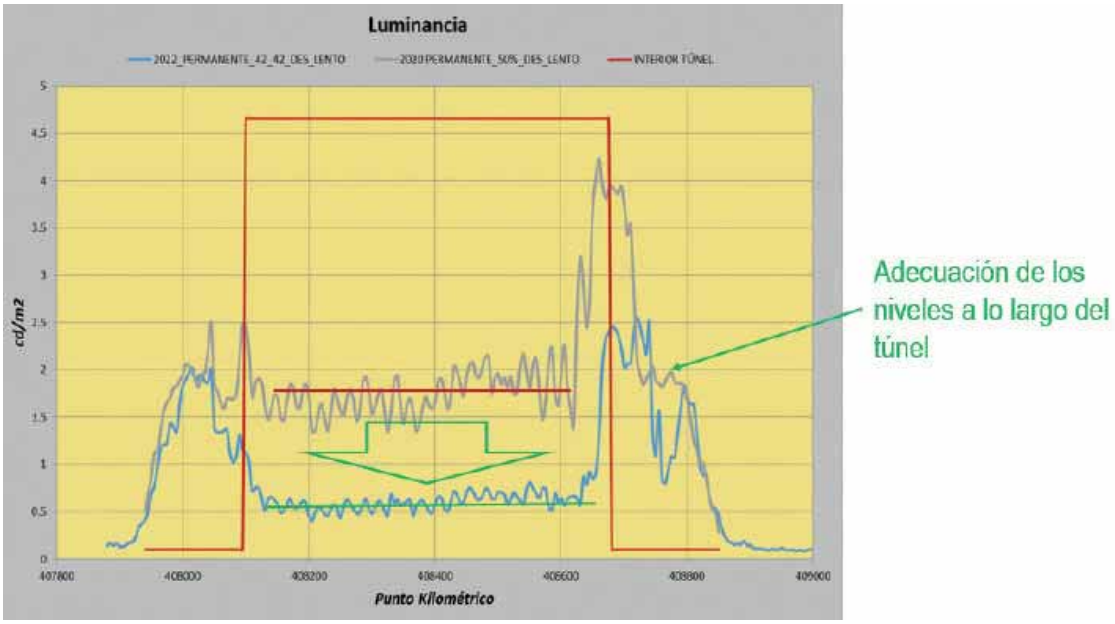


Imagen 17.- Ejemplo de ahorro conseguido en túnel con nivel nocturno reducido (permanente al 50%) sentido decreciente, tras ajuste de luminarias e hidrolimpieza de hastiales.

- Mejora de la uniformidad (tanto global, como longitudinal), en los tres niveles medidos, pero destacando especialmente la mejora en el nivel soleado:
    - Tubo sentido Alicante, donde se ha realizado limpieza con agua a presión y posterior pintado de hastiales: La mejora de las uniformidades ha sido importante. También se ha observado que, con la aplicación de pintura, la mejora de luminancia ha sido mínima, pese a la mejora de la reflexión de la luz en hastiales.
    - Tubo sentido Valencia, donde se ha realizado únicamente limpieza de hastiales con agua a presión: Se ha producido una ligera mejora de uniformidades. En este caso, no se ha producido ninguna mejora de la luminancia.

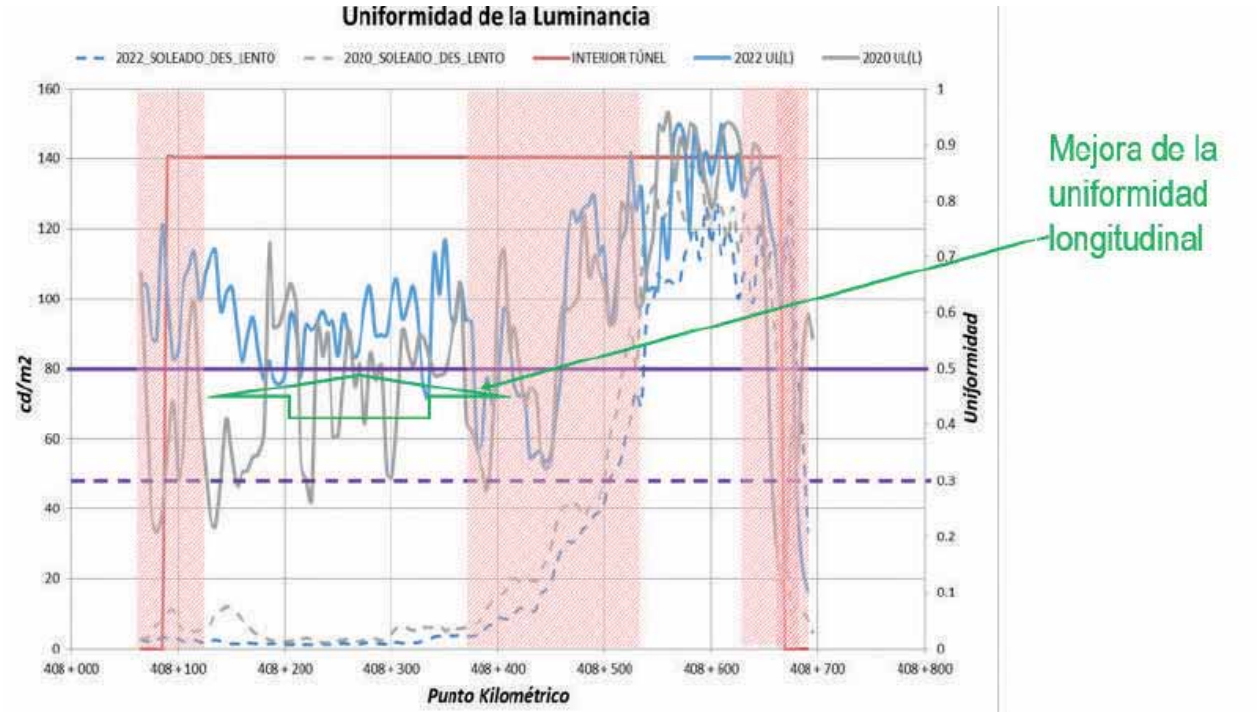


Imagen 18.- Ejemplo de mejora en la uniformidad longitudinal (nivel soleado) gracias a la hidrolimpieza de hastiales del tubo decreciente.

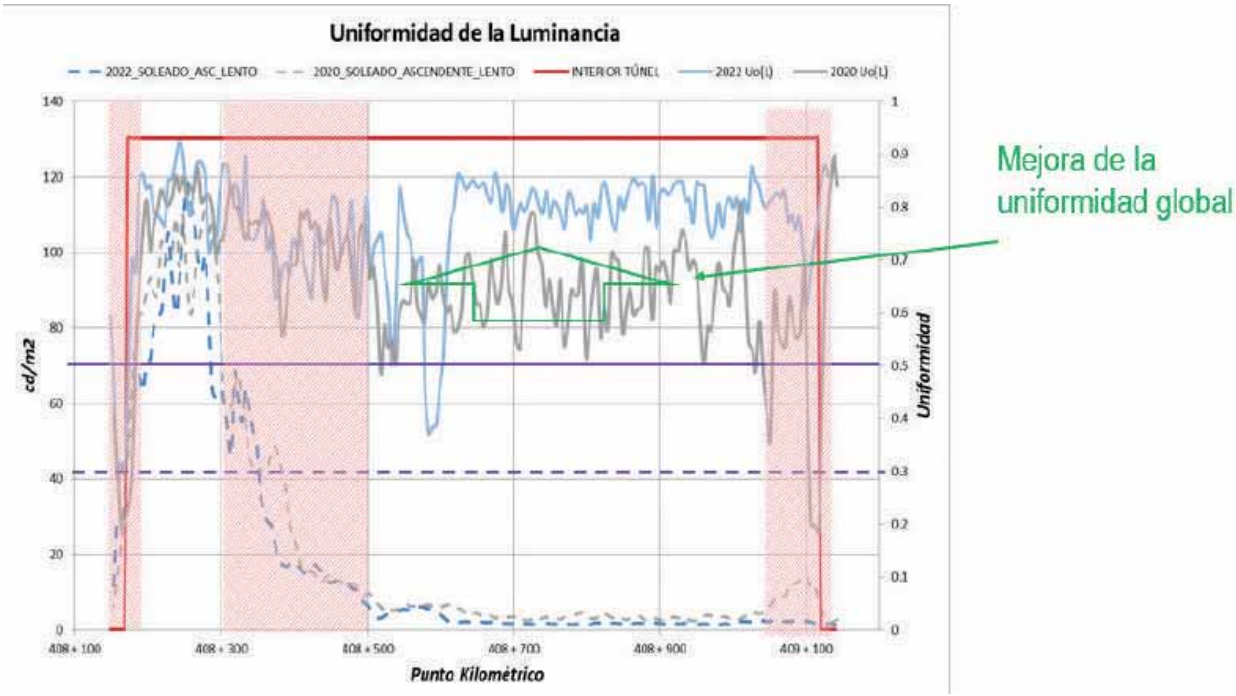


Imagen 19.- Ejemplo de mejora en la uniformidad global (nivel soleado) gracias a la aplicación de hidrolimpieza y pinturas porcelánicas en hastiales del tubo creciente.

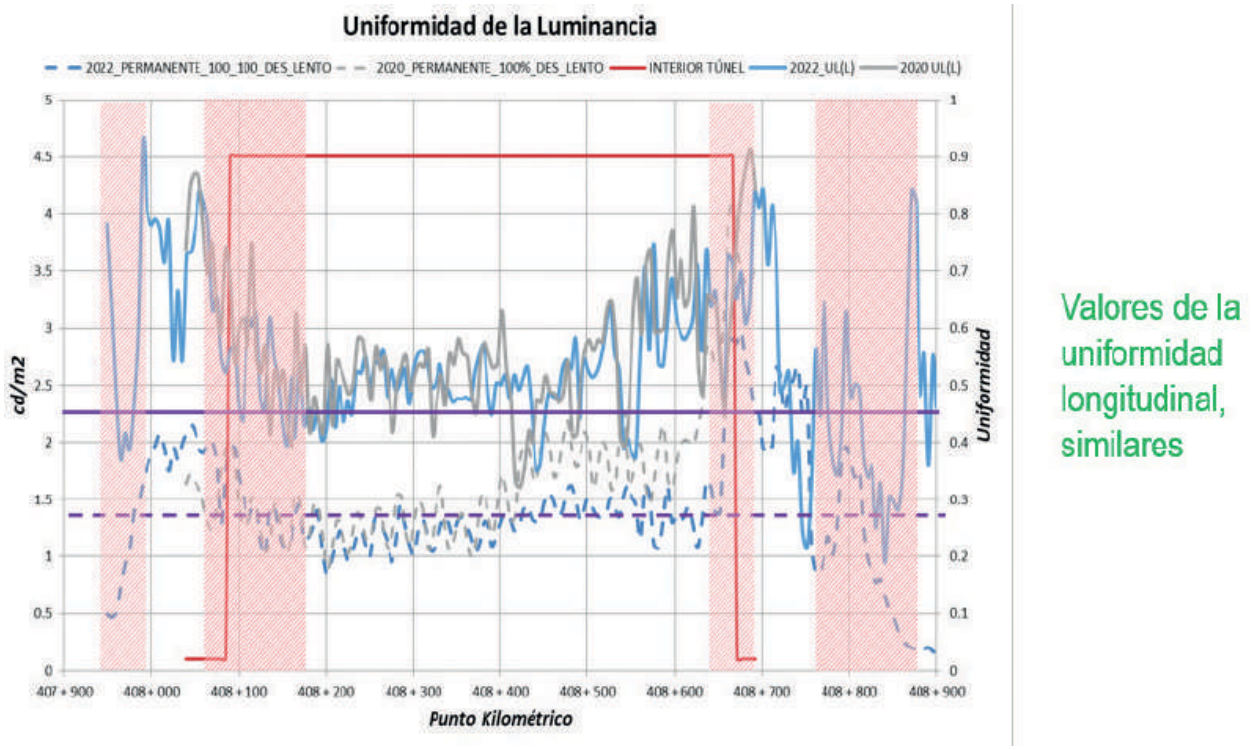


Imagen 20.- Ejemplo de variación en la uniformidad longitudinal (nivel nocturno - permanente al 100%) gracias a la hidro-limpieza de hastiales del tubo decreciente.

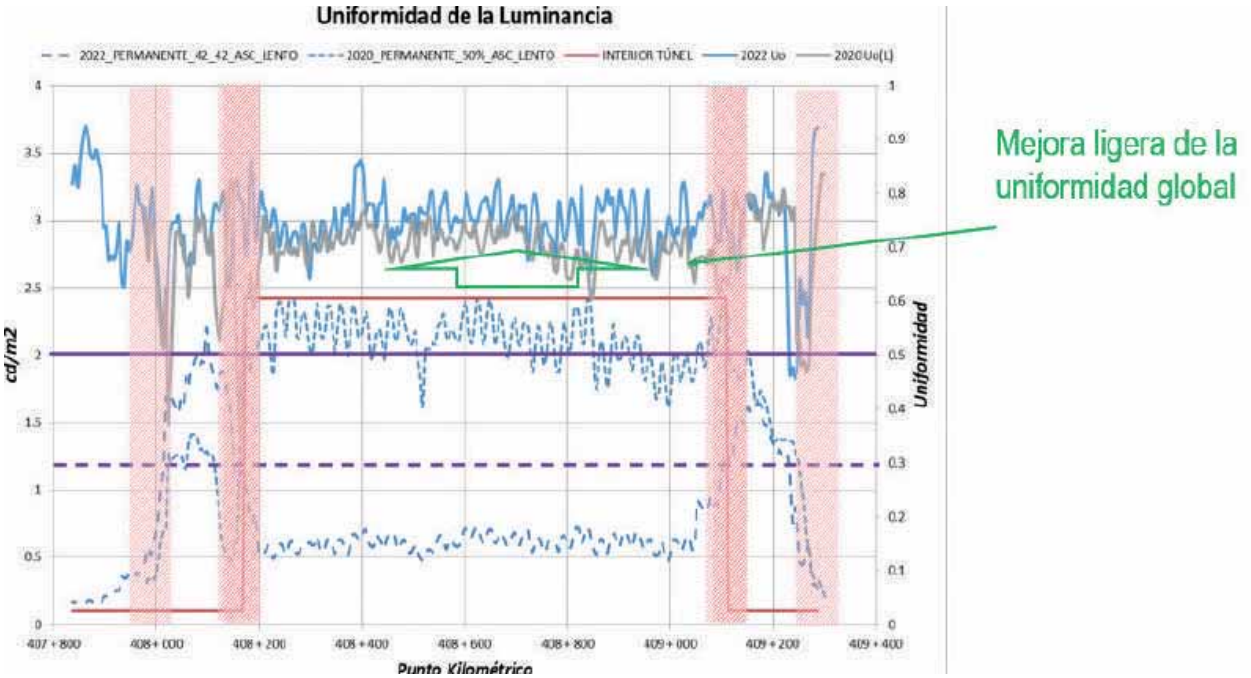


Imagen 21.- Ejemplo de mejora en la uniformidad global (nivel soleado) gracias a la aplicación de hidrolimpieza y pinturas porcelánicas en hastiales del tubo creciente.

3.- CONCLUSIONES.

En esta comunicación se muestran los resultados reales de un caso concreto de evaluación dinámica de la iluminación (luminancia) del Túnel de l'Ollería (compuesto por dos tubos unidireccionales, de 960 y 580 m de longitud, ubicado en la autovía A-7 (provincia de Valencia) y con cinco niveles de iluminación) y posterior comparativa con los valores teóricos según normativa aplicable (Orden Circular 36/2015 del Ministerio de Fomento de España).

La obtención de medidas continuas procedentes de esta evaluación dinámica, ha permitido, en primer lugar, comprobar el cumplimiento de la luminancia y uniformidades mínimas establecidas en la normativa para cada uno de los niveles lumínicos, cosa que se desconocía por ser un túnel traspasado al Estado desde la Administración Autonómica Valenciana. Además, ha sido posible identificar de forma precisa los tramos de cada tubo en los que era necesario realizar una actuación sobre la iluminación para adecuarse a la normativa (en lugar de actuar a lo largo de toda la longitud del túnel):

- Eliminación de luminarias VSAP, tanto en la zonas interiores, como de refuerzo en las zonas de salida (nivel soleado, nublado y crepuscular) de ambos tubos con el consiguiente ahorro energético.
- La adecuación de las luminarias LED en diversas zonas del túnel, tanto en el nivel nocturno (permanente 100%) como en el nocturno reducido (permanente al 50%) donde es posible esta reducción de cantidad de luz al haberse detectado una sobreiluminación.
- La adecuación de la iluminación del túnel de l'Olleria a los valores de la normativa (OC 36/2015) permite reducir en 21 las toneladas de CO2 liberadas a la atmósfera anualmente.

Paralelamente, se han llevado a cabo dos actuaciones en los hastiales de ambos tubos del túnel (hidrolimpieza a alta presión en ambos tubos y posterior aplicación de pinturas porcelánicas únicamente en el tubo sentido Alicante), con el fin de mejorar, en la medida de los posible, los valores lumínicos. Los resultados muestran que:

- La aplicación de pintura porcelánica en hastiales permite aumentar considerablemente las uniformidades (global y longitudinal) de la iluminación, siendo más acusada en el caso del nivel soleado.
- La limpieza de hastiales con agua a presión consigue un ligero aumento de las uniformidades (global y longitudinal) de la iluminación, en el caso del nivel soleado
- Ni la hidrolimplieza y ni las pinturas porcelánicas, consiguen aumentar la luminancia, pese a mejorar la reflexión de la luz.

El interés de esta comunicación radica en la innovación técnica, la aplicabilidad y transferibilidad de los resultados a aquellos otros túneles en los que es conveniente revisar que la iluminación cumple la normativa, así como realizar una adecuación de la misma para conseguir una iluminación más eficiente que suponga un menor consumo eléctrico.

ILUMINACIÓN LED ADAPTATIVA EN UN TÚNEL URBANO. FUNCIONAMIENTO Y PRIMERAS CONCLUSIONES DE EXPLOTACIÓN. TÚNEL DE LA VILA OLÍMPICA

Roberto Martinez Garcia
Coordinación General de Infraestructuras
Área Metropolitana de Barcelona

Francisco Javier Traveria Molero
Technical & Innovation Director
C Y G CARANDINI, S.A.U.

La iluminación LED de los túneles viarios cubriendo todos los niveles de iluminación requeridos se ha convertido en una realidad en los últimos años. El diseño, cumpliendo los niveles exigidos por la normativa, para el escenario de mayor requerimiento, hacen necesario el estudio de implementación de sistemas de control dinámico del alumbrado, aprovechando las prestaciones de la iluminación LED, particularmente en aquellos túneles donde los valores que definen la iluminación presentan una gran y continua variación en el tiempo, como es el caso de túneles urbanos.

Este ha sido el caso del túnel de la Vila Olímpica, de la Ronda Litoral de Barcelona, donde se ha implementado un sistema de control adaptativo en función de los valores de luminancia de boca y estados del tráfico y del pavimento donde, después de un año de funcionamiento, se valoran ahorros de un 35%-40% respecto de la instalación original en VSAP, teniendo además en cuenta que se han tenido que doblar los niveles lumínicos para adaptarse a las normativas vigentes.

Del funcionamiento global del sistema de alumbrado del túnel se pueden ya extraer unas primeras conclusiones de explotación, que deriven en procesos de retroalimentación para la mejora de la instalación y su operación/explotación. Se analizan aspectos como los niveles máximos reales de iluminación de boca respecto de los valores de diseño, los porcentajes de ocurrencia de las diferentes escenas implementadas en el algoritmo de control de alumbrado y las particularidades y discrepancias entre los diferentes sentidos de tráfico del túnel en cuando a las variables de los sensores y sus causas, concluyendo en algunos puntos de reflexión a fin de mejorar la instalación.

ADAPTIVE LED LIGHTING IN AN URBAN TUNNEL. OPERATION AND FIRST OPERATIONAL CONCLUSIONS. VILA OLÍMPICA TUNNEL

Tunnel LED Lighting covering all Lighting levels required has become a reality for the last years. The design, complying with the demanded levels by the norm and for the most exigent scenario, lead to the necessity of dynamic control systems implementation, taking advantage of the LED lighting performance, in those tunnels where the values that define the lighting show a great and continuous variation in time, which is the case of urban tunnels.

This is the case of Vila Olímpica Tunnel, in the Ronda Litoral in Barcelona, where an adaptative control system has been implemented depending on luminance values in the entrance and traffic and pavement status where after one year of functioning, savings of 35%-40% are valued in comparison with the original installation in VSAP. In addition, we must consider that lighting levels have been doubled to adapt the installation to the current norms.

From the global functioning of the tunnel lighting system, some conclusions can be obtained already, which lead to retro alimentation processes for the installation improvement and its operation/exploitation. Some aspects, in respect of design values are analyzed, such as the entrance maximum real lighting levels, or the occurrence percentage of the different scenes implemented in the lighting control algorithm and the particularities and discrepancies between the different tunnel traffic senses in regard of the sensors' variables and their causes, concluding in some reflection points with the aim of improving the installation.

ÉCLAIRAGE LED ADAPTATIF DANS UN TUNNEL URBAIN. FONCTIONNEMENT ET PREMIÈRES CONCLUSIONS OPÉRATIONNELLES. TUNNEL DE VILA OLÍMPICA

L'éclairage LED des divers tunnels routiers couvrant tous les niveaux d'éclairage requis, est devenu une réalité dans les dernières années. La conception, répondant aux niveaux exigés par la normalisation, pour le scénario le plus exigeant oblige à étudier l'implantation de système de contrôle dynamique de l'éclairage afin de profiter au mieux de l'éclairage LED, en particulier dans les tunnels ou les valeurs qui définissent l'éclairage présentent une variation importante et continue dans le temps, comme cela est le cas des tunnels urbains.

C'est le cas du tunnel de la Villa Olímpica, de la Ronda Litoral de Barcelona, ou on a implanté un système de contrôle adaptable en fonction des valeurs de la luminance d'entrée, de l'état du trafic et de la chaussée ou, après un an de fonctionnement, des économies d'énergie d'un 35%-40% ont été relevé en comparaison avec l'installation originale en VSAP, en tenant en compte de l'augmentation du niveau d'éclairage pour s'adapter aux normes en vigueur.

De l'exploitation globale du système d'éclairage du tunnel, on peut déjà tirer quelques pre-mières conclusions d'exploitation, qui débouchent sur des processus de retour d'expérience pour l'amélioration de l'installation et de son exploitation. Certains aspects tels que les ni-veaux d'éclairage réels maximaux d'entrée du tunnel par rapport aux valeurs de conception sont analysés, les pourcentages d'occurrence des différentes scènes implantées dans l'algo-rithme de contrôle de l'éclairage et les particularités et écarts entre les différents sens de circulation du tunnel en termes de variables capteurs et leurs causes, concluant par quelques points de réflexion afin d'améliorer l'installation.

1. CONTEXTO Y REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO

Durante los años 2019 y 2020 se realizó la instalación y puesta en marcha de una nueva solución de alumbrado LED adaptativo en el túnel de la Vila Olímpica en las Rondas de Barcelona. Esta intervención, se realizó en el marco de la estrategia de optimización de los sistemas de iluminación de estas y modernización de las instalaciones.

Para comprender la magnitud de la intervención, es relevante constatar que el túnel está ubicado en el cinturón litoral de la ciudad, conectando instalaciones tan relevantes como el Puerto de Barcelona con el aeropuerto y albergando el tráfico de personas y mercancías hacia todos los puntos de la península.

La intensidad media diaria del túnel es de más de cien mil vehículos al día, siendo uno de los ejes de circulación más importantes de la ciudad. El túnel presenta una longitud de más de 800 metros con una velocidad de circulación de diseño de 80 km/h.

El alumbrado del interior del túnel (permanente) se había sustituido de forma preliminar a la intervención llevada a cabo el pasado año. A efectos de ahorro energético, es importante constatar que el túnel estaba iluminado con más de 700 luminarias de Vapor de Sodio de Alta Presión, un valor que el proyecto de iluminación LED redujo a la mitad.

Ilustración 1. Pruebas de iluminación LED en una de las bocas del túnel (2015).

Además, para Carandini el túnel de la Vila Olímpica es un enclave especial, puesto que el mismo albergó las pruebas en campo de diseño de la luminaria LED T-MAX, una luminaria diseñada específicamente para túneles que sigue estando a la vanguardia de la técnica.

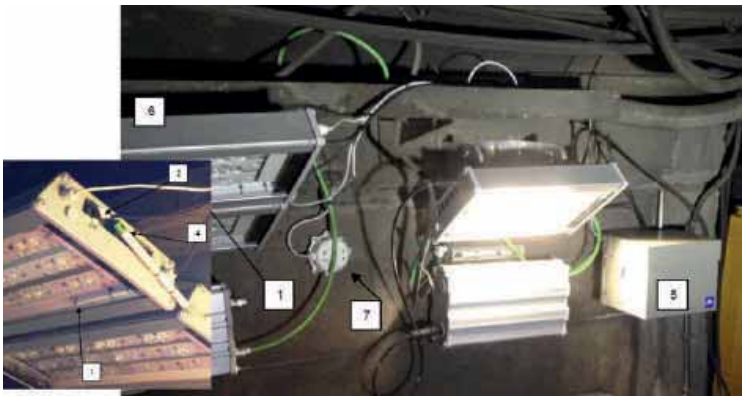


Ilustración 2. Luminarias con monitorización de la temperatura durante las pruebas de la luminaria en campo.

2. ALCANCE Y REQUERIMIENTOS FUNCIONALES

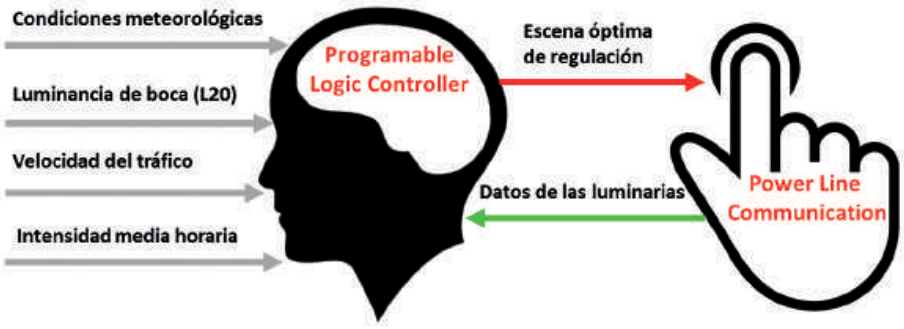
El sistema de iluminación adaptativa Controlux Túnel regula la iluminación de las instalaciones mediante la comunicación por onda portadora, haciendo que la instalación de luminarias, ejecutada toda en horas nocturnas para evitar congestiones de tráfico durante el día, fuera menos compleja que con otras metodologías de comunicación. La complicidad con los equipos de instalación fue crucial para evitar dificultades en fases posteriores de proyecto.

El sistema, más allá de apagar y encender la iluminación de refuerzo a diario, así como regular todas las luminarias mediante la señal del luminancímetro, también incluía el ajuste de la iluminación del túnel a otro tipo de señales como son la intensidad del tráfico horario (IMH) o el estado del pavimento (seco/mojado).

Ilustración 3. Luminancímetro inteligente para túneles.

Para captar las señales, se implementó unos fotómetros de última generación que además de captar la luminancia de boca (L20), un valor primordial para el ajuste de la iluminación de la boca del túnel a los requeridos en cada momento también es capaz de captar la densidad del tráfico y el estado de la calzada mediante tecnologías de vídeo:

Ilustración 4. Malla de medición de la densidad del tráfico y estado del pavimento.



Todo ello, con una función de histéresis que garantiza el funcionamiento estable del sistema de control sin variaciones de iluminación que perturben el paso de los usuarios por el túnel.

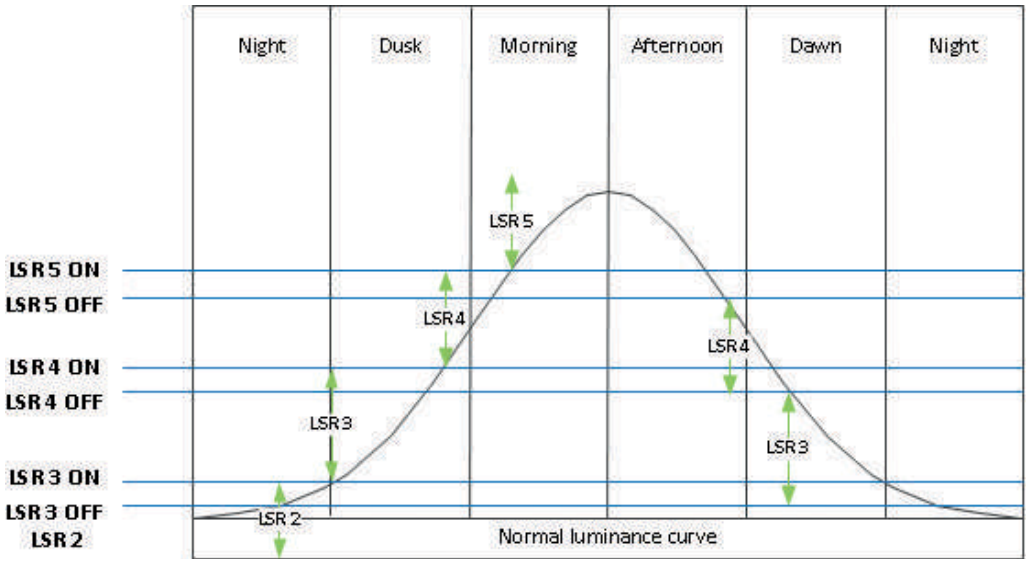


Ilustración 5. Diagrama explicativo de la activación/desactivación de escenas del sistema Controlux Tunnel.

La solución adoptada se basa en proveer las condiciones de iluminación óptimas para el paso de los usuarios sin prejuicio de la seguridad en la instalación, por ello, la estabilidad del sistema y el diseño de este considerando el "fallo a una posición segura" fueron claves para la implantación del sistema.

Además, el sistema optimiza el mantenimiento de las instalaciones, reportando los parámetros eléctricos de cada luminaria, así como monitorizando aquellas que se encuentran en fallo.

3. EJECUCIÓN DEL PROYECTO

Dada la relevancia de la infraestructura en la canalización del tráfico de la ciudad, los cortes de tráfico asociados a la instalación de componentes y puesta en marcha tuvieron que realizarse en horas nocturnas. Ello añadió complejidad al conjunto del proyecto, haciendo que la asistencia a la instalación de componentes, así como la preparación de la puesta en marcha fueran cruciales.

Ilustración 6. Iluminación del túnel, durante una de las noches en las que se realizó mediciones lumínicas.

El proyecto se ejecutó en varias fases, entre las que destacan la instalación de luminarias y elementos de control, así como la puesta en marcha de las instalaciones, ajuste de las mismas a los parámetros de proyecto, mediciones lumínicas y la validación de la integración en el SCADA de las instalaciones.

En las sesiones de mediciones lumínicas, se validó que se cumplían los requerimientos lumínicos para cada escena mediante la realización de mallas de medición en varias zonas del túnel y a varios niveles de regulación de la iluminación.

Para minimizar el impacto de la sesión de mediciones lumínicas, se movilizó gran parte de los efectivos del equipo de proyectos de Carandini, realizando mediciones en paralelo una vez las mallas de medidas estaban dispuestas:

Ilustración 7. El equipo de mediciones lumínicas trabajando para la elaboración de una malla de medición de los niveles lumínicos de la instalación.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Desde hace más de un año, hay otro túnel brillando acorde a las necesidades de los usuarios que transitan por el interior del mismo de forma continua. Todo ello, se ha realizado en unos tiempos difíciles y horas nocturnas.

La solución lumínica implementada, consta de una potencia instalada que es el 70% de la que había con la solución de VSAP original, teniendo siempre en cuenta que se han doblado los niveles lumínicos por exigencia de la adaptación normativa. Además, la solución LED provee un incremento de los niveles lumínicos en todas las zonas del túnel ya que el proyecto se ha hecho adaptando la iluminación del túnel a la normativa vigente, más exigente que la original.

En cuanto al uso de energía de la instalación, la solución de control Controlux Tunnel de Carandini ha desplegado más de 25 escenas lumínicas que permiten la adaptación de las condiciones de iluminación del túnel a la luminancia de boca (L20) así como a la densidad del tráfico (alto/medio) y el estado del pavimento (seco/mojado). El ahorro conseguido mediante la solución de control es entorno al 35-40 % respecto a la implementación de sistemas de apagado alternativo de luminarias (3 niveles de regulación por circuitos eléctricos). Todo ello, pone de manifiesto el grado de eficiencia de los sistemas actuales de regulación de instalaciones para túneles, permitiendo la adaptación de estas a las condiciones requeridas en cada momento sin prejuicio de la seguridad del tráfico ni los niveles de uniformidad en la misma.

Ilustración 8. Iluminación diurna durante una de las noches de puesta en marcha de la instalación.

5. CONCLUSIONES DE EXPLOTACIÓN

Después de un año de explotación de la instalación se ha procedido a analizar el comportamiento y casuísticas del sistema de control adaptativo del alumbrado en función de las variables de entrada al mismo y la correlación con los niveles (escenas) de iluminación que el sistema aplica. Se han estudiado los diferentes aspectos:

1. Análisis de valores lumínicos reales respecto de valores de diseño y conclusiones al respecto.

Los valores de diseño de la iluminación del túnel y el valor L20 en particular se establecieron en este caso conforme a la normativa UNE-CR 14380:2007 IN, donde en su Anexo XX establece el procedimiento de cálculo para estudiar el valor de la iluminación en la zona umbral del túnel y el desarrollo posterior de la curva lumínica. Estos valores fueron, para cada uno de los sentidos del túnel de Vila Olímpica:

- Sentido Besos (NE): 3.615 cd/m2
- Sentido Llobregat (SO): 4.227 cd/m2.

Los valores máximos mensuales registrados de luminancia para cada uno de los sentidos son los siguientes:

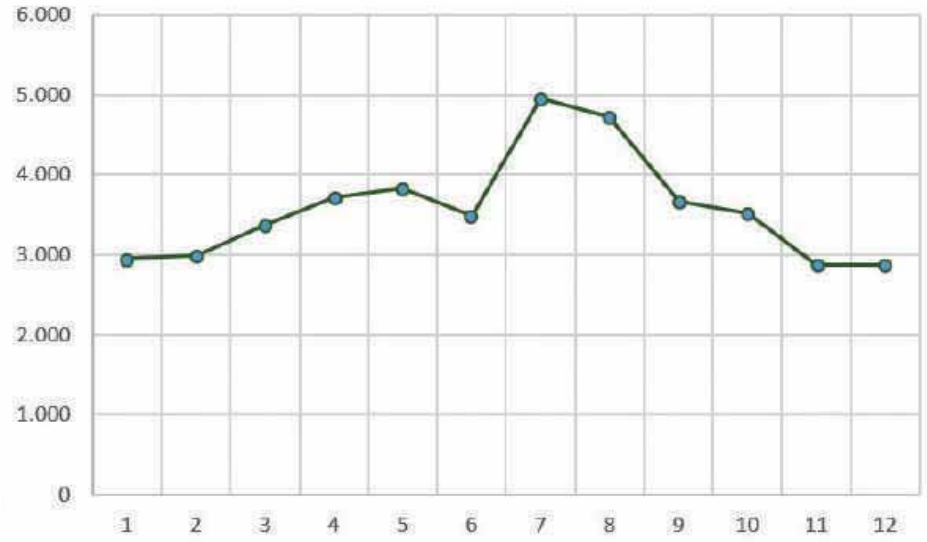


Ilustración 9. Valor máximo mensual de la luminancia medida de boca de túnel. Sentido Besos.

Donde el valor de diseño es de 3.615 cd/m2

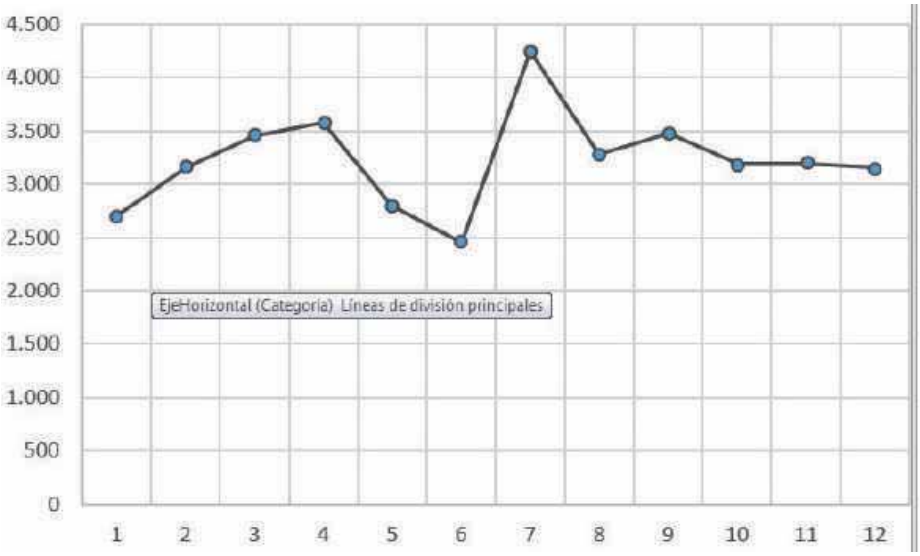


Ilustración 10. Valor máximo mensual de la luminancia medida de boca de túnel. Sentido Llobregat.

Donde el valor de diseño es de 4.227 cd/m2.

Por otro lado, el funcionamiento anual por escenas de la iluminación según los diferentes parámetros se explica según la siguiente tabla:

L20 MEDIDA	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**TOTAL**
SECO/MEDIO	969,91	931,62	736,55	528,93	331,11	156,40	349,53	**4.004,05**
SECO/ALTO	590,45	664,23	571,20	465,13	367,90	106,36	87,47	**2.852,74**
MOJADO/MEDIO	39,88	67,58	156,24	169,11	192,76	61,93	55,61	**743,11**
MOJADO/ALTO	49,72	62,76	352,40	265,71	246,43	37,79	63,84	**1.078,65**
TOTAL DIURNO	**8.678,55**							
NOCTURNO	8.326,88							
NOCTURNO REDUCIDO	512,80							
TOTAL NOCTURNO	**8.839,68**							
ERROR	1,77							
TOTAL	**17.520,00**							

(Los valores son los totales agregados de funcionamiento de los dos sentidos de tráfico)

Siendo los valores de funcionamiento en porcentajes respecto del total los siguientes:

L20 MEDIDA	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**TOTAL**
SECO/MEDIO	5,54%	5,32%	4,20%	3,02%	1,89%	0,89%	2,00%	**22,85%**
SECO/ALTO	3,37%	3,79%	3,26%	2,65%	2,10%	0,61%	0,50%	**16,28%**
MOJADO/MEDIO	0,23%	0,39%	0,89%	0,97%	1,10%	0,35%	0,32%	**4,24%**
MOJADO/ALTO	0,28%	0,36%	2,01%	1,52%	1,41%	0,22%	0,36%	**6,16%**
TOTAL DIURNO	**49,54%**							
NOCTURNO	47,53%							
NOCTURNO REDUCIDO	2,93%							
TOTAL NOCTURNO	**50,45%**							
ERROR	0,01%							
TOTAL	**100,00%**							

El valor de diseño según la norma, establecido para un nivel de luminancia de L20, con un pavimento en estado mojado y la intensidad de tráfico más alta es el que se corresponde con el valor en rojo, de lo cual se desprende que diseñamos los niveles de iluminación para una escena que se produce un total del 0,28% del año.

Por todo ello, podemos establecer algunas conclusiones con respecto a este apartado:

a.- Los valores del diseño normativo de la norma aplicada no son alejados de los valores medidos reales en el caso particular del túnel, si que presenta una varianza importante durante el año, dándose el caso que, durante los meses de verano, estos se encuentra incluso por encima del valor de diseño, ahora bien la ocurrencia del escenario de diseño es menor a un 0,3% del año (escenario arco-iris), así como la distribución anual de las diferentes situaciones de valores de entrada al sistema de control es distribuido lo cual hace concluir la bondad de la implementación de sistemas de control adaptativo en la iluminación LED de los túneles.

b.- Una buena práctica en el diseño de la renovación de túneles existentes, puede ser el disponer previamente y durante un periodo de tiempo (mínimo 6 meses) de un luminancímetro temporal instalado en boca de túnel con objeto de medir valores reales que contraponer a los cálculos normativos, antes de realizar el diseño de la nueva iluminación del túnel.

2. Análisis de las horas de funcionamiento de escenas y conclusiones al respecto

Utilizando más los datos de explotación del sistema de control instalado en el túnel, con respecto a la cantidad de escenas aplicadas en el año, se establecen las siguientes, por cada uno de los sentidos de tráfico del túnel:

SENTIDO LLOBREGAT

L20 MEDIDA	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**TOTAL**
SECO/MEDIO	4050	4498	3742	2687	2225	1604	2537	**21343**
SECO/ALTO	4864	5727	4949	2592	1943	943	959	**21977**
MOJADO/MEDIO	425	960	2062	1133	809	522	594	**6505**
MOJADO/ALTO	595	1290	5273	1432	539	231	499	**9859**
TOTAL DIURNO	**59684**							
NOCTURNO	817							
NOCTURNO REDUCIDO	344							
TOTAL NOCTURNO	**1161**							
ERROR	13							
TOTAL	**60858**							

Lo cual establece un cambio de escena (es decir un recalculo de la iluminación a aplicar por parte del algoritmo de control) de un promedio aproximado de cada 4,3 minutos durante el día.

SENTIDO BESOS

L20 MEDIDA	1	2	3	4	5	6	7	TOTAL
SECO/MEDIO	2579	3146	3057	2503	1480	405	193	**13363**
SECO/ALTO	1791	2483	2652	2585	1617	361	149	**11638**
MOJADO/MEDIO	178	294	704	1278	1103	201	28	**3786**
MOJADO/ALTO	45	104	495	1526	1413	247	60	**3890**
TOTAL DIURNO	**32677**							
NOCTURNO	745							
NOCTURNO REDUCIDO	341							
TOTAL NOCTURNO	**1086**							
ERROR	10							
TOTAL	**33773**							

Lo cual establece un cambio de escena (es decir un recalculo de la iluminación a aplicar por parte del algoritmo de control) de un promedio aproximado de casi 8 minutos durante el dia.

Analizada la varianza se observa que el número total de escenas aplicadas durante un año en un sentido (sentido Llobregat) es un 80% superior al otro (Sentido Besos). Se debe a:

- 93% más de cambios debidos a detección de estado de pavimento.

Revisando el funcionamiento del luminancímetro integrado, el mismo realiza una operación de tratamiento de imagen sobre la observación extrayendo una región de la superficie de la carretera (de manera predeterminada, es aproximadamente la región utilizada para la medición del tráfico, pero esto es configurable) y alimenta los píxeles de la imagen a un clasificador de aprendizaje automático, después de un paso de normalización. El clasificador genera una decisión binaria: húmedo o seco.

Como la región de estudio se encuentra superpuesta con la zona de tráfico, ésta tiene una gran varianza de la imagen que se produce debido al paso de vehículos, especialmente en situaciones de tráfico denso y lento, dificultando el aprendizaje del sistema para detectar adecuadamente los diferentes estados: SECO, HUMEDO.

Como se mencionó anteriormente, es posible reconfigurar la zona/región de medición, diferenciando la sección a observar de la de la sección que observar el tránsito, enfocando regiones con menor tránsito, por ejemplo, la región del arcén.

- 83% más de cambios debido a detección de estados de tráfico.

Analizando los datos de tránsito, se detecta una diferencia entre ambos sentidos de circulación en cuanto al mayor porcentaje de retenciones por dia en el sentido Llobregat (singularidad propia de las Rondas como vía de alta capacidad que opera habitualmente en sus límites de servicio) que en el sentido Besos. El tratamiento en bruto de los datos de tránsito a bajos periodos de intervalo deriva en esta varianza que se transforma en interpretación de los diferentes estados de tránsito: ALTO, MEDIO, BAJO de la normativa lumínica

3. Análisis de las horas de funcionamiento de escenas y conclusiones al respecto

De lo analizado anteriormente en el presente capítulo, se puede desprender los siguientes aspectos:

- Los valores de diseño de luminancia umbral se han comprobado que se ubican siempre por encima de los valores máximos que se van produciendo durante el año, exceptuando los meses de verano en uno de los sentidos. No obstante, el tiempo de ocurrencia durante el año de la escena de diseño (MAXIMA LUMINANCIA, PAVIMENTO HUMEDO Y TRÁFICO ALTO) se sitúa en un 0,3% del total. Todo ello nos lleva a reflexionar sobre los valores de diseño del túnel y si son estos ya adecuados son adecuados o bien se encuentran sobredimensionados.
- Conviene implementar medidas para el tratamiento de los datos en bruto de los sensores que detectan los diferentes parámetros antes de entrar en el algoritmo de decisión de los niveles lumínicos, implementando, por ejemplo, medias móviles en los datos de medición de tránsito.
- Conviene diferenciar las zonas de detección de tránsito de las zonas de detección de estados de pavimento en los luminancímetros integrados.
- Conviene implementar redundancias en los sistemas de detección de los diferentes parámetros con objeto de comprobar y contrastar la bondad de los valores medidos y detectar desvíos y alarmas en el valor.

HIDRÁULICA DE BOMBEO NO-CONVENCIONAL EN CIRCUITO CERRADO COMO SISTEMA SOSTENIBLE DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA EN TÚNELES DE MONTAÑA

Justo Suarez
INGENIERIC, ES

Las nuevas normativas medioambientales instan a los propietarios de infraestructuras a reducir su huella de carbono, fomentando el uso de energías renovables asociadas a sistemas sostenibles de almacenamiento de energía que racionalicen el consumo energético requerido en la infraestructura.

Este articulo evalúa la oportunidad y conveniencia de emplazar sistemas de almacenamiento de energía mediante hidráulica de bombeo en circuito cerrado en túneles de montaña con grandes diferencias de cota en su montera.

La hidráulica de bombeo en circuito cerrado se basa en el potencial de una columna hidráulica para producir energía. Este tipo de sistemas funcionan bombeando agua de un depósito a otro situado a una cota superior. El agua del depósito superior genera una columna hidráulica y por tanto un almacenamiento local de energía disponible bajo demanda, asegurando así un suministro eléctrico inmediato y fiable a las instalaciones electromecánicas del túnel (ventilación, iluminación…), incluso en el caso de caída de la red durante una situación de emergencia.

El bombeo al depósito superior se realiza cuando hay un exceso de electricidad en horas de baja demanda, aprovechando al máximo las fuentes de energía que tienen un perfil de generación intermitente, como la eólica y la solar.

Dado que la capacidad de almacenamiento de energía de la columna hidráulica es directamente proporcional a la densidad del fluido utilizado, el uso de lodos de alta densidad como columna de fluido alternativo al agua, aumenta significativamente la energía almacenada disponible. Este incremento de la capacidad de almacenamiento de energía mediante el uso de lodos de alta densidad, podría ser una solución factible en túneles dónde la orografía no permite una diferencia de cota entre los dos depósitos suficiente para justificar la instalación de un sistema de hidráulica de bombeo convencional con agua.

UNCONVENTIONAL CLOSED-LOOP PUMPED HYDROPOWER AS A SUSTAINABLE ENERGY STORAGE SYSTEM IN MOUNTAIN TUNNELS

New environmental laws require the infrastructure owners to reduce their carbon footprint, encouraging the use of renewable energies linked to sustainable energy storage systems to optimise the energy consumption required at the infrastructure.

This paper assesses the opportunity and suitability of using mountain tunnels with high overburdens to install closed-loop pumped Hydro Energy Storage (HES) systems as an effective means of storing energy.

Closed-loop pumped HES is based on the potential of a hydraulic head to produce energy. The system operates by pumping water from a tank to another tank at higher elevation. The volume on the upper tank generates hydraulic head and subsequently local energy storage that is available on demand. This system secures immediate and reliable offline power supply to the electro-mechanic installations in the tunnel (ventilation, lighting…), even in case of blackout during an emergency.

The water pumping to the higher elevation tank is carried out when there is an excess of electricity at low-demand hours, making best use of the power sources (such as wind and solar) that have an intermittent generation profile.

As the energy storage capacity of a hydraulic head is directly proportional to the fluid density, the use of high-density slurries as an alternative fluid to water increases significantly the available stored energy. This increase in the energy storage capacity using high density slurries could be a feasible solution in tunnels where the elevation differences between the two tanks are not enough to justify the installation of a conventional pumped water energy storage system.

HYDRAULIQUE DE LA POMPE LA BOUCLE FERMÉE NON CONVENTIONNELLE COMME SYSTÈME DE STOCKAGE D'ÉNERGIE DURABLE DANS LES TUNNELS DE MONTAGNE

La nouvelle réglementation environnementale invite les propriétaires d'infrastructures à réduire leur empreinte carbone, en favorisant l'utilisation d'énergies renouvelables associées à des systèmes de stockage d'énergie durable qui rationalisent la consommation d'énergie nécessaire à l'infrastructure.

Cet article évalue l'opportunité et la commodité d'installer des systèmes de stockage d'énergie par pompage hydraulique en circuit fermé dans des tunnels de montagne avec de grands dénivelés dans leurs faîtes.

L'hydraulique des pompes en boucle fermée est basé sur le potentiel d'une colonne hydraulique à produire de l'énergie. Ces types de systèmes fonctionnent en pompant l'eau d'un réservoir à un autre situé à un niveau supérieur. L'eau du réservoir supérieur génère une colonne hydraulique et donc un stockage local d'énergie disponible à la demande, assurant ainsi une alimentation électrique immédiate et fiable des installations électromécaniques du tunnel (ventilation, éclairage...), même en cas d'une panne de courant le réseau lors d'une situation d'urgence.

Le pompage vers le réservoir supérieur est effectué lorsqu'il y a un excès d'électricité en période de faible demande, en tirant le meilleur parti des sources d'énergie qui ont un profil de production intermittent, comme l'éolien et le solaire.

La capacité de stockage d'énergie de la colonne hydraulique étant directement proportionnelle à la densité du fluide utilisé, l'utilisation de boues à haute densité comme colonne de fluide alternative à l'eau augmente significativement l'énergie stockée disponible. Cette augmentation de la capacité de stockage d'énergie par l'utilisation de boues à haute densité pourrait être une solution envisageable dans les tunnels où l'orographie ne permet pas un dénivelé suffisant entre les deux gisements pour justifier l'installation d'un système de pompage hydraulique classique à eau.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de electricidad en los túneles de carretera ha experimentado un aumento en los últimos años. Hoy en día, la mayoría de los túneles con longitud superior a un kilómetro requieren varios cientos de kilovatios para alimentar la potencia total de sus instalaciones. El creciente número de túneles de gran longitud, junto con la necesidad de satisfacer mayores requisitos de seguridad, obligan a instalar potentes sistemas electromecánicos con un consumo energético muy elevado, y esta tendencia continuará en el futuro. Algunos de estos sistemas (ventilación, iluminación…) son críticos, por lo que su funcionamiento debe garantizarse las veinticuatro horas del día durante todos los días del año, y especialmente en situaciones de emergencia dentro del túnel. Para cubrir la posible contingencia de una caída de la red eléctrica de suministro, una fuente de alimentación alternativa debe estar siempre disponible y lista para funcionar. Generalmente este requisito se cumple con un grupo electrógeno independiente, normalmente diésel, y en algunas ocasiones disponiendo también de una segunda línea de distribución eléctrica.

Este incremento de la demanda de energía eléctrica en los túneles se ve limitado por las nuevas leyes ambientales, que obligan a los propietarios de la infraestructura a reducir su huella de carbono. El uso de energías renovables hibridadas con sistemas de almacenamiento de energía verde es la forma de conciliar ambas cuestiones: por un lado, la creciente demanda eléctrica de los sistemas electromecánicos de los túneles y por otro los requisitos medioambientales que recomiendan el uso de energías limpias para alimentar a estos sistemas. El objetivo es conseguir que las instalaciones en los túneles sean energéticamente sostenibles y con el menor impacto medioambiental posible.

En este artículo se evalúa la viabilidad de implementar en túneles de montaña un sistema de almacenamiento de energía por hidráulica de bombeo no convencional con lodos de alta densidad que proporcionen un suministro de energía autónomo, fiable y sostenible a las instalaciones electromecánicas.

2. REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS DE LAS INSTALACIONES EN TÚNELES

La potencia eléctrica que es necesaria instalar en los túneles de carretera para alimentar a los diferentes sistemas electromecánicos varía en función de las características particulares de cada túnel, como son su longitud, geometría, volumen de tráfico, localización, requerimientos de seguridad… También es variable el porcentaje de potencia requerida para cada uno de estos sistemas, tanto en situación de operación normal, como de emergencia (incendio en el túnel). En los documentos "Zero energy Tunnel-concept" [1] de la Eindhoven University of Technology (TU/e) y "Working towards a zero-energy tunnel" [2] del Netherlands Knowledge Centre for Underground Space and Underground Construction (COB) se analizan, desde un punto de vista energético, los diferentes sistemas electromecánicos instalados en los túneles en Holanda, y el reparto de potencia entre ellos.

Las Figuras 1, 2 y 3 muestran la distribución típica de potencia en un túnel de autopista genérico tanto en potencia instalada, como en potencias consumidas durante la operación normal y en situación de emergencia (incendio en el túnel).

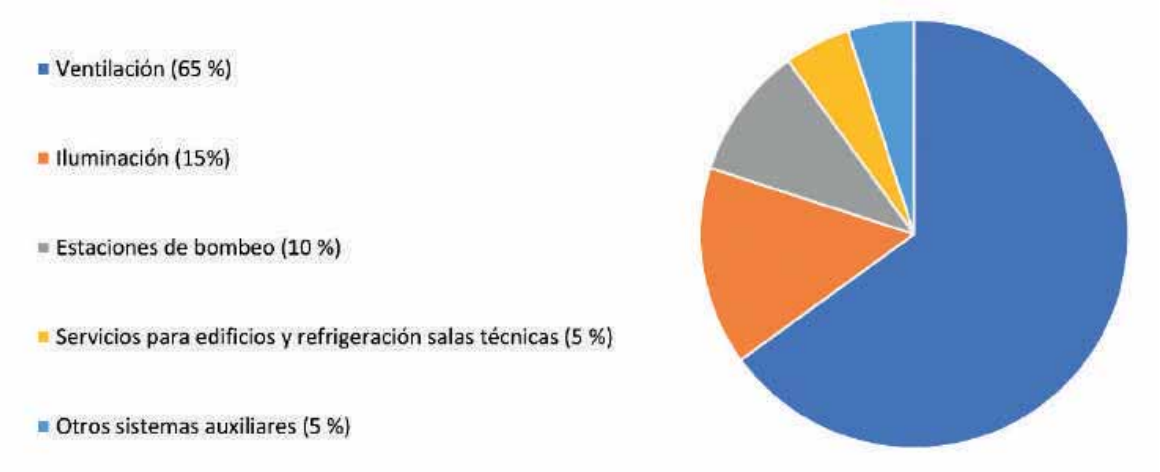


Figura 1: Distribución típica de la potencia instalada en un túnel de carretera

La ventilación es el sistema con mayor porcentaje de potencia instalada, seguida por la iluminación, las estaciones de bombeo, los servicios para edificios y refrigeración de salas técnicas, y otros sistemas auxiliares.

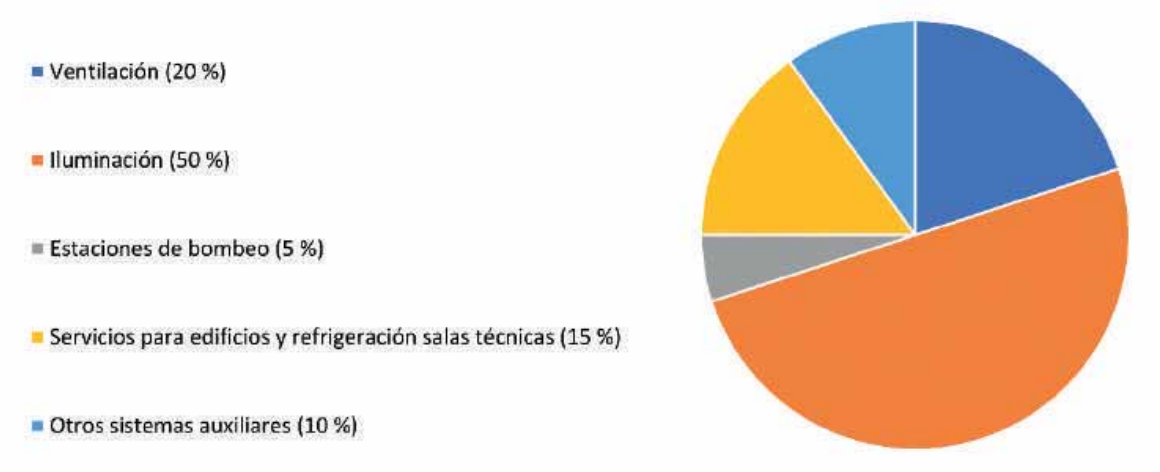


Figura 2: Distribución típica de la potencia consumida por las instalaciones en funcionamiento normal.

Durante la operación normal del túnel el reparto de la potencia consumida por los diferentes sistemas varía con respecto al reparto de la potencia instalada, siendo la iluminación el sistema de mayor consumo porcentual.

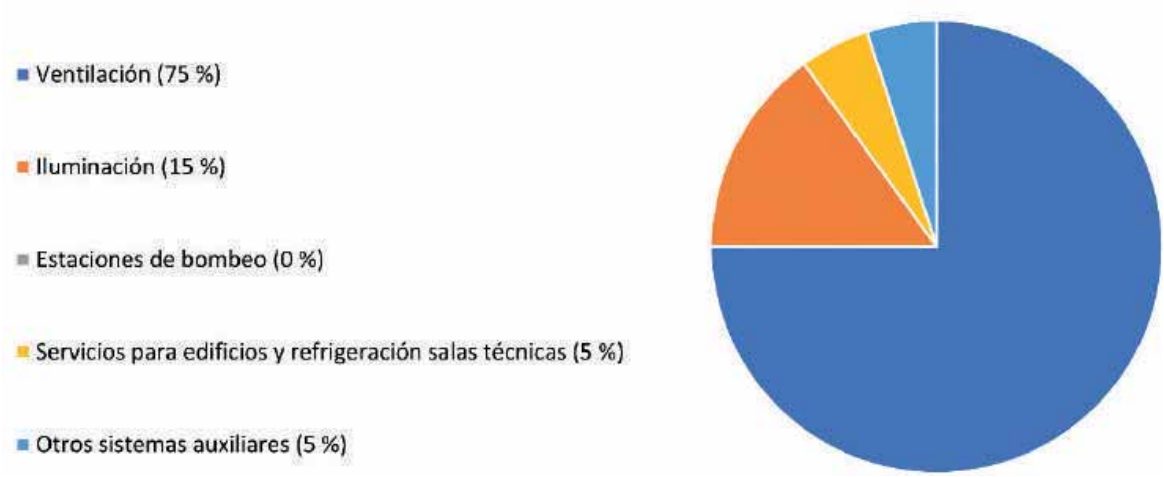


Figura 3: Distribución típica de la potencia consumida por las instalaciones en caso de emergencia (incendio).

En caso de una situación de emergencia en el túnel, como puede ser un incendio, el reparto de potencias consumidas cambia significativamente en relación con la operación normal, ya que es necesario emplear toda la potencia instalada de ventilación para poder controlar los humos generados por el incendio, por lo tanto, este sistema pasa a ser el de mayor consumo.

En el diseño de la instalación eléctrica se deben tener en cuenta estas variaciones en el reparto de la potencia consumida por los diferentes sistemas, de forma que queden cubiertas energéticamente todas las situaciones que se pueden producir en el túnel, tanto en operación normal como en emergencia.

El funcionamiento de la ventilación y otros sistemas críticos para la seguridad del túnel deben garantizarse incluso en situaciones de fallo en la red eléctrica. Estos sistemas tienen que estar operativos durante el tiempo que se considere necesario para gestionar la incidencia y en su caso facilitar la evacuación del túnel. Para poder satisfacer estos requisitos es necesario contar con una fuente alternativa y fiable de suministro eléctrico que esté disponible localmente bajo demanda, siendo los sistemas de baterías y los grupos electrógenos, generalmente diésel, quienes han cumplido hasta ahora con esta función.

Sin embargo, los avances que se están produciendo actualmente en la generación de energías renovables y en el almacenamiento de energía, permiten la implantación de este tipo de sistemas en los túneles de carretera. El informe "Positive Energy Roads" (PER) elaborado por PIARC [3] analiza las posibilidades que ofrecen las carretas como infraestructuras en las que se pueden instalar sistemas de generación y almacenamiento de energía por medios renovables, no sólo para satisfacer sus propios consumos energéticos, sino también para suministrar energía limpia a la red eléctrica, aportando un beneficio económico a los propietarios de esas infraestructuras. En el mismo sentido, el artículo "The path to highly available, sustainable and efficient operation of road tunnels – use of energy generation and storage opportunities in the future" [4] aporta propuestas muy interesantes sobre las posibilidades de generación y almacenamiento de energía asociadas a túneles carreteros en la red de autopistas austriacas.

3. HIDRÁULICA DE BOMBEO NO-CONVENCIONAL EN CIRCUITO CERRADO

Entre las posibles alternativas para el almacenamiento de energía renovable generada en las infraestructuras asociadas a las carreteras, la hidráulica de bombeo en circuito cerrado podría ser una solución adecuada en túneles de montaña dónde la escarpada orografía facilitaría su instalación, ya que se aprovecharían las importantes diferencias de cota en la montera del túnel.

3.1. Funcionamiento

La hidráulica de bombeo se basa en el potencial de una columna hidráulica para la producción de energía. El sistema funciona bombeando agua desde un depósito a una cota inferior, a través de un conducto, hasta otro deposito situado a una cota superior. El volumen de agua en el depósito superior genera una carga hidráulica y por tanto un almacenamiento local de energía, disponible para su uso bajo demanda. Este sistema aseguraría un suministro de energía autónomo (no conectado a la red) a los equipos electromecánicos instalados en el túnel.

La viabilidad económica de la hidráulica de bombeo en circuito cerrado reside en bombear el agua del depósito inferior al depósito superior cuando hay un exceso de producción eléctrica en horas de baja demanda y turbinarla en horas de gran demanda con precios de la energía muy elevados.

La hidráulica de bombeo convencional en circuito cerrado usa el agua como único fluido, tanto para el almacenamiento de energía, bombeándola a una cota superior, como para la generación de energía turbinándola en la cota inferior. En cambio, la hidráulica de bombeo no-convencional emplea dos fluidos diferentes: lodos de alta densidad para el almacenamiento de energía y agua para la generación de energía mediante su turbinado. Este sistema aumenta la cantidad de energía disponible para una diferencia de cota determinada, ya que la carga de columna hidráulica es directamente proporcional a la densidad del fluido empleado. Por ejemplo, en caso de utilizar lodos con valores de densidad 2,5 veces superiores al agua, la capacidad de almacenamiento para la misma altura de columna de fluido se multiplicaría por ese factor, es decir se conseguiría un almacenamiento energético 2,5 mayor en comparación con el sistema convencional con agua.

En los años 80, la compañía holandesa Shell patentó un sistema de hidráulica de bombeo en circuito cerrado no-convencional con lodos de alta densidad destinado al almacenamiento de energía generada en plantas nucleares, pero no llegó a ejecutarse debido a la cancelación del proyecto tras el accidente la central de Chernóbil. El sistema ha sido recientemente recuperado por la empresa Magellan & Barents [5], con una versión actualizada del mismo asociado a la generación por medios renovables.

En la Figura 4 se detalla esquemáticamente el funcionamiento de un sistema de hidráulica de bombeo no-convencional en circuito cerrado empleando lodos de alta densidad.

La energía es almacenada mediante el bombeo de agua de un depósito a presión atmosférica "1" a otro depósito de alta presión lleno de un fluido denso "2". El volumen de ambos depósitos es el mismo. La presión ejercida por el agua en el depósito "2" desplaza al fluido denso, haciéndolo ascender por un conducto hasta el depósito "3", a presión atmosférica, situado a una cota superior a los otros dos. La energía para el bombeo podría ser proporcionada por una fuente de suministro eléctrico tradicional o por energías renovables intermitentes, como la solar o la eólica, en horas valle de baja demandada energética.

En las horas de alta demanda energética el sistema se invierte para generar energía. Los lodos de alta densidad almacenados en el depósito "3", situado en la cota superior, descienden por el conducto hasta el depósito de interfase "2". La presión ejercida por la columna hidráulica de lodos desplaza al agua que llena el depósito de interfase lodos / agua haciéndola fluir por una tubería y produciendo un chorro a presión, con un caudal que acciona una turbina hidráulica, generando electricidad.

Las imágenes de la Figura 5 ilustran las dos etapas del sistema de hidráulica de bombeo no-convencional con lodos de alta densidad, hibridado con generación de energía renovable fotovoltaica.

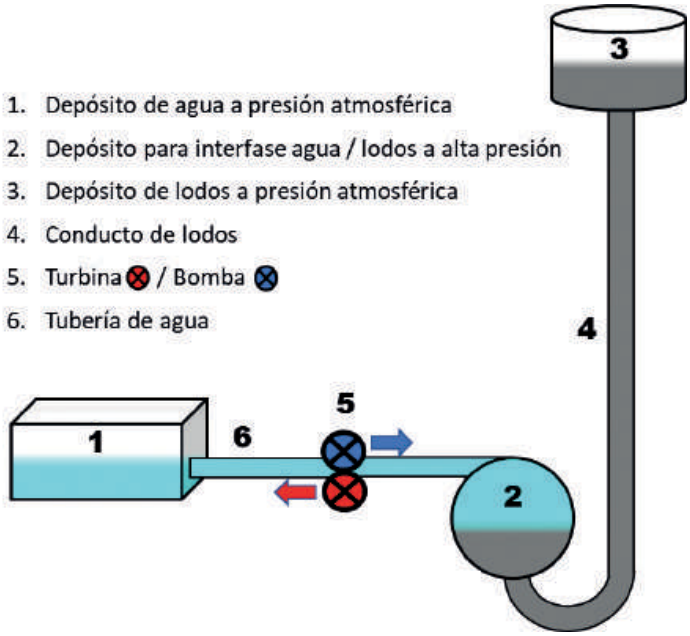


Figura 4: Esquema de un sistema de almacenamiento de energía mediante hidráulica de bombeo no-convencional en circuito cerrado con lodos de alta densidad.

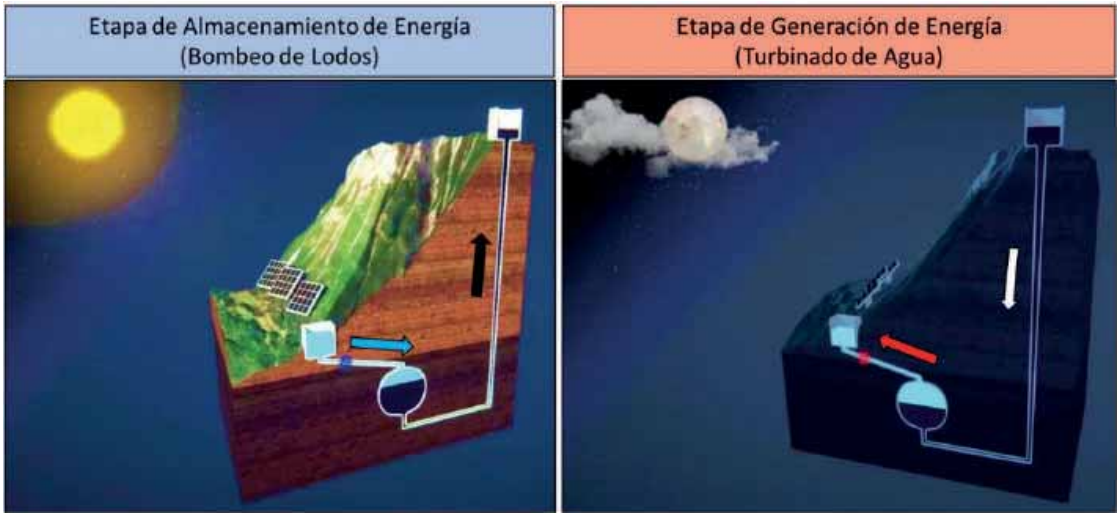


Figura 5: Etapas de almacenamiento y generación de energía con un sistema de hidráulica de bombeo no-convencional en circuito cerrado con lodos de alta densidad (Fuente: Magellan & Barents [5]).

3.2. Lodos de alta densidad

Los lodos de alta densidad deben poseer unas propiedades técnicas específicas para ser utilizados como fluidos hidráulicos.

Los lodos deben estar compuestos por materiales inocuos, que no sean tóxicos, ni corrosivos, ni radioactivos, para que sean aceptables medioambientalmente. Deben ser inertes químicamente, manteniendo constantes su composición y propiedades, sin reaccionar con otros agentes externos incluso ante grandes cambios de presión y temperatura.

Desde un punto de vista mecánico, deben tener una buena fluidez con densidades altas y mantener su homogeneidad incluso después de permanecer en reposo durante largos periodos de tiempo. Es recomendable que su abrasividad sea lo más baja posible, para evitar desgates en los conductos por los que fluirán durante los ciclos de trabajo. También deben alcanzar sin degradarse el periodo de vida útil considerado en el proyecto, proporcionando con efectividad una transmisión homogénea de presión sobre el agua.

Otro factor importante a tener en cuenta es el coste. Los sistemas de hidráulica de bombeo necesitan grandes volúmenes de fluidos, con lo cual, aunque el precio por tonelada de los lodos de alta densidad pueda parecer bajo, al escalarse a las cantidades necesarias para el proyecto pueden tener un impacto importante en los costes totales. La logística y el transporte de los lodos también deben optimizarse intentado usar materiales disponibles en áreas próximas al túnel, aprovechando si es posible los propios escombros generados durante su construcción u otros materiales de desecho de explotaciones mineras o canteras cercanas. Todo esto además de optimizar los costes, reducirá la huella de carbono del proyecto.

Aunque algunos de los lodos bombeables y fluidos de alta densidad empleados en diferentes aplicaciones industriales como sondeos petrolíferos, plantas de tratamiento de minerales, lastre activo de estructuras flotantes…, pueden ser utilizados como fluidos hidráulicos, será necesario realizar una caracterización de su composición para cada proyecto, seleccionando y combinado los materiales adecuados que les aporten las propiedades anteriormente descritas con un coste razonable.

4. EJEMPLO DE DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE HIDRÁULICA DE BOMBEO NO-CONVENCIONAL ASOCIADO A UN TÚNEL DE AUTOPISTA

En el presente ejemplo se ha considerado un túnel de autopista representativo, con un tubo para cada sentido de tráfico, con una pendiente del ± 1%, y de un kilómetro de longitud. La potencia total instalada para los diferentes sistemas electromecánicos en este túnel tipo se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Estimación de la potencia instalada en los diferentes sistemas electromecánicos para un túnel de autopista de 1 km de longitud y ±1 % de pendiente.

SISTEMAS ELECTROMECÁNICOS		POTENCIA INSTALADA [kW]	
		Por Tubo	Total
Ventilación		300	600
Numero jet fans en cada tubo	10		
Potencia unitaria jet fan	30		
Iluminación		75	150
Estaciones de bombeo		40	80
Servicios para edificios y refrigeración salas técnicas		25	50
Otros sistemas auxiliares		20	40
TOTAL		460 kW	920 kW

La distribución de las potencias requeridas por esos sistemas, tanto en condiciones normales de operación como en condiciones de emergencia se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Estimación de la potencia requerida en funcionamiento normal y en emergencia por los sistemas electromecánicos para un túnel de autopista de 1 km de longitud y ±1 % de pendiente.

SISTEMAS ELECTROMECÁNICOS	POTENCIA REQUERIDA [kW]			
	Funcionamiento Normal		Funcionamiento Emergencia	
	Por Tubo	Total	Por Tubo	Total
Ventilación	25	50	300	450
Iluminación	65	130	45	90
Estaciones de bombeo	10	20	0	0
Servicios para edificios y refrigeración salas técnicas	20	40	15	30
Otros sistemas auxiliares	10	20	15	30
TOTAL	130 kW	260 kW	375 kW	600 kW

En la mayoría de los túneles el máximo requerimiento energético viene definido por la potencia que es necesario suministrar a los sistemas de seguridad en una situación de emergencia, siendo el caso más crítico que se produjese un incendio en el interior del túnel. En esa situación la ventilación y otros sistemas de seguridad deben estar operativos para controlar los humos del incendio, garantizar la evacuación de las personas y facilitar las labores de los bomberos y personal de emergencia. Por todo ello, las normativas sobre seguridad obligan a disponer de una fuente alternativa y autónoma de suministro eléctrico que garantice el funcionamiento de los sistemas de seguridad. Dicha fuente alternativa ha de proporcionar energía, como mínimo, durante el tiempo que se haya considerado necesario para cada túnel.

Para el dimensionamiento de un sistema de hidráulica de bombeo no-convencional asociado a este túnel tipo, se toma como dato de partida la potencia requerida en caso de emergencia que es de 600 kW (ver Tabla 2). Por otro lado, se ha considerado que el suministro de esa potencia se deba garantizar durante un tiempo de funcionamiento en emergencia de 2 horas.

La potencia generada por una columna de fluido se rige por la fórmula (1)

$$P=\Upsilon \cdot Q \cdot \mu \cdot \Delta H \cdot \eta \qquad (1)$$

Siendo:

- P : Potencia generada (W)
- Υ : Peso específico del fluido que genera la carga hidráulica N/m3
- Q : Caudal del fluido (m^3/s)
- μ : Rendimiento del sistema considerando pérdidas en conductos, codos…
- ΔH : Carga hidráulica (m)
- η : Eficiencia Turbina

A partir de la fórmula (1) se calcula el caudal mediante la fórmula (2)

$$Q = P/(\Upsilon \cdot \mu \cdot \Delta H \cdot \eta) \qquad (2)$$

Se consideran los siguientes valores para los diferentes parámetros de la fórmula:

P	=	600.000 W	(Potencia necesaria en caso de emergencia)
Υ	=	24.500 N/m^3	(Lodos con un peso específico 2.5 veces superior al del agua)
μ	=	90 %.	(Las pérdidas en los conductos, codos… se estiman en un 10 %)
ΔH	=	300 m	(Se ha considerado esta columna hidráulica en la montera del túnel)
η	=	90 %	(Eficiencia estimada de una turbina Pelton)

Se obtiene un caudal de 0,10 m^3/s

Con ese caudal, el volumen de agua que es necesario turbinar para generar los 600 kW de potencia durante un tiempo determinado se calcula según la fórmula (3)

$$V = Q \cdot t \qquad (3)$$

Siendo:

V	:	Volumen de agua que es necesario turbinar (m^3)
t	:	Tiempo de funcionamiento (s)

Considerando los siguientes valores:

Q	=	0,10 m^3/s	(Caudal de agua que es necesario turbinar)
t	=	7.600 s	(Suministro de energía a los sistemas durante 2 horas)

Se obtiene que es necesario turbinar 760 m^3 de agua para proporcionar una potencia de 600 kW durante 2 horas.

Además de este volumen de agua, se necesita un volumen equivalente de lodos de alta densidad que es necesario trasvasar del depósito de interfase lodos / agua al depósito de lodos situado en la cota superior. Es decir, serán necesarios tres depósitos de 760 m3 (equivalente aproximadamente a un cubo de 9 m de lado). El depósito "1", donde se recoge el agua después del turbinado en la cota inferior y el depósito "3", dónde se almacenan los lodos en la cota superior, están a presión atmosférica por lo que no necesitan cumplir con ningún requerimiento especial, pudiendo instalarse dos tanques o balsas con la capacidad suficiente para contener los fluidos. En cambio, el depósito "2", deberá estar diseñado para soportar las presiones generadas por la carga hidráulica, ya que es en este depósito donde se produce la transferencia de energía entre el lodo y el agua tanto en la fase de generación de energía (el lodo presiona al agua) como en la fase de almacenamiento de energía (el agua presiona al lodo).

En la Figura 6 se muestra un esquema de dos posibles configuraciones para la implementación del sistema en un túnel de montaña: instalación interior en una caverna e instalación exterior en un edificio anexo al túnel.

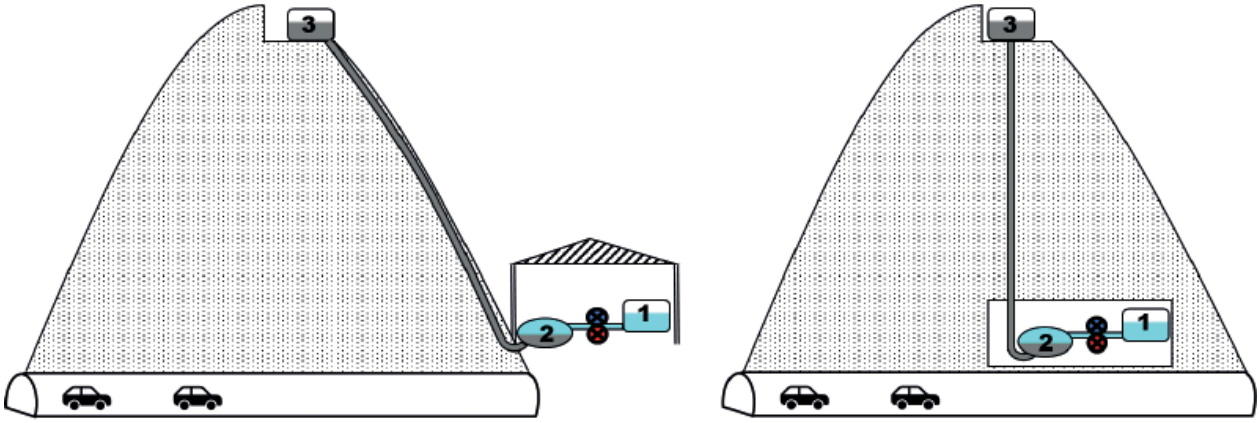


Figura 6: Posibles opciones de instalación del sistema de hidráulica de bombeo no-convencional en circuito cerrado en un túnel de montaña.

Este dimensionamiento básico del sistema puede ser optimizado escalándolo a un mayor tamaño, de forma que la potencia disponible sea superior a la requerida en caso de emergencia. Por ejemplo, un sistema dimensionado para proporcionar 1.200 kW, es decir el doble de la potencia requerida en caso de emergencia para el túnel tipo considerado, permitiría disponer de 600 kW para otros fines, manteniendo siempre en reserva los otros 600 kW que cubrirían las necesidades energéticas en caso de una emergencia en el túnel con un fallo en la red eléctrica de suministro.

En resumen, el sistema permite adaptarse a las características del proyecto y a la cantidad total de energía que se desee almacenar. Además de cubrir las necesidades de suministro en caso de emergencia, el exceso de energía almacenada podría emplearse para usos alternativos, tales como, verterla a red o alimentar los sistemas electromecánicos del túnel durante su funcionamiento normal en horas de alta demanda, estaciones de carga de vehículos eléctricos, suministro eléctrico a núcleos rurales cercanos al túnel, estaciones de esquí…

5. CONCLUSIONES

La hidráulica de bombeo en circuito cerrado no convencional, con lodos bombeables de alta densidad, es un sistema de almacenamiento de energía que presenta grandes posibilidades de implementación en túneles de montaña. La carga hidráulica proporcionada por los lodos es directamente proporcional a su densidad, por lo que este sistema puede ser aplicable incluso en túneles dónde las diferencias de elevación en su montera no son suficientes para justificar la instalación de un almacenamiento de energía mediante hidráulica de bombeo convencional con agua.

Se trata de un sistema renovable y sostenible medioambientalmente, permitiendo el uso de materiales reciclables, abundantes, inocuos y baratos para la producción de lodos, al contrario que otros sistemas de almacenamiento, como son las baterías electroquímicas, que requieren materiales escasos, caros y en muchos casos contaminantes.

La construcción de la infraestructura civil necesaria para la instalación del sistema puede integrase con la excavación del túnel, optimizando recursos durante la ejecución de la obra civil y reduciendo los costes generales del proyecto.

Por otro lado, la generación eléctrica mediante turbinas hidráulicas, que es una tecnología probada y robusta, proporciona fiabilidad al sistema en su conjunto.

El sistema es fácilmente escalable, permitiendo un mayor almacenamiento de energía al aumentar el número y el volumen de los depósitos. También la generación se puede escalar instalando turbinas adicionales y de mayores dimensiones. En casos en los que las características del proyecto sean favorables, se podrían instalar sistemas con una capacidad de almacenamiento que además de satisfacer las necesidades energéticas del túnel permitan disponer de un exceso de energía para verterla a la red u otros usos.

6. REFERENCIAS

[1] Eindhoven University of Technology (TU/e). "Zero energy Tunnel-concept" (2012)

[2] COB. "Working towards a zero-energy tunnel" (2018)

[3] PIARC. "Positive energy roads" (2019)

[4] René List. AISFINAG Bau management GmbH. "The path to highly available, sustainable and efficient operation of road tunnels – Use of energy generation and storage opportunities in the future". Tunnel Safety and Ventilation Conference. Graz. (2020)

[5] MAGELLAN & BARENTS web page: http://magellanbarents.com/

SACYR IOHNIC, UNA SOLUCIÓN INNOVADORA PARA LA ILUMINACIÓN DE TÚNELES QUE MEJORA LA SEGURIDAD Y REDUCE EL CONSUMO DE ENERGÍA

Rubén Jover Sevilla
Sacyr Concesiones, S.L.

Las extraordinarias innovaciones desarrolladas entorno a la tecnología led unidas a las evoluciones en los sistemas de control, posibilitan una sustancial mejora en las prestaciones de los sistemas de iluminación proporcionando soluciones cada vez más seguras y eficaces a la vez de más eficientes y económicas.

En este contexto se abre paso una novedosa solución para la iluminación de los túneles de carretera basada en un concepto de alumbrado lineal y continuo.

Estos sistemas se caracterizan por una disposición continua y lineal de la fuente de luz, con lo que la radiación luminosa se aprovecha mejor alcanzando niveles de uniformidad próximos al 100%. Dicha disposición continua posibilita el uso de ópticas muy cerradas que no necesitan cubrir grandes interdistancias y dichas ópticas cerradas eliminan el deslumbramiento y en situaciones de niebla o humo son mucho más eficaces. Todo esto, unido a uniformidades casi perfectas deriva en una extraordinaria mejora en la percepción visual, mejorando así la seguridad y el confort durante la conducción y aumentando el ahorro energético.

Además, generan un efecto guiado que adquiere mayor relevancia en condiciones de baja visibilidad, permitiendo al conductor prever el trazado de la vía.

Una disposición lineal continua unida a los cada vez más avanzados sistemas de control permite la gestión metro a metro logrando una adaptación perfecta a la curva CIE, y mejorando la respuesta en situaciones de emergencia.

Sistemas como Sacyr Iohnic permiten, además, utilizar una sola carcasa para albergar los alumbrados de refuerzo, permanente y emergencia, con la consecuente reducción de costes.

Pudiera parecer que la implementación de soluciones lineales y continuas como Sacyr Iohnic sería más costosa que soluciones convencionales discretas basadas en led, pero la realidad y la experiencia demuestran que supone un coste equivalente a estas.

SACYR IOHNIC, AN INNOVATIVE TUNNEL LIGHTING SOLUTION TO IMPROVE SAFETY AND REDUCE ENERGY CONSUMPTION

The extraordinary innovations developed around LED technology, together with developments in control systems, make it possible to substantially improve the performance of lighting systems, providing increasingly safe and effective solutions that are both more efficient and more economical.

In this context, a new solution for lighting road tunnels based on a linear and continuous lighting concept is opening up.

These systems are characterised by a continuous and linear arrangement of the light source, so that the light radiation is better utilised and uniformity levels close to 100% are achieved. This continuous arrangement makes it possible to use very closed optics that do not need to cover large distances and these closed optics eliminate glare and are much more effective in situations of fog or smoke. All this, combined with near-perfect uniformity, results in an extraordinary improvement in visual perception, thus improving safety and driving comfort and increasing energy savings.

In addition, they generate a guiding effect which becomes even more important in poor visibility conditions, enabling the driver to anticipate the route of the road.

A continuous linear layout combined with increasingly advanced control systems allows metre-by-metre management, achieving perfect adaptation to the CIE curve and improving response in emergency situations.

Systems such as Sacyr Iohnic also make it possible to use a single housing to house reinforcement, permanent and emergency lighting, thus reducing costs.

It might seem that the implementation of linear and continuous solutions such as Sacyr Iohnic would be more expensive than conventional discrete LED-based solutions, but reality and experience show that it is equivalent in cost to the latter.

SACYR IOHNIC, UNE SOLUTION INNOVANTE D'ÉCLAIRAGE DES TUNNELS POUR AMÉLIORER LA SÉCURITÉ ET RÉDUIRE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Les extraordinaires innovations développées autour de la technologie LED, ainsi que l'évolution des systèmes de contrôle, permettent d'améliorer considérablement les performances des systèmes d'éclairage, offrant des solutions de plus en plus sûres et efficaces, à la fois plus performantes et plus économiques.

Dans ce contexte, une nouvelle solution d'éclairage des tunnels routiers basée sur un concept d'éclairage linéaire et continu s'ouvre.

Ces systèmes se caractérisent par une disposition continue et linéaire de la source lumineuse, de sorte que le rayonnement lumineux est mieux exploité et que des niveaux d'uniformité proches de 100 % sont atteints. Cette disposition continue permet d'utiliser des optiques très fermées qui n'ont pas besoin de couvrir de grandes distances. Ces optiques fermées éliminent les éblouissements et sont beaucoup plus efficaces dans les situations de brouillard ou de fumée. Tout cela, combiné à une uniformité quasi parfaite, se traduit par une amélioration extraordinaire de la perception visuelle, ce qui améliore la sécurité et le confort de conduite et accroît les économies d'énergie.

En outre, ils génèrent un effet de guidage qui devient encore plus important dans des conditions de mauvaise visibilité, permettant au conducteur d'anticiper le tracé de la route.

Un tracé linéaire continu associé à des systèmes de contrôle de plus en plus avancés permet une gestion mètre par mètre, ce qui permet une adaptation parfaite à la courbe CIE et améliore la réponse dans les situations d'urgence.

Les systèmes tels que Sacyr Iohnic permettent également d'utiliser un seul boîtier pour abriter l'éclairage de renforcement, l'éclairage permanent et l'éclairage de secours, réduisant ainsi les coûts.

On pourrait penser que la mise en œuvre de solutions linéaires et continues telles que Sacyr Iohnic serait plus coûteuse que les solutions conventionnelles discrètes à base de LED, mais la réalité et l'expérience montrent que le coût est équivalent à ce dernier.

1. INTRODUCCIÓN

La Solución para el Alumbrado de Túneles Sacyr Iohnic se caracteriza por la continuidad longitudinal de sus luminarias. Dicha continuidad elimina los problemas relacionados con la uniformidad y el deslumbramiento; aspectos fundamentales que deben ser considerados en el diseño del alumbrado de túneles.

La uniformidad longitudinal pasa a ser del 100% y la uniformidad global muy cercana a este valor, eliminado el flicker producido por la iluminación convencional basada en puntos discretos. La continuidad de la instalación hace posible trabajar con ópticas muy cerradas que dirigen al haz de luz directamente a la calzada y que evitan que la luz pueda incidir en el ojo del conductor eliminando completamente el deslumbramiento.

La familia de luminarias Iohnic se compone de 30 luminarias que van desde 11 a 320 vatios por metro, permitiendo una adaptación perfecta de la luminancia requerida por la curva CIE de adaptación del ojo, evitando el escalonado típico del alumbrado de refuerzo convencional en las zonas de refuerzo.

La continuidad y linealidad de la solución produce un efecto guiado que permite al conductor prever el trazado de la carretera y una conducción más sencilla, sobre todo en túneles en curva.

Las mencionadas ventajas en lo que respecta a uniformidad y deslumbramiento se traducen en una mejora de la sensibilidad del ojo humano en más del 30% y, por tanto, en una mejora de la seguridad ya que permite la detección de obstáculos mucho antes. De esta forma también se mejora el confort, la sensación de seguridad y la estética de nuestros túneles.

Además, la solución Iohnic mejora extraordinariamente el ahorro energético gracias la eficiencia lumen por vatio de sus luminarias y a la adaptación en tiempo real del flujo luminoso a los niveles de luminancia exterior y de tráfico.

Todo esto se lleva a cabo bajo un estricto cumplimiento de la normativa de fabricación y de instalación, cuyo último fin es la mejora de la seguridad vial.

2. COMPARATIVA

VENTAJAS DEL ALUMBRADO LINEAL	LINEAL LED	LED
Inversión	√	√
Ahorro frente al VSAP	√√√	√√
Uniformidad	√√√	X
Efecto Guiado	√√√	X
Alumbrado Emergencia	√√√	XXX

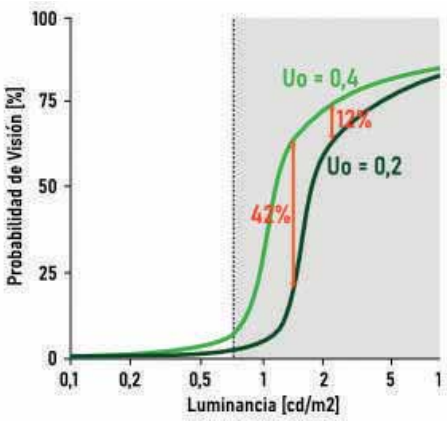
OBJETIVOS DEL ALUMBRADO

- Mejorar la uniformidad y reducir el deslumbramiento con la máxima luminancia.
- Reducir la inversión
- Reducir el gasto energético y el gasto de mantenimiento
- Adaptación a la Orden Circular

VENTAJAS Y POSIBILIDADES DE LAS SOLUCIONES CONTÍNUAS

3. UNIFORMIDAD.

A nivel internacional se han realizado múltiples estudios entre los que destaca el efectuado en relación al poder revelador o probabilidad de visión, expresado como el porcentaje de Objetos situados en diversos puntos de una calzada, dotada con una determinada instalación de alumbrado, que podían distinguirse por una serie de observadores dentro de un grupo de objetos cuya reflectancia era la típica de la ropa de los peatones.



En primer lugar, se deducía que el poder revelador o probabilidad de visión era función de tres factores: la luminancia media de la superficie de la calzada, la uniformidad global de dicha luminancia y el grado de deslumbramiento perturbador o incremento de umbral de contraste TI.

Según dicho estudio, para una luminancia de 1,5 cd/m2 un nivel bajo de uniformidad global Uo = 0,2 reduce la probabilidad de visión en un 42% frente a un nivel de uniformidad global Uo = 0,4.

En niveles superiores de luminancia la probabilidad de visión no es tan notable y supone entre un 5 y un 15%.

Es importante destacar que niveles de luminancia reducidos como los que se tiene en el interior de túneles y, sobre todo, cuando entra en funcionamiento el alumbrado de seguridad por corte del suministro, la uniformidad es un factor crítico.

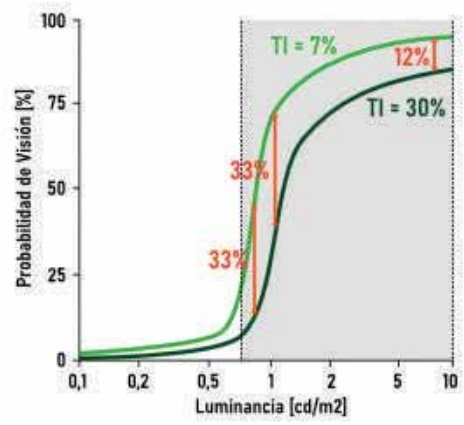
La solución Iohnic proporciona niveles de uniformidad próximos al 100% en la zona interior de los túneles que la zona donde se hace más relevante. Es en dicha zona interior donde la iluminación convencional tiene más distanciados sus puntos de luz y por tanto, peores niveles de uniformidad. A esto añadimos que, en caso de entrar en funcionamiento del alumbrado de seguridad con menor flujo luminoso, la solución Iohnic mantiene encendidos todos los puntos de luz con lo que la uniformidad continúa próxima al 100% en dichos ni-

veles críticos de luminancia. En las soluciones convencionales la solución es muy distinta ya que apagan alternativamente luminarias para reducir el flujo luminoso perdiendo así uniformidad y reduciendo la probabilidad de visionado en dichas condiciones.

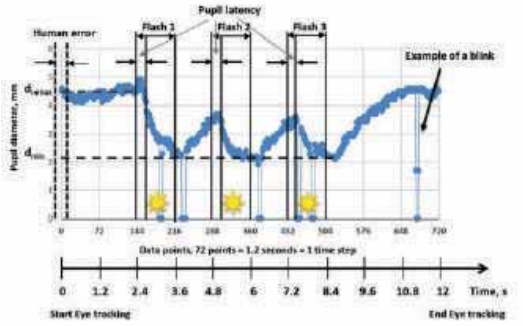
Relacionado con la uniformidad tenemos el efector ficker.

4. SIN DESLUMBRAMIENTO.

Está científicamente demostrado que una reducción del índice de deslumbramiento "TI" mejora la percepción visual. Si reducimos el deslumbramiento "TI" desde el 30% al 7% con niveles de luminancia en torno a 1 cd/m2 tendremos una mejora en la probabilidad de visionar un obstáculo del 33%. Estos niveles de luminancia tan reducidos se corresponden con la condiciones en el interior de los túneles. De igual forma, al reducir el deslumbramiento "TI" desde el 30% al 7% en niveles de luminancia por encima de 2 cd/m2 tenemos una mejora en la probabilidad de visionar un objeto del 12%.

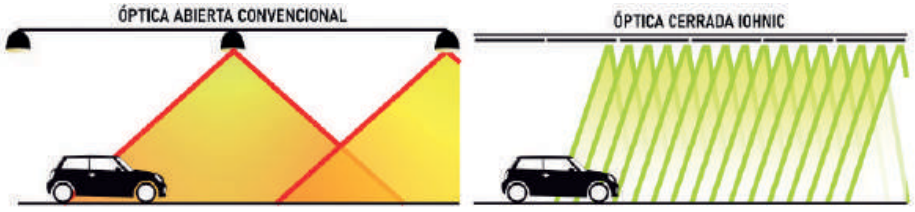


El deslumbramiento produce una contracción de la pupila que bloquea la entrada de luz y reduce la sensibilidad en el visionado además de produce molestias. En túneles convencionales con punto de luz discreto el comportamiento de la pupila es el que se observa en la imagen.

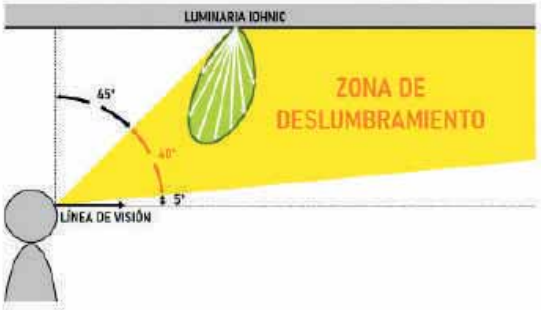


En Iohnic hemos logrado eliminar el deslumbramiento perturbador TI gracias al cierre de la óptica que solamente es posible cuando la disposición de luminarias es continua ya que en las soluciones discretas una óptica cerrada generaría claro-oscuros en la calzada.

Como se muestra en los esquemas el haz de luz de la luminaria Iohnic incide sobre el conductor con ángulos menores de 30º por lo que no genera deslumbramiento.



Dicho de otro modo, dentro de la zona de deslumbramiento los haces de luz no llegan al ojo del conductor con lo que la solución Iohnic consigue eliminar el deslumbramiento perturbador TI.



5. EFECTO GUIADO.

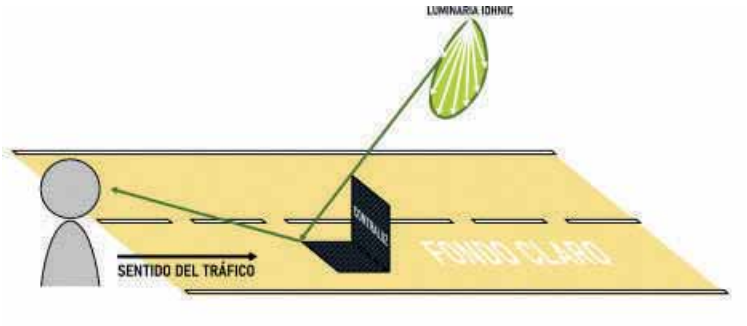
Permite predecir la trayectoria dentro del túnel mediante señales luminosas laterales que ayudan al conductor a posicionar el vehículo en situaciones de poca visibilidad.

Este tipo de señalización es la que se utiliza en las pistas de aterrizaje por la noche, en las que es imposible iluminar suficientemente las pista.

6. SISTEMA A CONTRAFLUJO.

El alumbrado a contraflujo tiene dos ventajas fundamentales:

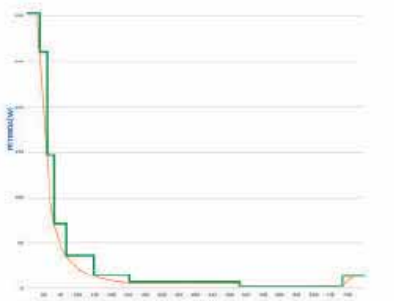
- Mejora el contraste de los obstáculos en la calzada. El contraste es de oscuro sobre fondo claro. La oscuridad del objeto se produce por el contraluz y la sombra que la iluminación a contraflujo produce sobre los obstáculos. Y el fondo claro es debido a una mejora de la reflectancia en la calzada.



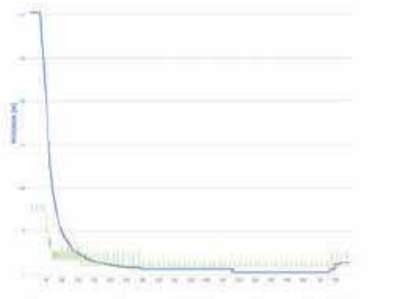
- La mejora la reflectancia sobre la calzada mejora el nivel de luminancia lo que redunda en un ahorro energético.

7. AJUSTE PRECISO DE POTENCIA PARA ADECUACIÓN A CURVA CIE.

Los niveles de luminancia se ajustan a los niveles exigidos por la CIE, siempre fallando a favor, pero de forma muy precisa. De esta forma la adecuación del nivel de luz es gradual y continuo sin la existencia de escalones.



Adaptación a curva CIE ACTUAL



Adaptación a curva CIE IOHNIC

En la gráfica se puede apreciar como la potencia de alumbrado (azul) se ajusta de forma muy aproximada a la potencia requerida por la CIE (naranja) en la solución Iohnic, sin embargo, las soluciones convencionales tienen un ajuste menos preciso.

8. AJUSTE EN TIEMPO REAL DE LA POTENCIA DEL REFUERZO.

La normativa de iluminación de túneles establece unos niveles de luminancia a la entrada del túnel que son proporcionales a la luminancia de acceso a los mismos durante el periodo diurno. En general se implantan tres regímenes: soleado, nublado y crepuscular. Cuando empieza a clarear el día entra en funcionamiento el crepuscular. Cuando la luminancia exterior alcanza un valor superior al establecido por el régimen de crepuscular se activa alumbrado de nublado, de manera que siempre tenemos un excedente de luz. Con Iohnic logramos un ajuste mucho más preciso del consumo energético. Esto es debido a que la iluminación a la entrada se adapta en tiempo real a las condiciones externas de iluminación.

En la siguiente gráfica se muestra en naranja el consumo de un sistema convencional y en azul el consumo del sistema Iohnic.

El funcionamiento de Iohnic sería como se muestra a continuación:

El ajuste de potencia en tiempo real puede variar con el nivel de luminancia exterior, como se acaba de comentar, pero también se puede adaptar a las características del tráfico, permitiendo que cuando la intensidad se reduce el flujo también lo haga, aunque este último aspecto aún no está regulado.

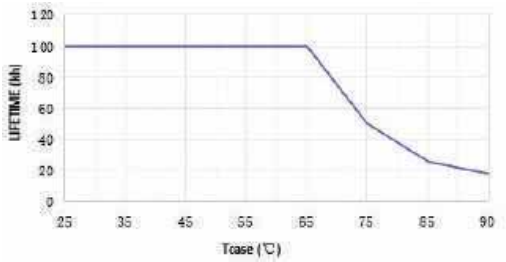
9. ALTA EFICIENCIA DE LA LUMINARIA.

La eficiencia del alumbrado incide directamente en el consumo energético y, por tanto, en la huella de CO2. La solución Iohnic utiliza leds Nichia con un binaje de flujo muy alto que alimentado a bajos niveles de corriente consigue eficiencias superiores a 200 lm/w. En Iohnic, teniendo en cuenta las pérdidas por el driver, la óptica, cristal de protección, etc., tenemos una eficiencia global de alumbrado de 170 lm/w, frente a las soluciones convencionales que están en torno a 130 lm/w.

10. VIDA ÚTIL.

La vida útil de la luminaria se corresponde con la vida útil del driver y de los módulos led. En general, el driver es el elemento más crítico debido a que algunos de sus componentes son condensadores electrolíticos. En el caso del driver, la vida útil es de >60.000h.

Para el módulo led la vida útil es muy superior. Teniendo tan solo una estimación utilizando el TM21 L90 (10k) > 60.000 horas.



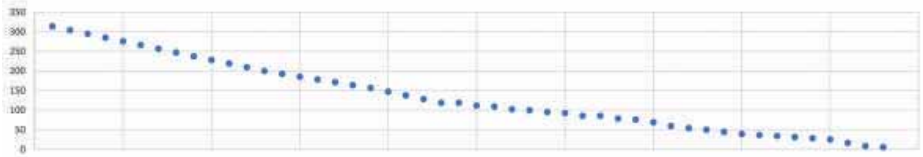
11. DOBLE CIRCUITO.

Con posibilidad de conexión a SAI del circuito de permanente para caídas del tendido eléctrico permitiendo mantener el servicio de todas las luminarias y, por tanto, la uniformidad, muy importante en los casos de baja visibilidad.

De esta forma se consigue tener dos luminarias dentro de una, haciendo que el alumbrado de refuerzo y permanente estén unidos, reduciendo costes de fabricación, instalación y mejorando el aspecto de los túneles.

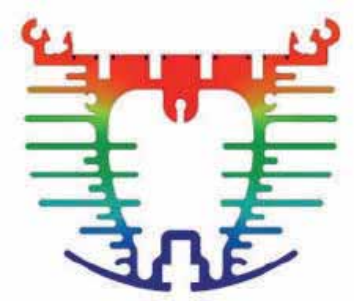
12. FAMILIA DE 30 LUMINARIAS.

Con potencias que van desde 11 hasta 320W/m, Iohnic ha logrado un escalado muy fino que nos permite ajustarnos a las necesidad específicas de potencia en cada una de las instalaciones. Con este ajuste se consigue que los drivers trabajen en condiciones óptimas y, por tanto, reduzcan su distorsión armónica y mantenga niveles elevados de eficiencia y factor de potencia.



13. PERFIL HUECO.

El innovador diseño del perfil de extrusión con aletas interiores amplía la superficie convectiva y reduce la deposición de suciedad, mejora la evacuación de calor lo que redunda en una mayor vida útil del led.



14. MÍNIMO STOCK.

La polivalencia de los módulos led (7 potencias) y drivers (3 potencias) para dar lugar a 30 luminarias diferentes permite minimizar el stock de componentes.

15. INDEPENDENCIA DEL MÓDULO LED Y DRIVER.

Mantenimiento sencillo por independencia del módulo led y el driver, posibilitando así la sustitución indistinta mediante conectores IP roscados de cualquier componente dañado. De esta forma cuando falla un driver solamente hay que sustituir el driver y no la luminaria completa. Si de la misma manera falla un módulo solo se sustituye dicho módulo y no todos los módulos que componen la luminaria y, por supuesto, tampoco el driver. Así se consigue una vida útil superior de las luminarias ya que cuando fallan lo hacen parcialmente.

16. FIJACIÓN BASCULANTE DEL MÓDULO LED.

El alumbrado Iohnic es específico para cada túnel. Entre las características específicas que se calculan para cada túnel está el ángulo de proyección del haz de luz. Esta característica es muy importante dado que la lente con la que se fabrica Iohnic está calculada para poner la luz exactamente en el lugar que corresponde y, por esta razón, dependiendo de las dimensiones, forma y lugar de instalación del túnel, el ángulo óptimo varía.

Los módulos led y fijaciones del sistema Iohnic permiten ajustar el ángulo a la posición correcta.

El sistema de anclaje es común para módulos consecutivos para así lograr un alineamiento perfecto.

17. POTENCIA EXTRA DEL DRIVER.

Para compensación anual de la pérdida de flujo del led por su envejecido y la suciedad, o para reforzar zonas comprometidas por accidentes, obstáculos o durante las labores de mantenimiento. El extra de potencia permite distanciar la frecuencia de las labores de limpieza supliendo la perdida de flujo con un incremento en la carga lumínica.

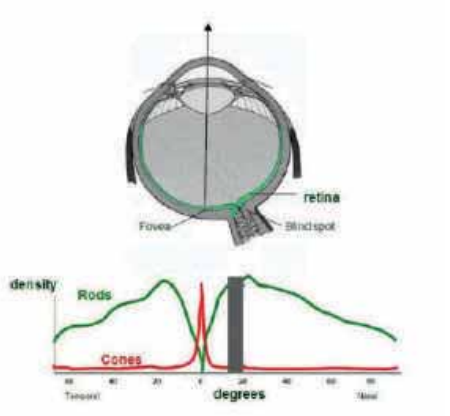
18. AJUSTE DE LA TEMPERATURA DE COLOR.

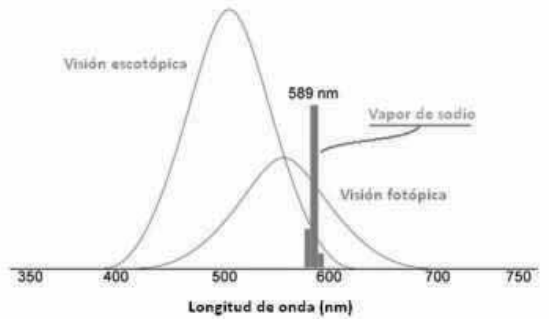
El ajuste en la temperatura de color en la zona interior aumenta la sensibilidad del ojo en condiciones de baja visibilidad, además de ampliar el ángulo de visión y la profundidad de campo.

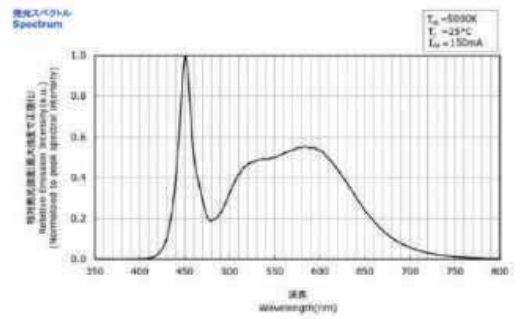
La visión fotópica o diurna es llevada a cabo por los conos cuya sensibilidad, es de tan sólo 683 lúmenes por cada vatio de radiación lumínica, además el campo de visión es muy cerrado ya que los conos se encuentran en la parte central de la fóvea.

Los conos son más sensibles a las tonalidades cálidas en torno a 555nm. Zona en la que se encuentra el vapor de sodio cuya luz es óptima para niveles de luz elevados.

Por otro lado, la visión escatópica o nocturna es llevada a cabo por los bastones cuya sensibilidad a la luz fría es mucho más alta (1700lm/w), además el campo de visión de los bastones es muy amplio dado que se encuentra fuera de la zona central, aunque la nitidez es inferior.







Dentro de un túnel, donde la luminancia es menor a las 10 cd/m2, el ojo trabaja en visión mesópica, escatópica y fotópica a la vez, esto es, los conos y los bastones funcionan al mismo tiempo. El hecho de Iluminar un túnel con luz fría con longitudes de onda predominante próximas a los 500 nm, hace que los bastones trabajen mejor, mejorando la sensibilidad y al ángulo de visión.

Además, está demostrado que la luz fría va a ayudar a contraer la pupila mejorando la visión de los detalles y la profundidad de campo.

La longitud de onda de las lámparas de vapor de sodio para niveles de luz bajos no es aprovechable por los bastones por lo que se reduce la visibilidad. La solución IOHNIC emplea una temperatura de iluminación de 4000K en la zona de refuerzo que es la que está a la entrada de los túneles durante el día y que tiene niveles altos de luminancia, y una temperatura de 5000K para el alumbrado permanente que es el situado en el interior de los túneles donde los niveles de luminancia son muy reducidos. En estas condiciones se consigue triplicar la percepción visual con respecto a túneles iluminados con VSAP. La cantidad de luz percibida por el ojo humano teniendo en cuenta la captación producida por los bastones es lo que se denomina pupil lumens "pLm". En el caso del VSAP tenemos que los pLm = Lm * 0,65. Para Iohnic, el pLm = Lm * 2,15. Donde el factor que se aplica a los lúmenes medidos se denomina relación S/P.

De esta forma, la visión en el interior de los túneles con alumbrado Iohnic sería:

2.15/0.65 = 3,3 veces superior que con VSAP.

Fuente de luz	Relación S/P	
Sodio alta presión (amarillo-blanco)	0,65	
Halogenuros metálicos (blanco cálido)	1,25	
LED (blanco-cálido)	1,3	IOHNIC EN LA ENTRADA
Halogenuros metálicos (blanco frío)	1,8	
LED blanco rico en azul	2,15	IOHNIC EN EL INTERIOR

La tabla 3.4 relación S/P (Fuente: Orden Circular 36/2015 tomo II)

19. COMPORTAMIENTO EN NIEBLA

En situaciones de niebla es fundamental focalizar la luz y marcar los límites de la carretera, por esta razón la solución iohnic utiliza lentes muy cerradas cuyos haces de luz tienen una difracción mínima en contacto con la niebla. Los sistemas convencionales utilizan ópticas muy abiertas que en contacto con la niebla producen una "explosión" de luz generando un resplandor volumétrico dirigido en todas direcciones generando deslumbramiento y falta de visibilidad en la calzada.

Otro aspecto es el guiado. En condiciones de baja visibilidad es importante que el conductor sepa en todo momento donde están los límites de la carretera. En este aspecto iohnic, al ser una solución lineal y continua instalada en los dos hastiales a alturas inferiores que los sistemas convencionales, produce el efecto guiado comentado anteriormente.

En condiciones de niebla la solución Iohnic se presenta como la solución más segura existente en el mercado.

20. LENTES DE POLICARBONATO

La mayoría de los fabricantes de luminarias se decantan por el PMMA (Polimetacrilato de metilo) para fabricar sus lentes. Esta decisión se debe a que el PMMA es más transparente, más barato y resiste mejor la luz ultravioleta que el PC (Policarbonato). Sin embargo, el PC es mucho más duro y estable que el PMMA. En Iohnic suministramos aditivos al PC para paliar los efectos de la luz ultravioleta y elevamos la eficiencia de la luminaria para compensar las pérdidas por la menor transparencia, con lo que se dispone de una lente mucho más duradera que no presenta amarilleo por envejecimiento con los años.

TOWARDS MORE SUSTAINABLE ROAD TUNNELS IN AUSTRALIA AND NEW ZEALAND: RECOMMENDATIONS FOR PRACTITIONERS

Georgia O'Connor
Senior Professional Leader, Australian Road Research Board.

Les Louis
Associate, Les Louis Consulting Engineer.

Tony Peglas
Principal, Tunnelling, Aurecon.

Dr Simon Xue
Senior Professional Leader, Australian Road Research Board.

Dr Richard Yeo
Chief Operating Officer, Australian Road Research Board.

Michael Tziotis
Chief Technology Leader, Australian Road Research Board.

Nigel Lloyd
Principal Structures Engineer, Waka Kotahi NZ Transport Agency.

Sustainability is important for many reasons but fundamentally it is not about what we should do for the environment, it is something we must do to preserve our quality of life and of all life on the planet. It is particularly important for road tunnels because compared to a road at grade, a road tunnel has a substantially higher carbon footprint, both during its construction and during the nonstop operation of its systems through its operating life.

This paper presents ARRB's research, commissioned by Austroads, into achieving sustainability for road tunnels in terms of improved environmental, economic and social outcomes. Specifically, it investigates the sustainable practices associated with managing the design, construction, operation and maintenance of road tunnels.

The research method comprised a comprehensive review of the latest international best practices, such as the PIARC report Road tunnel operations: First steps towards a sustainable approach (2017), consultation with industry and policy stakeholders, and investigation of project experiences in Australia and New Zealand.

Further, this paper provides a range of recommendations to assist practitioners design, build and operate sustainable road tunnels. They are aimed towards inclusion in national best practice guidance for road tunnels and include general sustainability initiatives that can improve ventilation and lighting outcomes, preserve resources, reduce operating costs, utilise recycled materials, and minimise potential adverse environmental and social impacts. This paper aims to provide a benchmark for the sustainability of road tunnels in Australia and New Zealand that can be adapted across the globe. In addition, the recommendations developed through this research have been incorporated into all four parts of the Austroads Guide to Road Tunnels, providing practitioners in Australia and New Zealand with a means of achieving road tunnel sustainability.

HACIA TÚNELES DE CARRETERA MÁS SOSTENIBLES EN AUSTRALIA Y NUEVA ZELANDA: RECOMENDACIONES PARA LOS PROFESIONALES

La sostenibilidad es el desarrollo que trata de garantizar las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones, garantizando el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar y desarrollo social.
Esta sostenibilidad, es particularmente importante para los túneles de carretera, ya que, en comparación con una carretera a nivel, las emisiones de carbono son sustancialmente mayores, tanto en su construcción como durante la operación ininterrumpida de sus sistemas a lo largo de su vida útil.
ARRB fue contratado por Ausroads para realizar un estudio de túneles de carretera, con el objetivo de investigar cómo lograr su sostenibilidad, en miras de obtener óptimos resultados ambientales, económicos y sociales; enfocados en las practica sostenibles asociadas a la gestión del diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carretera.
El método de investigación comprendió una revisión exhaustiva de las mejores prácticas internacionales más recientes, el cual incluye el informe de PIARC : "Operaciones de túneles de carretera: Primeros pasos hacia un enfoque sostenible (2017)", consultas con la industria y partes interesadas, e investigación de proyectos en Australia y Nueva Zelanda.
Este documento también proporciona una serie de recomendaciones para ayudar a los profesionales a diseñar, construir y operar túneles de carretera sostenibles; el cual está basado en las prácticas nacionales para alcanzar la excelencia en constitución, diseño y mantenimiento de túneles de carretera.
Estas recomendaciones incluyen iniciativas generales de sostenibilidad que mejoran la ventilación e iluminación de túneles, preservan recursos y utilizan materiales reciclados, así minimizando los posibles impactos ambientales y sociales.
A su vez, tiene como objetivo proporcionar un punto de referencia para la sostenibilidad de los túneles de carretera en Australia y Nueva Zelanda que se puede adaptar en todo el mundo.
Las conclusiones y recomendaciones desarrolladas a través de esta investigación se han incorporado en la guía de túneles de carretera de Austroads, proporcionando a los profesionales de Australia y Nueva Zelanda un medio para lograr la sostenibilidad ambiental de los túneles de carretera.

VERS DES TUNNELS ROUTIERS PLUS DURABLES EN AUSTRALIE ET EN NOUVELLE-ZÉLANDE : RECOMMANDATIONS POUR LES PRATICIENS

Le development durable est important pour de nombreuses raisons. Il s'agit de préserver l'environnement et plus globalement préserver notre qualité de vie ainsi que toute vie sur notre planète. Cela est particulièrement important pour les tunnels routiers car, comparé à une route, un tunnel routier a une empreinte carbone sensiblement plus élevée, tant lors de sa construction que lors de l'exploitation continue tout au long de sa durée de vie.
Cet article présente les recherches finance par Austroads et realise par l'ARRB (Australian Research Board), sur les aspects de development durables pour les tunnels routiers en termes d'amélioration des résultats environnementaux, économiques et sociaux. Plus précisément, il étudie les pratiques durables associées à la gestion de la conception, de la construction, de l'exploitation et de l'entretien des tunnels routiers.
La méthode de recherche comprenait un examen complet des dernières meilleures pratiques internationales, telles que le rapport de l'AIPCR Exploitation des tunnels routiers : Premiers pas vers une approche durable (2017), une consultation avec les parties prenantes de l'industrie et des politiques et une enquête sur les expériences de projets en Australie et en Nouvelle-Zélande .
Également, ce document fournit une série de recommandations pour aider les praticiens à concevoir, construire et exploiter des tunnels routiers de manière plus durable. Ces recommendations visent à être inclus dans les directives nationales sur les meilleures pratiques pour les tunnels routiers et comprennent des initiatives générales de durabilité qui peuvent améliorer les résultats de ventilation et d'éclairage, préserver les ressources, réduire les coûts d'exploitation, utiliser des matériaux recyclés et minimiser les impacts environnementaux et sociaux négatifs potentiels. Ce document vise à fournir une référence des aspects de developement durable relatifs aux tunnels routiers en Australie et en Nouvelle-Zélande qui peut être adaptée à travers le monde. Les recommandations élaborées dans le cadre de cette recherche ont été intégrées aux quatre parties du Guide Austroads des tunnels routiers, offrant aux praticiens en Australie et en Nouvelle-Zélande un moyen d'ameliorer la conception, construction et l'exploitation des tunnels routiers dans un but de development durable.

1. INTRODUCTION

Sustainability is important for many reasons but fundamentally it is not about what we should do for the environment, it is something we must do to preserve our quality of life and of all life on the planet. It is particularly important for road tunnels because compared to a road at grade, a road tunnel has a substantially larger carbon footprint due to the significant efforts required to build a road tunnel, and the nonstop operation of its systems through its life cycle.

This paper is based on a research project commissioned by Austroads, the collective of all relevant transport and road agencies in Australia and New Zealand. Austroads' mission is to provide high-quality, practical and impartial guidance to its member organisations. One of the guidance documents commissioned by Austroads is the Austroads Guide to Road Tunnels (AGRT). The research presented in this article was undertaken as the basis for updating the AGRT on the topic of sustainability (Austroads 2022a).

This paper provides definition for sustainability in the context of road tunnels; why sustainability is important to consider in the context of road tunnels; how the PIARC approach to road tunnel sustainability has been aligned with Australian and New Zealand practices; and what rating schemes are used for sustainability in Australia and New Zealand. Further, it provides context for how sustainability fits within the lifecycle of a road tunnel, as well as case studies of sustainability initiatives for ventilation and portal emissions.

The research was developed through a review of international best practice, including recent research undertaken by PIARC on sustainability considerations for road tunnels and other published materials. Furthermore, a stakeholder workshop held between the Austroads project working group and key industry representatives sought practitioner perspectives on road tunnel sustainability.

2. DEFINING SUSTAINABILITY IN ROAD TUNNEL DEVELOPMENTS

Defining sustainability in the specific context of road tunnels ensures that sustainable solutions can be fit-for-purpose in achieving sustainable tunnel development. However, the concept of sustainability is broad and evolving, making it difficult to define precisely, so it is unsurprising that the definition of sustainable infrastructure development may vary slightly from country to country. Nonetheless, there are several commonly accepted definitions for sustainable road tunnel development. For example, PIARC (n.d.) suggests that the development principles that support the three sustainability pillars of economic, environmental and societal impacts, represent a widely accepted interpretation of the concept.

The research identified three related concepts that contribute to sustainability in road tunnel development: sustainability; infrastructure sustainability; and road tunnel sustainability.

2.1. Sustainability

Achieving sustainability or sustainable outcomes is the primary objective for potential updates to the AGRT. According to the United Nations, achieving sustainability is meeting "the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs" (United Nations Secretary General and the World Commission on Environment and Development 1987).

This is known as an outcome-based understanding of sustainability and is adopted by Infrastructure Australia (IA) (2021). This notion of sustainability emphasises the need to mitigate the negative impacts of current action on future generations and was recommended as the guiding principle for identifying updates to the AGRT that assist the development of sustainable road tunnels.

2.2. Infrastructure Sustainability

Infrastructure sustainability is a more refined concept, as it pertains to specific sustainability goals in the context of an infrastructure's life cycle. According to the Infrastructure Sustainability Council (ISC) infrastructure sustainability can be defined as "infrastructure that is designed, constructed and operated to optimise environmental, social and economic outcomes of the long term" (Infrastructure Sustainability Council of Australia 2021a). This version highlights the need to undertake a life-cycle approach to achieve desirable sustainability outcomes. Specifically, these outcomes relate to mitigating the negative environmental, social and economic impacts of infrastructure development.

By comparison, the IA definition of infrastructure sustainability is broader, as it further stipulates sustainability considerations for the planning and procurement of infrastructure in addition to a fourth sustainability outcome – governance. The IA defines sustainable infrastructure as (Infrastructure Australia 2021):

> *"The network and system, equipment and assets designed to meet the population's essential service needs, while adhering to sustainability principles. This results in infrastructure that is planned, designed, procured, constructed and operated to optimise social, economic, environmental and governance outcomes over an asset's life."*

IA's four outcomes of infrastructure sustainability are defined in Table 1.

Table 1: Sustainability principles of IA (Table 1 of Infrastructure Australia, 2021).

Component of sustainability	Principle
Social	Infrastructure and policies should improve quality-of-life, access and wellbeing, to create an inclusive and fair society.
Economic	Infrastructure and policies should grow productivity, the Australian economy and allow equitable access to economic and growth opportunities, while efficiently using financial resources.
Environmental	Infrastructure and policies should protect environmental outcomes by reducing pollution, balancing resource consumption, conserving natural ecosystems and resources, and supporting climate mitigation and adaptation.
Governance	Infrastructure and policies should build trust in governance and institutions through transparent, accountable and inclusive decision-making.

2.3. Road Tunnel Sustainability

As an integral part of transport infrastructure, the principles of infrastructure sustainability recommended by the ISC, and IA are relevant for developing sustainable road tunnels. Of the four principles in Table 1, PIARC (2017) highlights the social, economic and environmental principles as the three pillars that will support the development of sustainable road tunnels. Key considerations related to the pillars over the life cycle of a road tunnel are summarised in Table 2. Noticeably, opportunities to influence the pillars are predominantly available at the earlier phases of a road tunnel's life cycle and become increasingly limited at the later stages.

Table 2: Sustainability pillars by project life cycle (Adapted from PIARC, 2017)

Sustainability pillar	Issue	Study/design	Construction/ retrofit	Operation/ maintenance
Social	• Impact on nearby housing • Impact on human health • Impact on employment during construction or refurbishing (consideration of Indigenous people of Australia and New Zealand in procurement and participation, as well as skilled employment pathways) • Economic attractiveness	• Impact on housing condition • Impact of noise and air quality on human health • Economic impact from increased accessibility • Accessibility by non motorised traffic • Impact of noise, vibration and air quality on human health	• Measures to minimise impacts on local communities due to tunnel construction (traffic disruption, noise and dust etc.) • Potential employment opportunities and business opportunities for local residents	• Impact on traffic flow due to maintenance activities (e.g. closures) • Impact on employment during operation • Impact of noise and air quality on community health • Impact of noise, vibration and air quality on human health
Economic	• Wealth creation • Improvement of living standards	• Identification of economic benefit of the road tunnels • Establishment of the life-cycle costs of road tunnel development • Financial sustainability through user charges • Design to optimise life-cycle costs • Economic appraisal of tunnel options	• Implementation of planned technical specification • Monitoring of construction cost against planned budget	• Implementation of planned maintenance activities • Monitoring of operation and maintenance cost against planned budget • Planning for recovery following an emergency
Environmental	• Preservation of species • Preservation of natural resources • Preservation of energy resources	• Impact on air, water and ground • Ecological impact • Conflicts between drivers and animals • Use of renewable and recycled resources • Energy efficiency in construction and operation stages	• Application of sustainable process for material production and transport • Reduction in material haulage distance • Use of energy efficient equipment and systems • Compliance with ecological and environmental specifications	• Monitoring of impacts on air, water and ground during operation to ensure compliance • Monitoring of ecological impacts during operation • Switch to more sustainable energy sources for tunnel operation as they become available • Use of recycled and sustainable materials for maintenance activities

2.4. Interaction of the Sustainability Pillars

The sustainability pillars are not independent, they interact with each other. PIARC (2017) describes the interaction of the social, economic and environmental pillars as follows. If the:

- economic and social pillars are both addressed, then the process is equitable
- economic and environmental pillars are both addressed, then the process is viable
- environmental and social pillars are both addressed, then the process is bearable.

A measure, or set of measures, for a road tunnel project to be considered truly sustainable is if all three sustainability pillars are supported. However, in practice, this is hardly ever the case. For example, construction of a new tunnel may benefit the economy and have social benefits but may not be positive for the environment. Therefore the choices made for sustainability are the result of compromise, balancing the pillars using methods including multi-criteria analysis or a societal cost-benefit analysis to quantify and/or weigh the economic, social and environmental effects.

3. THE IMPORTANCE OF CONSIDERING SUSTAINABILITY IN THE CONTEXT OF ROAD TUNNELS

Sustainability is important in the context of road tunnels, as compared to a road at grade, a road tunnel has a substantially higher carbon footprint, both during its construction and continuous operation of its systems throughout its lifespan. In addition, every state and territory in Australia, as well as New Zealand, has committed to net zero emissions by 2050. Organisations responsible for delivering and operating road tunnel infrastructure will have an obligation to reduce embodied and operational emissions as far as practicable, as the tunnels will exist beyond 2050.

The negative impact on sustainability for a road tunnel is larger than the impact of a road at grade as follows:

- Tunnels have a significant impact on the natural environment, are energy-intensive and require large amounts of natural resources to construct.
- Tunnels demand a large amount of material such as cement, aggregate and steel during construction.
- Tunnels require energy-intensive processes during construction, which can have significant impacts on the site's environment and community (e.g. excavation and spoil disposal).
- Compared to a road at grade, the energy used to build a tunnel is greater but is still small compared to the life-cycle energy requirements in the operations of a road tunnel. (Figure 1).

Road tunnels are energy-intensive elements of infrastructure. Their operation requires continual maintenance and periodic major refurbishments and upgrades. They generate a large amount of carbon during the operation and maintenance phases. Typically, more than 60% of the total embodied carbon and operational carbon of a project is produced during its operational lifetime (Duarte, Cooke & Thomas 2013). Therefore, as road tunnels have a lifespan of around 100 years, any investment in sustainability will have a long-lasting effect.

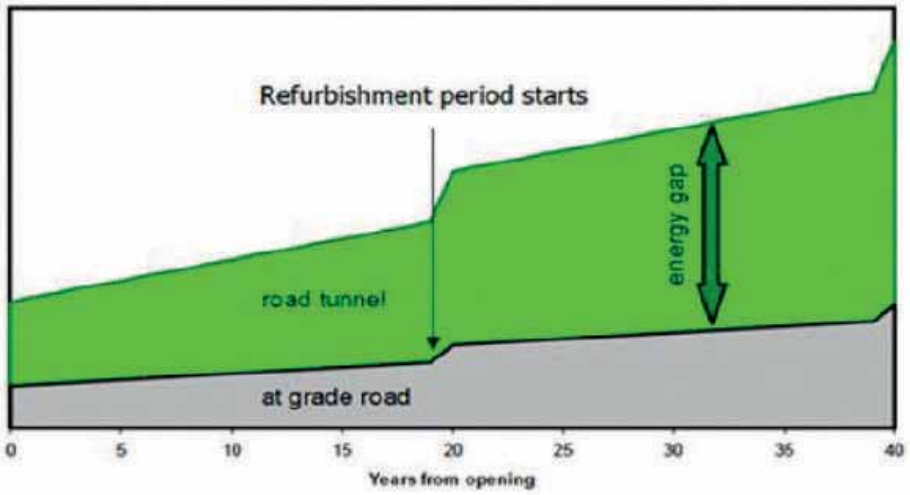


Figure 1: Comparative energy use of a road in tunnel and at grade (Duarte, Cooke and Thomas, 2013)

4. ALIGNING THE PIARC APPROACH WITH AUSTRALIAN PRACTICES

The World Road Association (PIARC) report Road Tunnel Operations: First Steps Towards a Sustainable Approach (PIARC 2017) provides guidance to owners, operators, designers and those constructing tunnels for taking the sustainability of tunnels into consideration during their life cycle, including how operating costs may be reduced. The report also presents an overview of best practice and provides recommendations associated with the sustainability of tunnels.

The update to the AGRT builds on the work produced by PIARC and takes into account key aspects of Australian and New Zealand tunnels. The work considered:

- Current "sustainability" scope of work and technical criteria requirements used in the delivery of road tunnels in Australia and New Zealand.
- The influence of the planning approval process and requirements.
- The benefits of the Infrastructure Sustainability Council of Australia (ISC) ratings scheme.
- Other processes used for delivering sustainability outcomes.
- How sustainability can be best moved from its status as a discrete technical discipline to a key component of the work of each technical discipline (for example, in the same way that "safety is everyone's responsibility").
- How the sustainability representative can best be a facilitator of sustainability initiatives from the rest of the project development, delivery or operations team.

Investigation was undertaken of the issues associated with managing the planning, design, construction, operation and maintenance of road tunnels in a sustainable manner. As an output, all four parts of the AGRT were updated to include sustainability considerations:

- *Part 1: Introduction to Road Tunnels (Austroads 2022b)*
- *Part 2: Planning, Design and Commissioning (Austroads 2022c)*
- *Part 3: Operation and Maintenance (Austroads 2022d)*
- *Part 4: Retrofitting Tunnels (Austroads 2022e).*

By updating the AGRT, owners, operators, designers and those constructing tunnels will have guidance on how to consider and address sustainability during their life cycle.

5. RATING SCHEMES

Rating schemes are benchmarking frameworks and tools for evaluating the sustainability performance of infrastructure developments. Rating schemes are beneficial in incorporating sustainability into road tunnels, as these systems can be used to set goals and ensure that sustainability targets are being achieved. Rating schemes are commonly used for infrastructure projects in Australia and New Zealand.

5.1. What are Rating Schemes?

The primary functions of rating schemes are twofold: to guide sustainability assessments; and to guide the sustainability objectives of infrastructure projects. Using a rating scheme as a guide may provide several benefits for infrastructure developers. The following benefits are identified by the Infrastructure Sustainability Council (ISC) for using the IS rating scheme that it has developed:

- Provides a common national language for sustainability in infrastructure.
- Provides a framework for consistent application and evaluation of sustainability in tendering processes.
- Helps in scoping whole-of-life sustainability risks for projects and assets, enabling smarter solutions that reduce risks and costs.
- Fosters efficiency and waste reduction, reducing costs.
- Fosters innovation and continuous improvement in the sustainability outcomes from infrastructure.
- Builds an organisation's credentials and reputation in its approach to sustainability outcomes (Infrastructure Sustainability Council 2021b).

A rating scheme is typically supported by a rating tool that assesses infrastructure projects against multiple criteria including but not limited to environmental, social and economic criteria. Weights are often assigned to individual criteria so the assessor can determine an overall sustainability score for an infrastructure project for benchmarking purposes.

Rating Schemes in Australia and New Zealand

For road tunnel developments in Australia and New Zealand, the IS rating scheme developed by the ISC should be referenced. At the end of each assessment, the ratings assessor provides both a quantitative (score out of 100) and qualitative score for each project. In addition, the scheme provides a sustainability rating for specific project stages such as planning, design and construction and operations. The details of some road tunnel projects assessed by ISC are presented in Table 3.

Table 3: Road tunnel projects assessed by the IS rating scheme (based on information in Infrastructure Sustainability Council, 2021c).

Project name	Location	Assessment year	Capital value ($ billion)	Quantitative score	Qualitative score	Project phase assessed
Cross City Tunnel	New South Wales	Not available	Not available	Not available	Not available	Operation
NorthConnex	New South Wales	2015	$2.65	87	Leading	Not available
WestConnex – New M5 Main Works	New South Wales	2017	$3.8	76	Leading	Design
West Gate Tunnel	Victoria	2018	$6.7	Under assessment	Under assessment	Design
WestConnex M4 East	New South Wales	2018	$3.8	Not available	Leading	Design

While application of the IS rating is voluntary, public infrastructure contracts typically include IS rating scores in their requirements. For example, the Sydney Metro Northwest Tunnel project, located in the Australian state of New South Wales, is being delivered through three major construction contracts, all of which have been required through contractual documentation to obtain an excellence or higher ISC design and as-built rating (Infrastructure Sustainability Council 2021d). Table 4 reproduces the categories of rating criteria assessed by the IS scheme. Noticeably, it has adopted a quadruple bottom-line approach in which leadership and management practices are assessed under the governance category in addition to social, economic and environmental performance. Definitions and the applied weights of individual criteria under each category in Table 4 are available via the ISC webpage.

Table 4: Rating themes and categories of the IS rating tool (Infrastructure Sustainability Council, 2021e).

Governance	Economic	Environmental	Social
Context	Options assessment and business case	Energy and carbon	Stakeholder engagement
Leadership and management	Benefits	Green infrastructure	Legacy
Sustainable procurement		Environmental impacts	Heritage
Resilience		Resource efficiency	Workforce sustainability
Innovation		Water	
		Ecology	

Rating Schemes around the World

In addition to Australia and New Zealand, rating schemes are used to assess the sustainability performance of road infrastructure around the world. Their relevance for road tunnel projects is limited as it is unlikely that tunnel project contracts released in Australia and New Zealand would stipulate rating schemes developed in another jurisdiction.

To illustrate the use of rating schemes in other countries, Table 5 provides some international examples that are applicable to assessing road tunnels.

Table 5: Rating schemes for general civil projects in other countries (FIDIC, n.d.).

Rating scheme	Country	Infrastructure application	Phase of project rated
CEEQUAL	United Kingdom, Ireland and Hong Kong	Civil engineering, infrastructure, landscaping and works in public spaces.	Planning, design, construction, operation
Envision	USA	Envision provides industry-wide sustainability metrics for all types and sizes of infrastructure to help users assess and measure the extent to which their project contributes to conditions of sustainability across the full range of social, economic and environmental indicators. Not intended to be used to evaluate buildings.	Planning, design, construction, operation
Greenroads	USA	Generic infrastructure, in particular: streets, highways, bridges, rails, trails.	Planning, design, construction
INVEST	USA	The Infrastructure Voluntary Evaluation Sustainability Tool (INVEST) is a voluntary self-evaluation tool to help integrate sustainability into transportation programs and projects. It consists of a collection of criteria deemed to be best practice. There are no credits for complying with environmental and other laws. This tool is developed by the United States Department of Transportation.	Planning, design, construction, operation
GreenLITES	USA	Green Leadership in Transportation and Environmental Sustainability (GreenLITES) is an environmental sustainability rating program for transportation project designs, operations and maintenance practices. It is a self-certification program developed by and for the New York State Department of Transportation.	Design, operation, planning
STARS	USA	The Sustainable Transportation Analysis and Rating System (STARS) is a planning, analysis and certification framework for transportation plans and projects. It helps users identify triple bottom-line outcomes to achieve and then analyse a range of capital and program strategies to achieve the outcomes. STARS users evaluate multimodal capital and program strategies, not just construction design options.	Design, planning
BCA Green Mark	Singapore	The Building and Construction Authority (BCA) Green Mark is primarily a building assessment scheme to promote sustainability in the built environment, designed for a tropical climate. However, the assessment scheme extends beyond buildings to other infrastructure projects.	Construction, operation

6. HOW SUSTAINABILITY FITS WITHIN THE LIFE CYCLE OF A ROAD TUNNEL

As noted in Table 2, the scope to change the sustainability performance of a road tunnel depends on its developmental stage, with options to address sustainability issues becoming increasingly limited as the tunnel approaches further advanced stages of its development. To illustrate this point, Table 6 presents the degree of impact on sustainability issues that may be available for tunnels at various stages of their developmental life cycle.

Table 6: Potential impacts on sustainability issues over tunnel life cycle.

Sustainability pillar	Issue	Planning, design	Construction	Operation and maintenance	Refurbishment and retrofitting
Economic	Wealth creation	High	High	Very low	Moderate to low
	Improvement of living standards	High	High	Very low	Moderate to low
Social	Impact on housing nearby	High	High	Low	Moderate to low
	Impact on human health	High	High	Low	Moderate to low
	Impact on employment during construction (or refurbishment)	Not applicable	High	Not applicable	Moderate
	Impact on employment during operation	Not applicable	Not applicable	High	High
	Economic attractiveness	High	High	Very low	Low
Environmental	Preservation of species	High	High	Low	Moderate to low
	Preservation of natural resources	High	High	Very low	Moderate to low
	Preservation of energy resources	High	High	Low	Moderate to low

Table 6 shows that the greatest opportunities to improve a tunnel's sustainability performance are available at the earlier stages of the life cycle (planning and design). The full gamut of sustainability issues can be comprehensively addressed at these stages via sustainability targets. However, the success of the desired sustainability outcomes will ultimately be determined by how they are prioritised as part of the procurement for the project.

Compared to the earlier developmental stages, options to further improve sustainability performance are significantly reduced at the operation and maintenance stages. One exception is during tunnel operation, where there are ongoing training opportunities to raise employees' awareness of sustainable practices. Opportunities to improve sustainability performance are also present when a tunnel undergoes refurbishment. The extent of the impact will depend on the scale of refurbishment or upgrade. To capitalise on these opportunities, new sustainable technologies may be retrofitted to the existing tunnel. These technologies may include new systems (e.g. lighting and ventilation) that are more energy efficient and/or technologies for mitigating pollution from tunnel operations.

The earlier a sustainability initiative is considered during the life cycle of a project, the better the chance it has to be fully coordinated and incorporated into its lifetime. It will also be less costly to implement. The influence on sustainability outcomes for the life-cycle phases of a road tunnel project are identified as follows:

- Procurement – whether procurement occurs before or after the planning and design phase, the procurement structure can have significant impact on sustainability. The priority for sustainability compared to other requirements such as time, cost and risk, will influence the sustainability outcomes for the full project life cycle.
- Planning and design – playing the most critical role in tunnel sustainability is the planning and design phase. According to PIARC (2017), the impact of this phase on the operation costs and therefore maintenance is significant (60 to 80%); this illustrates the significant influence this phase has when applied to the concept of sustainable development. The relative importance of individual life-cycle phases on the cost of tunnel maintenance is illustrated in Figure 2. It shows that decisions made in the initial design and planning phase have the greatest influence, which becomes progressively diminished as the tunnel advances through its development life cycle.
- Construction – during construction, the focus typically shifts to minimising energy consumption and waste and limiting impacts on the environment and community (Duarte, Cooke & Thomas 2013). Many sustainability measures implemented during the construction phase still need to be identified early in the planning and design phase to be successful.
- Commissioning – during commissioning, there is generally less opportunity to improve the planned sustainability measures as the purpose of commissioning is to validate that the tunnel is operating as designed. At this stage there is limited historical data available to evaluate potential efficiency improvements.
- Operations – as stated above, the operation of a road tunnel is highly dependent on the design and construction phases that precede its commissioning (PIARC 2017). Sustainability can, however, still be supported in the operations phase by improving the measures planned and implemented from the design based on the evaluation of effectiveness in practice (e.g. energy consumption and air quality). Consideration is often given to routine tunnel maintenance, reactive tunnel maintenance, life-cycle maintenance and tunnel services (e.g. electricity and water). Operations is also the stage where retrofitting is extremely difficult and expensive.

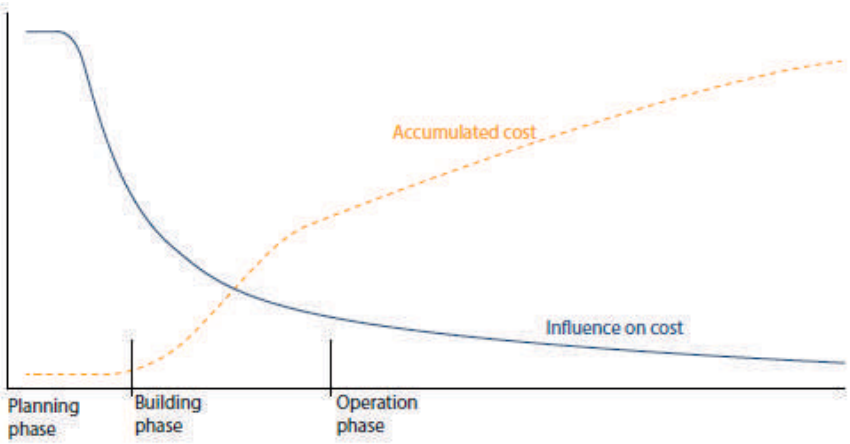


Illustration 4 - Relationship between the cost of maintenance and the level of influence exercised on these costs

Figure 2: Relationship between the cost of maintenance and the level of influence on the costs (PIARC, 2017).

7. PROJECT EXPERIENCE

The following discussion provides an example of a typical sustainability approach and considerations for a road tunnel project. This includes setting up a project for sustainability success, ensuring a sustainability approach has been identified, and integrating key sustainability initiatives into design.

7.1. Setting up a Project for Sustainability Success

The success of a project in achieving meaningful sustainability outcomes requires:

- Clear commitment and leadership to deliver sustainability outcomes.
- Minimum sustainability requirements that are feasible and effective (requires consideration of the scale of the project and project scope and design).
- Contract requirements structured in such a way that the project team and client prioritise sustainability (and that contract requirements contain clear incentives to achieve outcomes beyond the minimum that is required).
- Management of the project in such a way that design and construction decisions:
    - consider sustainability outcomes and apply suitable prioritisation
    - require integration of sustainability between all disciplines and phases of the project
    - require sustainability input in the decision-making process.

7.2. Sustainability Approach

A typical sustainability approach for a road tunnel project may include the following elements to maximise the success of addressing challenges to achieve sustainability, realising the opportunities to enhance sustainability and delivering on the client's commitments:

- Developing a sustainability commitment for the project.
- Integrating key sustainability initiatives into the project's design and embedding accountability.
- Preparing a sustainability plan and supporting investigations and activities such as:
    - materiality assessment – identifying priority sustainability aspects and material impact areas, climate change and natural hazards
    - identifying targets and outcomes, including minimum sustainability requirements and key performance requirements and key performance indicators
    - adopting a rating scheme (e.g. Infrastructure Sustainability administered by the ISC) as a tool to measure the project's commitments in a repeatable, robust and transparent manner
    - embedding sustainability requirements into delivery contracts
    - adopting a collaborative and integrated approach to sustainability, ensuring these aspects are considered as part of decision making (including whole-of-life), accountabilities and assessments across the project.

7.3. Integration of Key Sustainability Initiatives into Design

The greatest opportunities to reduce greenhouse gas emissions (carbon), for any infrastructure project, are at the earlier stages (Figure 3). As the detail and accuracy of the project's design increases, the opportunities decrease and the cost of change increases. As a project moves through design phases and into detailed design, the ability to challenge, influence or alter the design solution reduces and the focus moves more to optimising the design (e.g. pavement types or concrete mix designs).

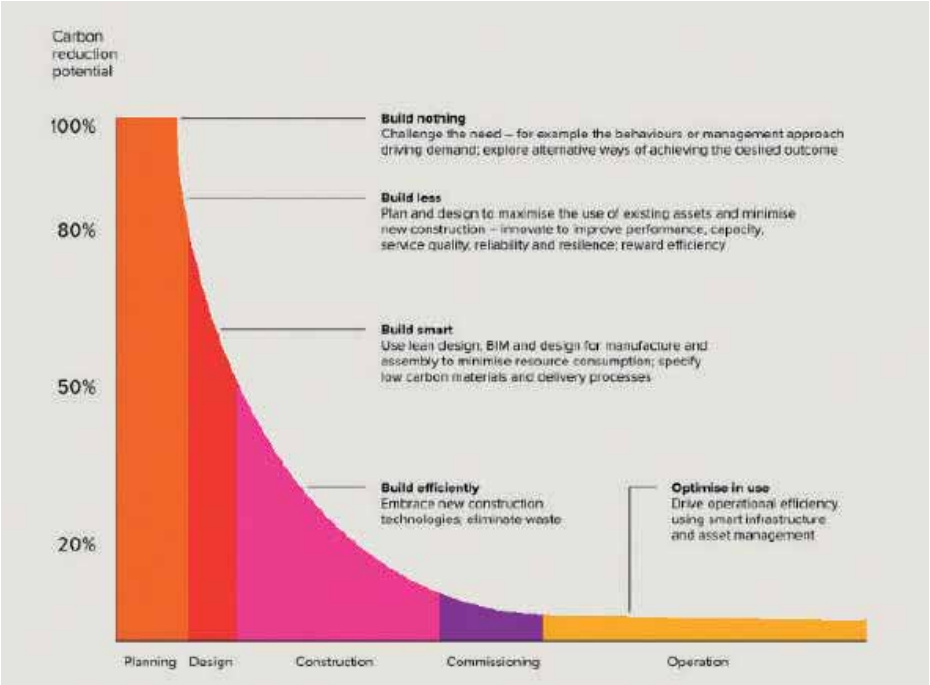


Figure 3: Ability to influence whole-of-life-cycle carbon emissions (Mott MacDonald and Arup, 2016).

7.4. General Sustainability Impacts and Opportunities

Impacts and opportunities in environmental, social and economic areas for typical road tunnel projects include:

- Greenhouse gas emissions (reducing operational energy use and construction material use impacts, considering material quantities and types).
- Resource efficiency (reducing waste to landfill and increasing use of recycled materials).
- Climate-change resilience.
- Greening and water-sensitive urban design.
- Reducing potable water use (using non-potable water sources and reducing tunnelling and operational irrigation water use quantities).
- Social (providing local employment opportunities, minimising community disruptions and impacts).
- City shaping, including improved connectivity, land use uplift and enhanced public amenity.

Further, mitigating the harmful environmental impacts is an important aspect of achieving the sustainability of road tunnels. In addition to greenhouse gas (GHG) portal emissions, other environmental impacts may occur during the construction and operation phases. These impacts may be on air quality, water quality, noise,

ground settlement and visual presentation of the surrounding environment. Examples of initiatives that could be undertaken in each of the impact areas above are provided in Table 7.

Table 7: Examples of sustainability initiatives.

Impact area	Design element	Example sustainability initiative
Greenhouse gas emissions	Tunnel ventilation system	Design for managed emissions, including allowing partial portal emissions, particularly during off-peak times
	Tunnel lighting	Optimise lighting design for energy efficiency
	Tunnel and surface road alignment	Optimise horizontal and vertical alignment to minimise distance travelled and engine load of vehicles (particularly those used for freight) operating on the alignment
	Tunnel cross-section	Optimise tunnel cross-section (length and shape) to minimise construction requirements (diesel fuel and electricity use, and quantities of concrete, steel and spoil)
	Spoil haulage	Minimise emissions generated by spoil-haulage vehicle fleet
	Construction vehicle, plant and equipment fleet	Minimise diesel use from construction vehicles (including spoil haulage), plant and equipment, including consideration of implementing alternative fuel vehicles, plant and equipment
	Concrete elements	Minimise Portland cement content in project-wide concrete uses
	Steel elements	Minimise project-wide steel quantities (e.g. use of green steel and polymer concrete reinforcement)
	Tunnel pavements	Minimise whole-of-life embodied emissions for tunnel pavements
	Flexible pavements	Minimise whole-of-life embodied emissions for flexible pavements
	Vehicles on the road	Investigate project-related opportunities to incentivise uptake of electric vehicles (i.e. travel time benefits for electric vehicle users, inclusion of charging stations)
Resource efficiency	Project-wide materials	Maximise diversion of waste from landfill by recycling or repurposing waste materials. (e.g. the use of Reclaimed Asphalt Pavement, or RAP, for pavement maintenance)
		Maximise the use of recycled construction materials (e.g. the use of recycled aggregates from sand or crushed glass in the construction of pavement)
Reducing potable water use	Tunnel excavation (e.g. tunnel boring machine (TBM))	Minimise potable water use, including replacement of potable water
	Landscape irrigation	Efficient use of water, including replacement of potable water
Climate change resilience	Whole-of-project assets	Incorporate climate change and natural hazard adaptation measures
Greening and water-sensitive urban design	Greening	Increase green canopy cover
	Water-sensitive urban design	Improve water-sensitive urban design outcomes
City shaping	Urban design and city shaping	Create walkable, connected neighbourhoods, drive increased patronage of public transport through delivery of services that are more efficient, integrated and customer focussed, and reduce the need for car journeys. Improved public amenity

8. CASE STUDIES – VENTILATION AND PORTAL EMISSIONS

Most road tunnels in Australia do not allow portal emissions. Outside Australia almost all road tunnels have portal emissions. In New Zealand, the Waterview Tunnel is one which does have restrictions on portal emissions, but it manages the extent of those emissions to suit local conditions. This demonstrates that the management of portal emissions is a significant sustainability opportunity. The management of portal emissions is a significant sustainability opportunity. At the design and planning stages of a tunnel project, the requirement to maintain zero portal emissions is a significant constraint on the design of the ventilation system (Conway 2017). To achieve zero portal emissions, all tunnel air is discharged through the tunnel ventilation outlets, which requires pulling air at the tunnel exit portal against the natural direction of flow (piston effect). This requires operation of the tunnel ventilation system 24 hours a day. While a zero-portal emissions requirement assists with the objective of maintaining air quality levels at sensitive receivers (people, objects, structures or facilities affected by a pollutant) near the exit portals, it comes with a significant cost in terms of energy consumption. Such a requirement also does not take into consideration:

- The likely reduction of emissions from vehicles built in the future; current policies will need to change to get the advantage from the increasing use of zero emission vehicles (O'Kelly 2020).
- The varying use of the tunnel through a given day and week. The EastLink and Domain tunnels in Melbourne, within the Australian state of Victoria, are examples of ventilation systems being operated based on the varying use of the tunnel during a day and during a week.

8.1. EastLink Tunnel (Melbourne, Australia) Ventilation Improvements

By introducing a more energy efficient ventilation system, the EastLink Tunnel in Melbourne had its air emission licence amended in 2018 to allow for daytime portal emissions in addition to night-time emissions (EastLink n.d.). Two energy-conserving upgrades were supported by the extended emission hours. Shepherd and Monson (2021) found that these upgrades reduced the energy used by the ventilation system by 68%, saving approximately 6.2 GWh or 9000 tonnes of CO2-e per annum. In addition, this halved audible fan noise. The upgrades applied to the EastLink ventilation system were:

1. Variable speed drives on fans, allowing the fans to operate at a more efficient lower speed than previously, saving power and reducing audible noise levels.
2. The automatic control system monitors the output of the existing air quality and airflow sensors located within the tunnels and based on the readings, automatically controls the operation and speed of each exhaust fan.

8.2. Waterview Tunnel (Auckland, New Zealand) Portal Emissions

The Waterview Tunnel in Auckland, New Zealand allows portal emissions. The conditions of consent for Waterview effectively require performance-based air quality criteria to be achieved at the nearest sensitive receivers to each portal. This enables the effect of dispersion and dilution to be taken in account while still requiring a clearly defined air quality outcome to be achieved (Hannaby & Wright 2013).

This approach is supported by the Guide to Road Tunnels (NZ Transport Agency 2013). The guide has the following requirement:

> *"Designation conditions need to provide for portal emissions to avoid unnecessary and excessive design and operating costs for ventilation systems. The capital and operational costs of tunnel ventilation systems are considerable. Significant cost savings can be made by avoiding inappropriate ventilation system design requirements, for example 'no portal emissions' and through the energy efficient use of the ventilation system during normal operation."*

9. BARRIERS TO SUSTAINABILITY

There are several potential barriers to achieving good sustainability outcomes on tunnel projects. These include excessive costs (perceived or otherwise), contractual requirements, taking advantage of loopholes in rating schemes, approval of new materials and lack of standards, incentives to use sustainable products, and the consideration of sustainability and safety outcomes.

Sustainability is often expressed in contract documents as one of many requirements; however, it is typically not given a significant priority. When a potentially improved sustainability outcome conflicts with time or cost or risk, there is typically no incentive to prioritise it. For example, geopolymer concrete was considered for the Cross River Rail project in Brisbane; however, the additional cost meant that there was no incentive for the contractor to push for its use (Smith 2021). Raising the priority of sustainability in the tender documentation and evaluation criteria, and through to the delivery of the project, requires commitment and communication at the client level as part of the procurement process.

Rating schemes can be taken advantage of by adopting unrealistic business-as-usual (BAU) standards. A mitigation for this is the specification of BAU standards before the tender process.

To achieve sustainability in practice, new materials may need to be permitted. Examples include geopolymer concrete, using waste glass as a replacement for sand in concrete and using macro-synthetic fibres instead of steel fibres. In some jurisdictions, the biggest barrier to the use of geopolymer concrete in permanent works is the lack of standards. This makes it difficult for all parties: contractors, designers, owners and insurers (Smith 2021). If new sustainable materials are not allowed under current material specifications or national Standards, a contractor seeking to use these would likely face a long and risky approval process. This may result in the contractor deciding that it is not worth pursuing such options in a competitive bid environment or time-constrained delivery program. Use of new materials should be addressed in client specifications as part of the tender process, with a guaranteed approvals pathway. This requires investment by the client in research, testing as required and including these as part of the material specifications. A relaxation of standards when it comes to temporary works should be considered.

As noted in Thomas (2020), "To improve the sustainability of construction, it is suggested the industry's clients need to place a higher value on methods and products that have lower environmental impacts, but this requires investment. Without a financial incentive or reward, suppliers cannot be expected to create and market more sustainable products, and nor can contractors be expected to adopt them in competitive bids." In the UK, the government is looking to award economy-boosting funding to projects that demonstrate a commitment to low-carbon technology (Smith 2021). Changes in government policy, and a growing demand from investors for environmental and social governance, mean that clients are more willing to pay a premium for technology which effectively cuts carbon emissions.

To ensure that overall operational objectives and outcomes are met, particularly when balancing potentially conflicting considerations (for example, where sustainability outcomes do not align with safety outcomes), recommendations for enhancing road tunnel sustainability should not be interpreted as prioritising sustainability over safety, in which fire safety is a key area. It is important that all relevant safety standards and regulations are satisfied prior to implementing any recommendations for sustainability.

As described, a workshop was undertaken with the Austroads Project Working Group. During this workshop, additional barriers to achieving good sustainability outcomes on tunnel projects emerged. These included:

- Lack of political will to invest in the sustainability of road tunnels.
- Lack of consideration of operations during design (i.e., allowing for ease of access so that the tunnel does not need to be closed for maintenance).
- Lack of social considerations such as first nations' rights and heritage areas.

- Lack of a policy-driven approach to require sustainability outcomes.
- Lack of expertise in sustainability assessment.
- Lack of capability building within developers, constructors and operators to identify and implement sustainable solutions.
- Lack of a price for carbon.
- Lack of ongoing communication between the constructor and the ultimate operator; this leads to constructors' lack of awareness and, subsequently, actions to address long-term operational issues.
- Lack of familiarity and perceived additional risk associated with new materials in terms of comparative durability and safety.
- Safety considerations associated with the use of more sustainable materials and designs.
- Perceived operational risk associated with previously unused sustainable products, for example, additional curing time for high-blend concrete (particularly for pre-cast) can impact the construction program.
- Competing demands from different interest groups.
- Unavailability of suitable sustainable technologies.
- The additional time required to implement more sustainable solutions.
- More sustainable solutions may be less adaptable to potential process changes in construction and operation.

10. CONCLUSION

The purpose of this research was to investigate the issues associated with managing the planning, construction, operation and maintenance of road tunnels in a sustainable manner. This research was used to update the Austroads Guide to Road Tunnels (AGRT) so that owners, operators, designers and those constructing tunnels will have improved guidance on how to consider and address sustainability during the life cycle of road tunnels.

Based on this research, the update to the AGRT accepted the definition of sustainability as meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs. There are three related concepts that contribute to sustainability in road tunnel development that were considered in the update to the AGRT, which are the meaning of: sustainability; infrastructure sustainability; and road tunnel sustainability. Each of these were investigated through the three major pillars of sustainability, defined by PIARC as social, environmental and economic.

Various rating schemes for assessing and benchmarking the sustainability of road tunnel projects were reviewed as part of this research. The primary function of such rating schemes, and thus recommended for road tunnel sustainability, is twofold: to guide sustainability assessment; and to guide the sustainability objectives of infrastructure projects. Using a rating scheme as a guide may provide a range of benefits for infrastructure developers including awareness of sustainability drivers and achieving comprehensive outcomes.

The findings from the research were used to inform the proposed updates to the AGRT. Updates were made to provide guidance on a range of areas including sustainability concepts, sustainable materials, spoil re-use, ventilation, portal emissions, environmental impacts and heritage issues.

In addition, key success factors for sustainable road tunnels were found to include the following conditions:

- Clear commitment and leadership to deliver sustainability outcomes.
- Minimum sustainability requirements that are feasible and effective (requires consideration of the scale of the project and project scope and design).
- Contract requirements structured in such a way that the project team and client prioritise sustainability (contract requirements and clear incentives to achieve outcomes beyond the minimum are required).
- Management of the project in such a way that design and construction decisions include prioritising sustainable solutions and sustainability outcomes in tunnel performance.

11. REFERENCES

Austroads 2022a, Sustainability in Road Tunnels: Updating the Guide to Road Tunnels, Austroads, Sydney, NSW.

Austroads 2022b, Guide to road tunnels: part 1: introduction to road tunnels, AGRT01-22, Austroads, Sydney, NSW.

Austroads 2022c, Guide to road tunnels: part 2: planning, design and commissioning, AGRT02-22, Austroads, Sydney, NSW.

Austroads 2022d, Guide to road tunnels: part 3: operations and maintenance, AGRT03-22, Austroads, Sydney, NSW.

Austroads 2022e, Guide to road tunnels: part 4: retrofitting tunnels, AGRT04-22, Austroads, Sydney, NSW.

Conway, J 2017, 'Tunnel infrastructure projects: managing risks to air quality', Australasian tunnelling conference: challenging underground space: bigger, better, more, 16th, 2017, Engineers Australia, pp. 8–29.

Duarte, P, Cooke, M& Thomas, A 2013, 'Sustainability and the tunnelling industry', TunnelTALK, pp.5.

EastLink n.d., Air quality & noise attenuation, webpage, EastLink, Melbourne, Vic, viewed 6October2021, <https://www.eastlink.com.au/about-eastlink/air-quality-noise-attenuation>.

FIDIC n.d., Sustainable infrastructure: rating & certification tools, webpage, International Federation of Consulting Engineers, Geneva, Switzerland, viewed 28 June 2021, <https://fidic.org/node/5943>.

Griffiths, K, Boyle, C& Henning, T 2015, 'Infrastructure sustainability rating tools: how they have developed and what we might expect to see in the future', IPWEA 2015: sustainable communities sharing knowledge, Rotorua, New Zealand, 14 pp.

Hannaby, R & Wright, B 2013, 'Managing air quality in and around road tunnels in New Zealand', Clean Air Society of Australia and New Zealand (CASANZ), Sydney, NSW, viewed 28 June 2021, <https://www.nzta.govt.nz/assets/Highways-Information-Portal/Technical-disciplines/Air-and-climate/Tunnels/CASANZ-Conf-Paper-Managing-Tunnel-AQ-RHannaby-Sep13.pdf>.

Infrastructure Australia 2021, 'Sustainability principles: Infrastructure Australia's approach to sustainability', IA, Sydney, NSW, viewed 28 June 2021, <https://www.infrastructureaustralia.gov.au/sites/default/files/2021-04/IA%20Sustainability%20Principles_final_2.pdf>.

Infrastructure Sustainability Council 2021a, Infrastructure sustainability, webpage, ISC, Sydney, NSW, viewed 28 June 2021, <https://www.isca.org.au/Who-We-Are/Infrastructure-Sustainability>.

Infrastructure Sustainability Council 2021b, IS ratings, webpage, ISC, Sydney, NSW, viewed 28 June 2021, <https://www.isca.org.au/is_ratings>.

Infrastructure Sustainability Council 2021c, Ratings directory, webpage, ISC, Sydney, NSW, viewed 28 June 2021, <https://www.isca.org.au/Ratings-Directory?state-infrastructure=road&page=3>.

Infrastructure Sustainability Council 2021d, 14 new IS ratings, webpage, ISC, Sydney, NSW, viewed 28 June 2021, <https://www.isca.org.au/14_new_is_ratings>.

Infrastructure Sustainability Council 2021e, IS Planning Scorecard, webpage, ISC, Sydney, NSW, viewed 13 May 2021, <https://www.isca.org.au/getmedia/0dca6982-a0bc-4273-bb28-700bc0c9e43f/RPT-000-004-ISv2-0_Planning_scorecard_Rev1-6-5.xlsm.aspx>.

Mott MacDonald & Arup 2016, Guidance document for PAS 2080: the world's first specification for managing whole life carbon in infrastructure, Green Construction Board & Department for Business, Industry and Skills, viewed 28 June 2021, <http://greenbuildingencyclopaedia.uk/wp-content/uploads/2016/05/Guidance-Document-for-PAS2080_vFinal.pdf>.

NZ Transport Agency 2013, Guide to road tunnels: New Zealand supplement to the Austroads Guide to road tunnels, NZTA, Wellington, NZ, viewed 28 June 2021, <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/guide-to-road-tunnels/docs/guide-to-road-tunnels.pdf>.

O'Kelly, D 2020, Implications of the evolving vehicle fleet on ventilation energy consumption in NSW road tunnels, Australian Tunnelling Society, viewed 28 June 2021, <http://www.ats.org.au/wp-content/uploads/2020/08/2020-Daniel-OKelly_ATS-David-Sugden-Award.pdf>.

PIARC 2017, Road tunnel operations: first steps towards a sustainable approach, World Road Association (PIARC), Paris, France, viewed 28 June 2021, <https://www.piarc.org/ressources/publications/9/27306,2017R02FR.pdf>.

PIARC n.d., Sustainability issues, webpage, World Road Association (PIARC), Paris, France, viewed 28 June 2021, <https://tunnelsmanual.piarc.org/en/strategy-and-general-design/sustainability-issues>.

Shepherd, J & Monson, A 2021, 'Ventilation on demand: smarter road tunnel ventilation', Air Quality & Climate Change, vol. 51, no. 1, pp. 53–6.

Smith, K 2021, 'The future for low carbon concrete?', Tunnelling Journal, vol. 2021, April/May, pp. 22–5.

Thomas, A 2020, 'Achieving sustainability in underground construction through innovation', Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering, vol. 173, no. 5, pp. 5–10.

United Nations Secretary General & World Commission on Environment and Development 1987, Report of the World Commission on Environment and Development: our common future, UN, New York, NY, USA.

PROYECTO DE IMPLANTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL TÚNEL DE CARROVIDE (NAVARRA)

Iulen Iturrizaga López
MEIK Ingeniería y Consultoría

Iñigo Echegaray Ezcurra
Gobierno de Navarra

Joseba Arregui Amilibia
MEIK Ingeniería y Consultoría

Javier Amezaga Ruiz
NASERTIC

La sostenibilidad ambiental es uno de los grandes retos de la sociedad actual, un reto que debe ser prioritario tanto para las Administraciones como para todos los ciudadanos. Por esta razón, el Gobierno de Navarra, consciente de la importancia de garantizar la sostenibilidad en todas sus infraestructuras, y más desde la aprobación de la Directiva 2012/27/UE, relativa a la eficiencia energética, ha realizado un Proyecto para mejorar la sostenibilidad de sus túneles carreteros, comenzando por el túnel de Carrovide. Además, la "Hoja de ruta de los sectores difusos a 2020", elaborada por la Oficina Española de Cambio Climático, establece medidas para reducir las emisiones de GEI de los sectores difusos (residencial, comercial, institucional, transporte, gestión de residuos, etc…) en un 10% para el periodo 2013-2020 y un 30% para el periodo 2021-2030 respecto a la niveles de 2005.

El Túnel de Carrovide es un túnel formado por un tubo bidireccional que se encuentra ubicado en la carretera NA-2040, en el tramo Arce – Oroz – Betelu y tiene una longitud de 750 m. lo cual hace que cuente con un conjunto completo de instalaciones de seguridad, pero situado en una carretera con muy poco tránsito (IMD en torno a 400 veh/dia), lo cual lo hace idóneo para este proyecto.

De esta forma los objetivos del Proyecto son dos:

- Optimizar la eficiencia energética actuando sobre los consumos del túnel, especialmente de sus grandes consumidores como son la iluminación y ventilación.
- Implantar elementos de generación de energías renovables con el fin de mejorar la sostenibilidad.

El objetivo del presente Proyecto es por lo tanto cumplir los objetivos anteriores manteniendo en todo momento los mismos niveles tanto de seguridad como de confort de la instalación.

PROJECT FOR THE IMPLEMENTATION OF RENEWABLE ENERGIES AND ENERGY EFFICIENCY IN THE CARROVIDE TUNNEL (NAVARRA)

Environmental sustainability is one of the greatest challenges of today society, a challenge that must be a priority for every Administration and also for all citizen. For this reason, the Government of Navarra, aware of the importance of assuring the sustainability of its infrastructures, especially after the approval of European Directive 2012/27/UE, on energy efficiency, has initiated a project focusing on improving the sustainability of their road tunnels, starting with Carrovide tunnel. In addition to this, the "2020 Fuzzy sectors Roadmap", prepared by the Spanish Office for Climate Change, has established measures to reduce greenhouse gas emissions in those fuzzy sectors (residential, commercial, institutional, transport, waste management, etc…) by 10% in the 2013-2020 period and by 30% between 2021-2030 in respect to 2005 levels.

Carrovide Tunnel is a road tunnel with a single tube with bidirectional traffic located in the NA-2040 road, in the Arce - Oroz-Betelu stretch and is 750 meter long, having a full set of safety installations, but located in a road with very low traffic levels (about 400 veh/day), making it a good candidate for this Project.

Thus, Project objectives are two:

- Optimizing energy efficiency by aiming the tunnel power consumption, specially focusing on its main consumers, like lighting and ventilation.
- Implanting renewable energy generators.

The objective of this Project is thus achieving the aforementioned goals while maintaining both the same safety and user comfort levels.

PROJET POUR LA MISE EN ŒUVRE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LE TUNNEL DE CARROVIDE (NAVARRE)

La durabilité environnementale est un des grands défis de notre société, un défi qui doit être prioritaire pour toutes les administrations ainsi que pour tous les citoyens. C'est pour cette raison que le gouvernement de Navarre, tenant en compte l'importance de garantir la durabilité dans toutes ses infrastructures, surtout après l'approbation de la Directive 2012/27/UE, relative à l'efficacité énergétique, ha commencé un Projet pour améliorer la durabilité de ses tunnels routiers, commençant par le tunnel de Carrovide. De plus, la «Feuille de route 2020 pour les secteurs diffus», préparé par le Bureau Espagnol du Changement Climatique, établi des mesures pour réduire les émissions de gaz à effet de serre des secteurs diffus (résidentiel, commercial, institutionnel, transport, résidus, etc..) en 10 % pour la période 2013-2020 y 30% pour la période 2021-2030 par rapport aux niveaux de 2005.

Le tunnel de Carrovide est un tunnel bidirectionnel qui se trouve dans la route NA-2040, dans le tronçon Arce – Oroz-Betelu, et a une longueur de 750 m, faisant qui doive compter avec un équipement de sécurité complet. Sa situation dans une route très peu transitée (trafic journalier d'environ 400 veh/jour) fait qu'il soit un sujet idéal pour ce projet.

Ainsi les objectifs du Projet son deux :

- Optimiser l'efficacité énergétique, agissant sur la consommation, visant spécialement les grands consommateurs, tels que l'éclairage y la ventilation.
- Installant des systèmes de génération d'énergies renouvelables pour améliorer la durabilité.

Le but du projet vise donc à atteindre les objectifs indiqués ci-dessus tout en préservant les niveaux de sécurité du tunnel ainsi que le confort des usagers.

DESCRIPCIÓN DEL TÚNEL DE CARROVIDE

El túnel de Carrovide (Lakabe) mide 750 metros y se encuentra en Navarra, en la carretera NA-2040, en un tramo muy poco transitado.

El túnel al ser su longitud de 750 dispone de un conjunto completo de sistemas de seguridad, notablemente:

- Ventilación: se dispone ventilación longitudinal mediante 6 ventiladores reversibles de 22 kW de potencia colocados por parejas en la bóveda, separados a distancias transversales de 2,5 m entre ejes y longitudinalmente 150 metros entre ellos.
- Iluminación: la iluminación principal del túnel se resuelve con proyectores de 150 W y 400 W de VSAP para los circuitos nublados y soleados y con proyectores LED de 106 W para el circuito permanente. Se dispone de luminarias de guiado LED de 15 W de potencia.
- Instalación eléctrica: se dispone de un centro de transformación de 400 kVA 13,2 kV/0,4 kV, un grupo electrógeno y un SAI, un equipo automático de compensación de reactiva, un CGBT y los diferentes elementos de cableado y cuadros eléctricos.
- Extinción de incendios: se dispone de armarios contra incendios que se colocan cada 100 metros al tresbolillo que contienen 2 mangueras de 25 metros de longitud, lanzas tipo Blindex, premezclador y botella de espumógeno de 25 litros. Para disponer de caudal y presión de agua suficiente se dispone de un depósito circular enterrado de 124 m3 de capacidad y de un sistema de impulsión de agua situados en la boca de Nagore.
- Señalización vertical, control de accesos y seguridad: se dispone de dos paneles alfanuméricos de mensajes variables de 3 filas de 16 caracteres, sobre pórticos situados en el PK 1+520 y PK 3+200, de tres semáforos de tres focos (verde, amarillo y rojo) de 300 mm de diámetro, barreras de acceso al túnel y paneles luminosos para los postes SOS y señales fotoluminiscentes de evacuación cada 25 metros.
- Circuito cerrado de televisión (CCTV): se dispone de dos cámaras móviles a 15 metros de altura, una en la entrada y otra en la salida del túnel y 8 cámaras en el interior del túnel.
- Detección automática de incidentes.
- Detección lineal de incendios.

- Postes SOS: en el interior del túnel se dispone de un poste cada 200 metros, con una configuración de poste SOS maestro – esclavo, en ambos hastiales. En el exterior se coloca en cada una de las bocas de acceso al túnel 1 poste SOS.
- Gestión técnica centralizada: se dispone de dos detectores conjunto de opacidad y CO, dos anemómetros, 1 fotocélula y una estación meteorológica en la boca de Nagore.
- Radioenlace con centro de control del Gobierno de Navarra: se dispone de una antena – repetidor para enviar los datos procedentes de las diferentes instalaciones al Centro de Control del Gobierno de Navarra. Se trata de una antena de celosía de unos 9 metros de altura a la cual se accede mediante una pista de acceso.

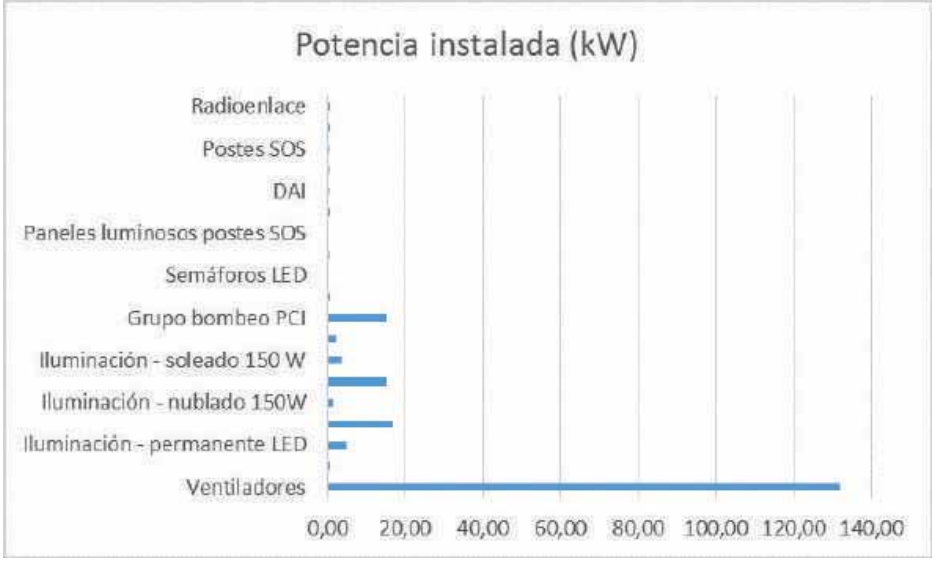
FUNCIONAMIENTO ACTUAL

Potencia instalada

El centro de transformación existente dispone de un transformador de potencia de 400 kVA. En los últimos años se han ido renovando diferentes instalaciones. En la siguiente tabla se indica la potencia de cada equipo instalado actualmente y la potencia instalada en equipos total:

Consumidor	Pot Unitaria (kW)	Nº uds	Potencia (kW)
Ventiladores	22,00	6,00	132,00
Iluminación - guiado LED	0,015	60,00	0,90
Iluminación - permanente LED	0,106	47,00	4,98
Iluminación - nublado 400W	0,40	42,00	16,80
Iluminación - nublado 150W	0,15	10,00	1,50
Iluminación - soleado 400 W	0,40	38,00	15,20
Iluminación - soleado 150 W	0,15	24,00	3,60
Iluminación Exterior	0,25	10,00	2,50
Grupo bombeo PCI	15,00	1,00	15,00
PMV LED	0,50	2,00	1,00
Semáforos LED	0,10	3,00	0,30
Barreras de acceso	0,30	2,00	0,60
Paneles luminosos postes SOS	0,036	6,00	0,22
CCTV	0,10	10,00	1,00
DAI	0,50	1,00	0,50
Detección Lineal de Incendios	0,50	1,00	0,50
Postes SOS	0,10	6,00	0,60
Gestión Técnica Centralizada	1,00	1,00	1,00
Radioenlace	1,00	1,00	1,00
		Total (kW)	199,20

Se dispone de una potencia eléctrica instalada de aproximadamente 200 kW y a continuación se presenta un gráfico con el reparto de potencia instalada entre los diferentes consumidores del túnel:



Tal y como se puede apreciar, los equipos que mayor potencia eléctrica consumen son:

- Ventiladores.
- Grupo de presión PCI.
- Alumbrado interior y exterior.

Ventilación y PCI

El grupo de presión PCI solamente se pone en marcha para la realización de pruebas o en caso de incendio o en caso de que haya alguna fuga en la red por medio de la bomba jockey. Por otra parte los ventiladores se ponen en marcha de acuerdo a los valores marcados por los detectores de CO2 (al ser un túnel sin prácticamente tráfico el encendido de ventiladores para disminución de contaminantes es prácticamente inexistente), en caso de incendio o en caso de realización de pruebas.

Por lo tanto, ambos sistemas deben estar presentes por cuestiones de seguridad y alimentados, pero su consumo eléctrico habitual es prácticamente irrelevante.

Instalación de alumbrado

La instalación de alumbrado está formada por el alumbrado de guiado, el alumbrado permanente, el alumbrado de refuerzo y el alumbrado exterior. A continuación analizaremos el control de funcionamiento existente actualmente en el túnel:

- Alumbrado de guiado: está permanentemente encendido. Recientemente se han modificado las luminarias con lámpara fluorescente de 36W por otras luminarias con lámpara LED de 15W.
- Alumbrado permanente: está permanentemente encendido y no dispone actualmente de regulación de nivel. Recientemente se han modificado las luminarias con lámpara VSAP de 150 W por otros proyectores de 106 W de tecnología LED.
- Alumbrado de refuerzo: se dispone en la boca de Nagore una fotocélula instalada en una de las paredes del centro de control calibrada para que cierre el contacto cuando detecte en el exterior 3.000 lux de iluminancia media. Por tanto, el alumbrado de refuerzo se pondrá en funcionamiento siempre que en la entrada al túnel por la boca de Nagore haya una iluminancia superior a 3.000 lux.

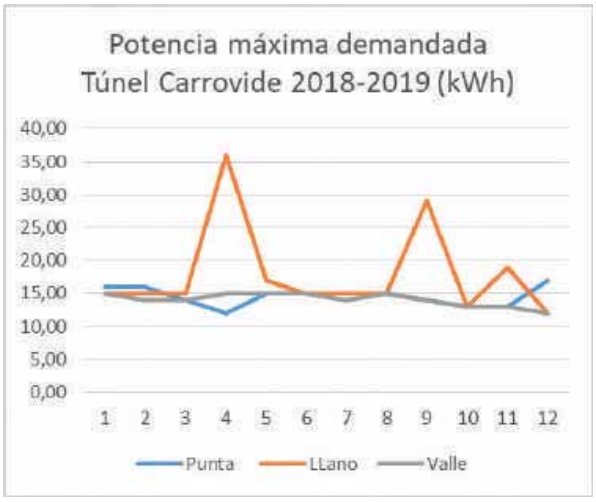
- Alumbrado exterior: el alumbrado exterior se pone en marcha con la señal del reloj astronómico cuando se hace de noche.

Potencia máxima consumida

Del análisis de las facturas eléctricas realizado, se obtiene la lectura del maxímetro cada mes, que corresponde con la potencia eléctrica máxima consumida en ese periodo:

Concepto		sep-18	oct-18	nov-18	dic-18	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19
Potencia	Punta	16,00	16,00	14,00	12,00	15,00	15,00	15,00	15,00	14,00	13,00	13,00	17,00
maxímetro	LLano	15,00	15,00	15,00	36,00	17,00	15,00	15,00	15,00	29,00	13,00	19,00	12,00
(kW)	Valle	15,00	14,00	14,00	15,00	15,00	15,00	14,00	15,00	14,00	13,00	13,00	12,00

Representando los datos en una gráfica, se observa que en el periodo punta y el valle la potencia eléctrica máxima consumida es estable y su valor es de 15 kW. La potencia eléctrica máxima consumida en el periodo llano es durante 9 meses de 15 kW y en 3 meses se eleva a 19 kW, 29 kW y 36 kW.

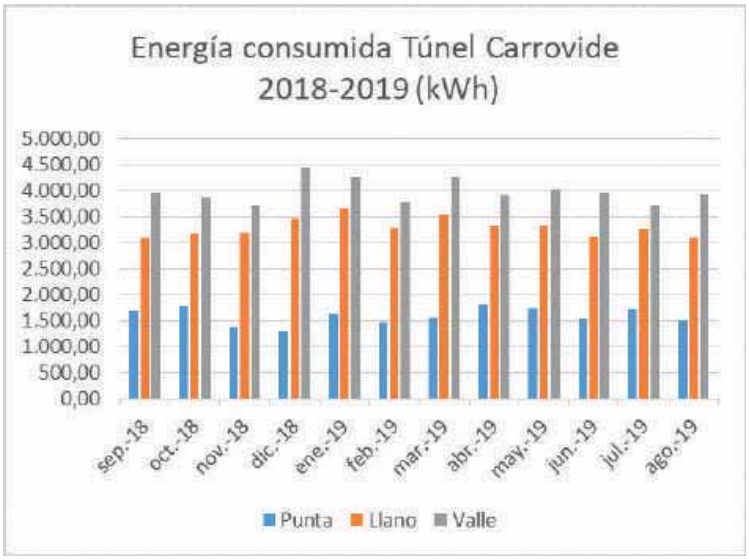


Energía eléctrica consumida

Del análisis de las facturas eléctricas realizado, se obtienen las energías eléctricas consumidas en cada mes y en cada periodo:

Concepto		sep-18	oct-18	nov-18	dic-18	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	Total
Energía (kWh)	Punta	1.678,00	1.785,00	1.369,00	1.311,00	1.628,00	1.469,00	1.544,00	1.810,00	1.729,00	1.527,00	1.713,00	1.511,00	19.074,00
	Llano	3.105,00	3.170,00	3.184,00	3.473,00	3.683,00	3.292,00	3.548,00	3.334,00	3.335,00	3.130,00	3.253,00	3.106,00	39.613,00
	Valle	3.969,00	3.877,00	3.720,00	4.449,00	4.268,00	3.787,00	4.275,00	3.928,00	4.042,00	3.962,00	3.713,00	3.951,00	47.941,00
Total		8.752,00	8.832,00	8.273,00	9.233,00	9.579,00	8.548,00	9.367,00	9.072,00	9.106,00	8.619,00	8.679,00	8.568,00	106.628,00

Representando los datos en una gráfica, se observa que el consumo de energía eléctrica es estable, consumiéndose de media 8.800 kWh/mes, con un consumo de energía eléctrica total al año de 106.628 kWh/año.

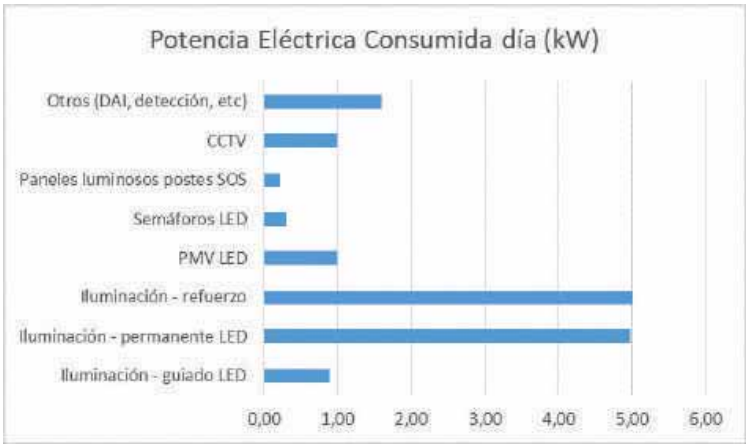


Estimación de reparto de energía eléctrica

Analizando la potencia actual instalada de los equipos instalados, el control de alumbrado existente, el funcionamiento de los equipos en el túnel y las facturas de suministro de energía eléctrica, se puede realizar una estimación del reparto de energía eléctrica actual en el túnel.

Se considera que la potencia consumida se debe al funcionamiento permanente diurno de:

- Iluminación – guiado LED: 0,90 kW
- Iluminación – permanente LED: 4,98 kW
- Iluminación – refuerzo (150W y 400 W): 5 kW
- PMV LED: 1 kW
- Semáforos LED: 0,3 kW
- Paneles luminosos postes SOS: 0,22 kW
- CCTV: 1 kW
- Otros (DAI, Detección, postes SOS, etc.): 1,60 kW



Por la noche, el alumbrado de refuerzo estará apagado por tener una iluminancia inferior a 3.000 lux en el exterior y el alumbrado exterior estará encendido.

Estimando un nº de horas de funcionamiento diurno de 4.760 h, realizamos la estimación de energía eléctrica consumida al año:

Consumidor	Potencia (kW)	Horas/año	Energía (kWh)
Iluminación - guiado LED	0,90	4.760,00	3.600,00
Iluminación - permanente LED	4,98	4.760,00	23.704,80
Iluminación - nublado	5,00	3.000,00	15.000,00
PMV LED	1,00	4.760,00	4.760,00
Semáforos LED	0,30	4.760,00	1.428,00
Paneles luminosos postes SOS	0,22	4.760,00	1.047,20
CCTV	1,00	4.760,00	4.760,00
Otros (DAI, detección, etc)	1,60	4.760,00	7.616,00
	15,00		61.916,00

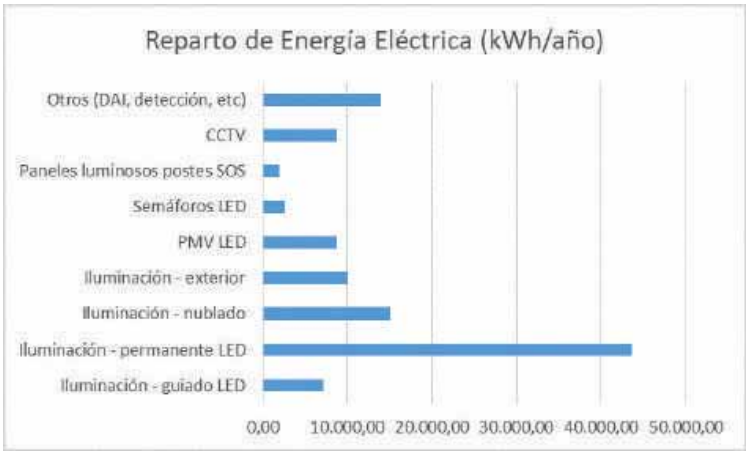
Estimando un nº de horas de funcionamiento nocturno de 4.000 h, realizamos la estimación de energía eléctrica consumida al año:

Consumidor	Potencia (kW)	Horas/año	Energía (kWh)
Iluminación - guiado LED	0,90	4.000,00	3.600,00
Iluminación - permanente LED	4,98	4.000,00	19.920,00
Iluminación - exterior	2,50	4.000,00	10.000,00
PMV LED	1,00	4.000,00	4.000,00
Semáforos LED	0,30	4.000,00	1.200,00
Paneles luminosos postes SOS	0,22	4.000,00	880,00
CCTV	1,00	4.000,00	4.000,00
Otros (DAI, detección, etc)	1,60	4.000,00	6.400,00
	12,50		50.000,00

Sumando ambas obtenemos la estimación del reparto de energía eléctrica consumida en el túnel:

Consumidor	Energia (kWh)	% respecto al total
Iluminación - guiado LED	7.200,00	6,43%
Iluminación - permanente LED	43.624,80	38,98%
Iluminación - nublado	15.000,00	13,40%
Iluminación - exterior	10.000,00	8,94%
PMV LED	8.760,00	7,83%
Semáforos LED	2.628,00	2,35%
Paneles luminosos postes SOS	1.927,20	1,72%
CCTV	8.760,00	7,83%
Otros (DAI, detección, etc)	14.016,00	12,52%
	111.916,00	100,00%

Tal y como se puede apreciar, la energía eléctrica consumida anual estimada es similar a la obtenida por las facturas de energía eléctrica. Se adjunta un diagrama de barras:



Se puede apreciar que la mayor parte del consumo (70%) se debe a los diferentes alumbrados del túnel.

ACTUACIONES PROYECTADAS PARA LA MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD

A continuación se describen de manera general las actuaciones proyectadas para mejorar la sostenibilidad del túnel de Carrovide:

- Sustituir proyectores de refuerzo VSAP de 150 W y 400 W por proyectores LED de la misma marca que los de alumbrado permanente ya sustituidos (Schroeder).
- Sustituir luminarias de exterior de 250 W VSAP en columna de 12 m por luminarias LED.
- Sustituir las luminarias de interior de las casetas técnicas por otras LED y de las balizas de SOS.
- Control y regulación de la instalación de alumbrado interior y exterior del túnel.
- Instalación solar fotovoltaica en la boca de Nagore.
- Instalación de minieólica en la boca de Nagore.

A continuación se describen cada una de las mejoras proyectadas y los impactos esperados.

MEJORA 1: SUSTITUIR PROYECTORES DE REFUERZO

Situación actual

Actualmente los proyectores de alumbrado de refuerzo son de vapor de sodio de alta presión (VSAP) y no admiten una regulación del flujo luminoso emitido por debajo del 75%.

Se dispone actualmente de 80 proyectores de 400 W de potencia y de 34 proyectores de 150 W de potencia.

Consumidor	Pot Unitaria (kW)	Nº uds	Potencia (kW)
Iluminación - nublado 400W	0,40	42,00	16,80
Iluminación - nublado 150W	0,15	10,00	1,50
Iluminación - soleado 400 W	0,40	38,00	15,20
Iluminación - soleado 150 W	0,15	24,00	3,60

Se estima a continuación la energía eléctrica consumida por los proyectores de refuerzo actuales (3.000 h/año de funcionamiento para nublado y 2.000 h/año de funcionamiento para soleado):

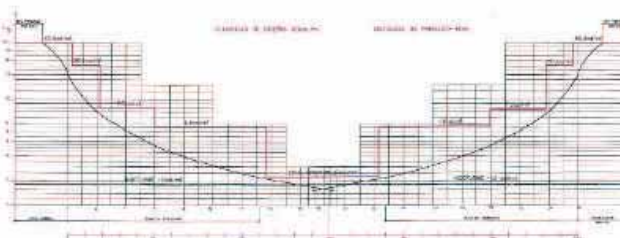
SITUACIÓN ACTUAL					
Luminaria	Potencia (W) (incluido consumo balasto)	Uds	Total (W)	Tiempo Funcionamiento (h/año)	Energía consumida (kWh/año)
Nublado VSAP 150 W	165,00	10,00	1.650,00	3.000,00	4.950,00
Nublado VSAP 400 W	440,00	42,00	18.480,00	3.000,00	55.440,00
Soleado VSAP 150 W	165,00	24,00	3.960,00	2.000,00	7.920,00
Soleado VSAP 400 W	440,00	38,00	16.720,00	2.000,00	33.440,00
				Total	101.750,00

Se indican los parámetros más importantes del sistema de alumbrado definido actualmente en el túnel:

- Velocidad de diseño: 60 km/h
- Distancia de seguridad (DS): 60 m
- Sistema de alumbrado elegido: simétrico.
- IMD: 400 vehículos por día.
- L20 = 2.800 cd/m2
- Clase de alumbrado = 1

Se dispone de los siguientes niveles de alumbrado en los diferentes tramos del túnel:

TUNEL							
ZONA		Régimen de Iluminación	LONGITUD	LUMINANCIA	Uniformidad Global U_0	Uniformidad Longitudinal U_l	
NOCTURNO		Nocturno	750	2.3	0.61	0.57	0.57
		Nocturno Reducido		1.1	0.61	0.57	0.57
UMBRAL = 60 m	TRAMO I	Días Soleados	174	50.8	0.93	0.95	0.95
		Días Nublados		26.5	0.90	0.90	0.89
Zona de Transicion=247	TRAMO II	Días Soleados	64	26.5	0.87	0.89	0.89
		Días Nublados		13.6	0.79	0.71	0.80
	TRAMO III	Días Soleados	128	7.5	0.86	0.88	0.84
		Días Nublados		4.8	0.71	0.72	0.72
	TRAMO IV	Días Soleados	256	4.8	0.78	0.76	0.73
INTERIOR		-	128	2.3	0.61	0.57	0.57
EXTERIOR		-	200	1.2	0.59	0.57	0.72



Descripción de la mejora

La mejora proyectada consiste en sustituir punto a punto los proyectores de alumbrado actuales de VSAP por otros proyectores LED que disponen de driver con regulación DALI que permitirán realizar el control del flujo luminoso y potencia de la luminaria.

Estos nuevos proyectores LED deberán mantener los mismos niveles lumínicos que los actuales. Los nuevos proyectores proyectados son:

- Proyector LED 99 W, 11.237 lúmenes (sustituye al proyector VSAP de 150 W)
- Proyector LED 213 W, 22.555 lúmenes (sustituye al proyector VSAP de 400 W)

Debido a que las potencias de los nuevos proyectores son inferiores a los de los proyectores actuales, el cableado eléctrico actual es válido para la nueva instalación.

Ahorro energético de la mejora propuesta

Tras la implementación de la mejora se obtiene un ahorro de energía de 51.002 kWh/año.

PROPUESTA					
Potencia (W)	**Uds**	**Total(W)**	**Tiempo Funcionamiento (h/año)**	**Energía consumida (kWh/año)**	**Ahorro Energía Año (kWh/año)**
99,00	10,00	990,00	3.000,00	2.970,00	1.980,00
213,00	42,00	8.946,00	3.000,00	26.838,00	28.602,00
99,00	24,00	2.376,00	2.000,00	4.752,00	3.168,00
213,00	38,00	8.094,00	2.000,00	16.188,00	17.252,00
			Total:	**50.748,00**	**51.002,00**

MEJORA 2: SUSTITUIR LUMINARIAS DE EXTERIOR

Situación actual

Actualmente las luminarias de alumbrado exterior son de vapor de sodio de alta presión (VSAP) y no admiten una regulación del flujo luminoso emitido por debajo del 75%.

Se dispone actualmente de 10 luminarias (5 a la salida de cada boca) de 250 W de potencia.

Se estima a continuación la energía eléctrica consumida por las luminarias de alumbrado exterior actuales (4.000 h/año de funcionamiento):

SITUACIÓN ACTUAL					
Luminaria	**Potencia (W)** (incluido consumo balasto)	**Uds**	**Total (W)**	**Tiempo Funcionamiento (h/año)**	**Energía consumida (kWh/año)**
Alumbrado Exterior VSAP 250 W	275,00	10,00	2.750,00	4.000,00	11.000,00
				Total	**11.000,00**

Se dispone un nivel de alumbrado de 1,2 cd/m2.

Descripción de la mejora

La mejora proyectada es similar a la anterior y consiste en sustituir punto a punto las luminarias VSAP existente, por luminarias LED regulables mediante DALI, manteniendo en todo caso los niveles de alumbrado. Las nuevas luminarias proyectadas son:

- Proyector LED 133 W, 15.325 lúmenes (sustituye a la luminaria VSAP de 250 W)

Debido a que las potencias de las nuevas luminarias son inferiores a las de las luminarias actuales, el cableado eléctrico actual es válido para la nueva instalación.

Ahorro energético de la mejora propuesta

Tras la implementación de la mejora se obtiene un ahorro de energía de 7.675 kWh/año, debido a que la potencia es menor y se dispone una regulación que permite que las luminarias den la mitad de flujo luminoso en las horas centrales de la noche.

PROPUESTA					
Potencia (W)	**Uds**	**Total(W)**	**Tiempo Funcionamiento (h/año)**	**Energía consumida (kWh/año)**	**Ahorro Energía Año (kWh/año)**
133,00	10,00	1.330,00	1.000,00	1.330,00	7.675,00
66,50	10,00	665,00	3.000,00	1.995,00	
			Total:	**3.325,00**	**7.675,00**

MEJORA 3: SUSTITUIR LUMINARIAS DE INTERIOR DE CASETAS Y DE LAS BALIZAS DE SOS

Situación actual

Actualmente se dispone de las siguientes luminarias para el alumbrado de casetas y balizas SOS:

- 2 luminarias de 2x36W en cada una de las 4 salas de instalaciones.
- 2 lámparas de 1x18W en cada uno de los 6 paneles luminosos de los postes SOS.

Se estima a continuación la energía eléctrica consumida por las luminarias (8.760 h/año de funcionamiento para los paneles luminosos y 10 h/año para las salas de instalaciones.

SITUACIÓN ACTUAL					
Luminaria	**Potencia (W)** (Incluido consumo balasto)	**Uds**	**Total (W)**	**Tiempo Funcionamiento (h/año)**	**Energía consumida (kWh/año)**
Luminaria 2x36W	79,20	8,00	633,60	10,00	6,34
Lámparas 2x18W	39,60	6,00	237,60	8.760,00	2.081,38
				Total	**2.087,71**

Descripción de la mejora

La mejora proyectada incluye las siguientes actuaciones:

- Sustituir punto a punto las luminarias con lámpara fluorecente de las salas de instalaciones por luminarias estancas LED de 38W de potencia que dan el mismo nivel de luz que las actuales.
- Desinstalar las 2 lámparas fluorescentes de 18 W y colocar una nueva lámpara LED de 18W que da el mismo flujo luminoso que las 2 lámparas de 18W de fluorescencia actuales.

Ahorro energético de la mejora propuesta

Tras la implementación de la mejora se obtiene un ahorro de energía de 1.138,59 kWh/año.

PROPUESTA					
Potencia (W)	**Uds**	**Total(W)**	**Tiempo Funcionamiento (h/año)**	**Energía consumida (kWh/año)**	**Ahorro Energía Año (kWh/año)**
38,00	8,00	304,00	10,00	3,04	3,30
18,00	6,00	108,00	8.760,00	946,08	1.135,30
			Total:	**949,12**	**1.138,59**

MEJORA 4: CONTROL Y REGULACIÓN DE ALUMBRADO

Situación actual

La instalación de alumbrado del túnel se puede dividir en las siguientes partes:

- Alumbrado permanente: funciona de manera continua las 24 h y no tiene regulación.
- Alumbrado de refuerzo: entra a partir de 3.000 lux comandado por la fotocélula.
- Alumbrado de guiado: funciona de manera continua las 24 h y no tiene regulación.
- Alumbrado exterior: funciona por la noche controlado por el reloj astronómico y no tiene regulación.

El túnel de Carrovide se trata de un túnel con muy poco tráfico, en la que la mayor parte del tiempo no dispone de vehículos en su interior. Sin embargo, pese a que no haya vehículos en el interior, los proyectores siguen encendidos generando un consumo de energía innecesario.

SITUACIÓN ACTUAL					
Luminaria	**Potencia (W) (Incluido consumo balasto)**	**Uds**	**Total (W)**	**Tiempo Funcionamiento (h/año)**	**Energía consumida (kWh/año)**
Guiado LED 15 W	15,00	60,00	900,00	8.760,00	7.884,00
Permanente LED 106 W (100% encendido)	106,00	47,00	4.982,00	8.760,00	43.642,32
Nublado LED 99 W (100% encendido)	99,00	10,00	990,00	3.000,00	2.970,00
Nublado LED 213 W (100% encendido)	213,00	42,00	8.946,00	3.000,00	26.838,00
Soleado LED 99 W (100% encendido)	99,00	24,00	2.376,00	2.000,00	4.752,00
Soleado LED 213 W (100% encendido)	213,00	38,00	8.094,00	2.000,00	16.188,00
Exterior LED 133 W (100% encendido)	133,00	10,00	1.330,00	4.000,00	5.320,00
				Total	**107.594,32**

Descripción de la mejora

Se proyecta instalar un sistema automático de detección de vehículos y control de la instalación de alumbrado interior y exterior que permita:

- Detectar la llegada o salida del túnel de un vehículo.
- Medir el nivel de luminancia en cada una de las bocas del túnel a la distancia de seguridad.
- Dar orden de consigna y % de regulación de flujo luminoso a las luminarias del interior y exterior del túnel.

El objetivo buscado es a grandes rasgos tener unos consumos energéticos mínimos en el túnel cuando no hay vehículos en su interior, manteniendo siempre unos niveles mínimos de seguridad y en el momento que vaya a entrar un vehículo al interior del túnel establecer las condiciones de alumbrado adecuadas de manera automática según el momento en el que nos encontremos:

- Durante el día:
  - o Alumbrado en túnel sin vehículos:
    - Alumbrado de guiado encendido al 100% (no tiene regulación).
    - Alumbrado permanente al 20%.
  - o Alumbrado en túnel con vehículos:
    - Alumbrado de guiado encendido al 100% (no tiene regulación).
    - Alumbrado permanente al 100%.
    - Según la medida media de los últimos 10 minutos registrada por el luminancímetro, se encenderán los refuerzos al nivel indicado por el algoritmo de alumbrado.
- Durante la noche:
  - o Alumbrado en túnel sin vehículos:
    - Alumbrado de guiado encendido al 100% (no tiene regulación).
    - Alumbrado permanente al 20%.
    - Alumbrado exterior al 20%.
  - o Alumbrado en túnel con vehículos:
    - Alumbrado de guiado encendido al 100% (no tiene regulación).
    - Alumbrado permanente al 50%.
    - Alumbrado exterior al 100%.

Detección de vehículos

Se han proyectado espiras de inducción electromagnética enterrada bajo el pavimento de la calzada a la entrada y salida de cada carril, a una distancia de unos 300 metros de la entrada del túnel, para dar tiempo suficiente (entorno a 15s) para modificar las condiciones de iluminación antes de que el vehículo detectado llegue al umbral del túnel.

Medida del nivel de luminancia en la boca de Nagore

Se sustituirán las fotocélulas existentes por luminancímetros para medir convenientemente la luminancia desde la distancia de seguridad.

Control

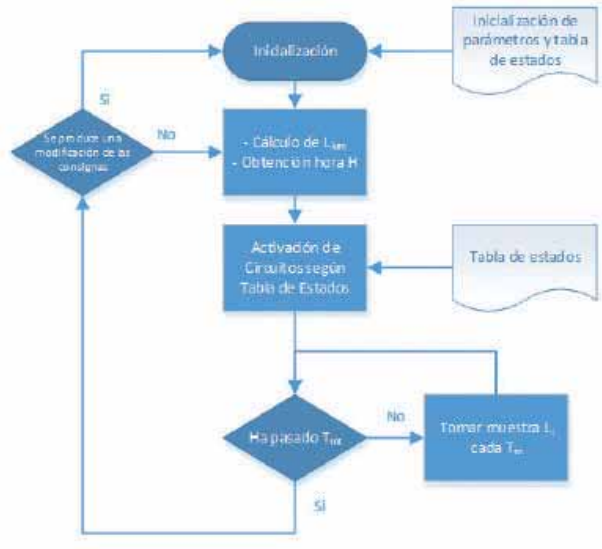
Se dispone de un autómata maestro en el centro de control y de cabeceras de control en los postes SOS. En los postes SOS interiores se colocarán cabeceras DALI desde las cuales partirán 4 buses DALI para conectar todos los proyectores del interior y exterior del túnel.

Comunicaciones y cableado

La comunicación entre los diferentes elementos de control se realizará con la instalación de switches industriales interconectados por fibra óptica tanto en las bocas en los postes SOS.

Algoritmo de control de alumbrado

El algoritmo implantado se puede observar en el siguiente diagrama de flujo:



Ahorro energético de la mejora propuesta

Tras la implementación de la mejora se obtiene un ahorro de energía (*) de 73.884,13 kWh/año.

	PROPUESTA					
Luminaria	**Potencia (W)**	**Uds**	**Total(W)**	**Tiempo Funcionamiento (h/año)**	**Energía consumida (kWh/año)**	**Ahorro Energía Año (kWh/año)**
Guiado LED 15 W	15,00	60,00	900,00	8.760,00	7.884,00	0,00
Permanente LED 106 W (100% encendido)	106,00	47,00	4.982,00	1.752,00	8.728,46	27.931,08
Permanente LED 106 W (20% encendido)	21,20	47,00	996,40	7.008,00	6.982,77	
Nublado LED 99 W (100% encendido)	99,00	10,00	990,00	500,00	495,00	2.029,50
Nublado LED 99 W (50% encendido)	49,50	10,00	495,00	500,00	247,50	
Nublado LED 99 W (20% encendido)	19,80	10,00	198,00	1.000,00	198,00	
Nublado LED 213 W (100% encendido)	99,00	42,00	4.158,00	500,00	2.079,00	24.313,50
Nublado LED 213 W (50% encendido)	49,50	10,00	495,00	500,00	247,50	
Nublado LED 213 W (20% encendido)	19,80	10,00	198,00	1.000,00	198,00	

	PROPUESTA					
Luminaria	**Potencia (W)**	**Uds**	**Total(W)**	**Tiempo Funcionamiento (h/año)**	**Energía consumida (kWh/año)**	**Ahorro Energía Año (kWh/año)**
Soleado LED 99 W (100% encendido)	99,00	24,00	2.376,00	250,00	594,00	3.742,20
Soleado LED 99 W (50% encendido)	49,50	24,00	1.188,00	250,00	297,00	
Soleado LED 99 W (20% encendido)	9,90	24,00	237,60	500,00	118,80	
Soleado LED 213 W (100% encendido)	213,00	38,00	8.094,00	250,00	2.023,50	12.343,35
Soleado LED 213 W (50% encendido)	106,50	38,00	4.047,00	250,00	1.011,75	
Soleado LED 213 W (20% encendido)	42,60	38,00	1.618,80	500,00	809,40	
Exterior LED 133 W (100% encendido)	133,00	10,00	1.330,00	500,00	665,00	3.524,50
Exterior LED 133 W (50% encendido)	66,50	10,00	665,00	500,00	332,50	
Exterior LED 133 W (20% encendido)	26,60	10,00	266,00	3.000,00	798,00	
				Total:	**33.710,19**	**73.884,13**

(*) Se ha realizado una estimación de los porcentajes de regulación a los que va a funcionar la instalación y del tiempo de funcionamiento. Debido a que esto dependerá de los valores del luminancímetro y del tráfico existente que es difícil de predecir.

MEJORA 5: INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA EN LA BOCA DE NAGORE

Situación actual

Actualmente no existe ninguna fuente de energía distinta de la acometida eléctrica de Compañía.

Descripción de la mejora

Se propone instalar una instalación solar fotovoltaica de 15,4 kWp.

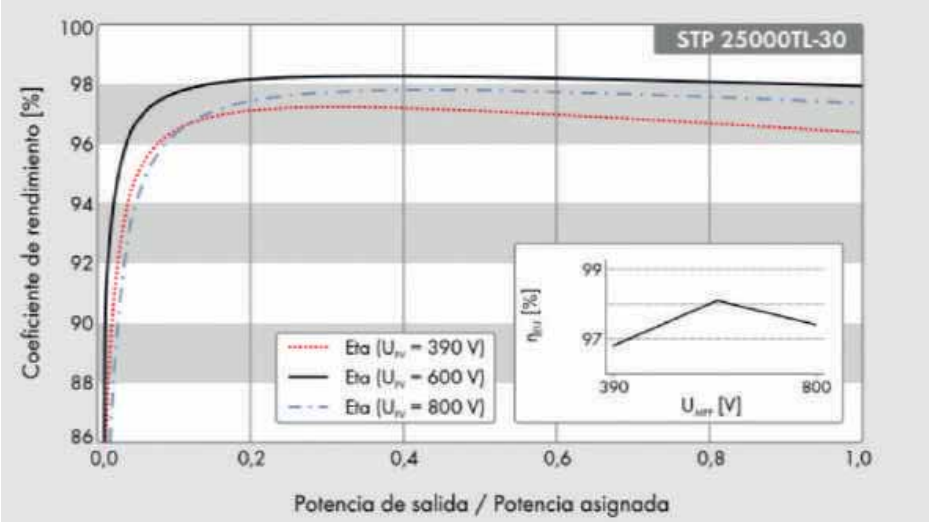
Paneles solares

El campo solar tendrá una potencia de 15,4 kWp con un total de 44 módulos policristalinos de 350 Wp. Este componente será el encargado de captar la irradiancia proveniente del sol para generar corriente continua.

Inversor

Un inversor es un dispositivo electrónico cuya función consiste en convertir un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario. Los inversores se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación hasta aplicaciones industriales complejas. También se usan para convertir la corriente continua generada por los paneles solares FV en corriente alterna y, de esta manera, ser inyectada en la red eléctrica o usada en instalaciones eléctricas.

En este proyecto se ha seleccionado un inversor trifásico con la siguiente curva de rendimiento:



El inversor especificado cuenta con dos entradas MPPT independientes con 3 strings por entrada, lo que significa que los paneles se pueden dividir en dos grupos y que cada grupo se puede instalar en una ubicación o inclinación determinada de forma que ambos grupos trabajarán en su punto de máxima potencia.

En nuestro caso, se propone la siguiente distribución:

- Entrada A: 2 strings de 11 módulos.
- Entrada B: 2 strings de 11 módulos

Estructura soporte

Debido a la pendiente que dispone la zona en la que se van a instalar los paneles, se ha considerado la estructura de soporte más adecuada la estructura de sujeción coplanar sobre una base de hormigón. Debido al tipo de soporte, la inclinación de la instalación será la misma que la de la zona en la que van a ser instalados, 33º aproximadamente.

Toda la estructura se dimensionará teniendo en cuenta las directrices del Documento Básico DB SEAE (Acciones en la Edificación), y las del eurocódigo UNE-EN 1991–1-4:2007/AC: 2010, en los que se establecen los criterios de cálculo de las cargas derivadas de fenómenos meteorológicos como la nieve y el viento.

La instalación se realizará sobre solera de hormigón, sin riesgo alguno de inestabilidad o falta de sujeción por vientos o nieve. Toda la estructura será de aluminio, con toda la tornillería de acero inoxidable. El diseño de la estructura soporte y del sistema de fijación permitirá las necesarias dilataciones térmicas, sin que éstas puedan originar cargas que afecten a los módulos.

Los puntos de sujeción y apoyo de los módulos fotovoltaicos en la estructura soporte serán suficientes en número, teniendo en cuenta el área de apoyo y la posición relativa, de manera que no se originen en los módulos flexiones superiores a las admisibles.

La tornillería será en todos los casos, de acero inoxidable. En todo momento se garantizará la resistencia de esta estructura a las condiciones climatológicas más adversas, tanto desde el punto de vista de calidad como de resistencia a los agentes atmosféricos.

Toda la tornillería instalada se sellará en el punto de perforación del hormigón con un material que garantice la correcta impermeabilización (solución bitumínica, masillas o selladores a base de poliuretano, etc), además, la tornillería dispondrá también de juntas de goma para en los puntos de sujeción realizados, se garantice que la humedad no pueda penetrar.

Monitorización

Se ha previsto la instalación de un gestor energético inteligente que permite la máxima utilización de la energía fotovoltaica de forma eficiente y medir la energía eléctrica para determinar los parámetros eléctricos de forma precisa y comunicarlos a través de Ethernet al centro de control. Esto permite transmitir todos los datos de inyección a red y consumo de red.

Marco normativo

La instalación proyectada se clasificará como de autoconsumo con excedentes acogidos a compensación, de acuerdo al recientemente publicado RD 244/2019 por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo.

Para instalaciones de autoconsumo con excedentes acogidos a compensación de deben cumplir los siguientes requisitos:

- La fuente de energía primaria sea de origen renovable.
- La potencia total de las instalaciones de producción asociadas no sea superior a 100 kW.
- Si resultase necesario realizar un contrato de suministro para servicios auxiliares de producción, el consumidor haya suscrito un único contrato de suministro para el consumo asociado y para los consumos auxiliares de producción con una empresa comercializadora, según lo dispuesto en el artículo 9.2 del presente RD 244/2019.

Por tanto, en caso de que se produjera mayor cantidad de energía eléctrica que la consumida por la instalación, el excedente generado se vendería a la empresa comercializadora mediante un contrato de compensación de excedentes.

Ahorro energético de la mejora propuesta

El ahorro energético se corresponde con la energía eléctrica producida por el campo solar fotovoltaico. La energía eléctrica generada se ha calculado con el software PVGIS:

Se produce una energía eléctrica de 22.668,80 kWh/año.

Mes	Energía eléctrica producida (kWh/kWp)
Enero	63
Febrero	84,5
Marzo	124
Abril	136
Mayo	150
Junio	161
Julio	181
Agosto	173
Septiembre	145
Octubre	115
Noviembre	71,2
Diciembre	68,3
Total (kWh año/kWp)	1.472,00
kWp:	15,40
Total (kWh/año):	**22.668,80**

MEJORA 6: INSTALACIÓN DE MINIEÓLICA EN LA BOCA DE NAGORE

Situación actual

El túnel dispone de un contrato de suministro de energía eléctrica, no disponiendo ninguna fuente de suministro de energía renovable.

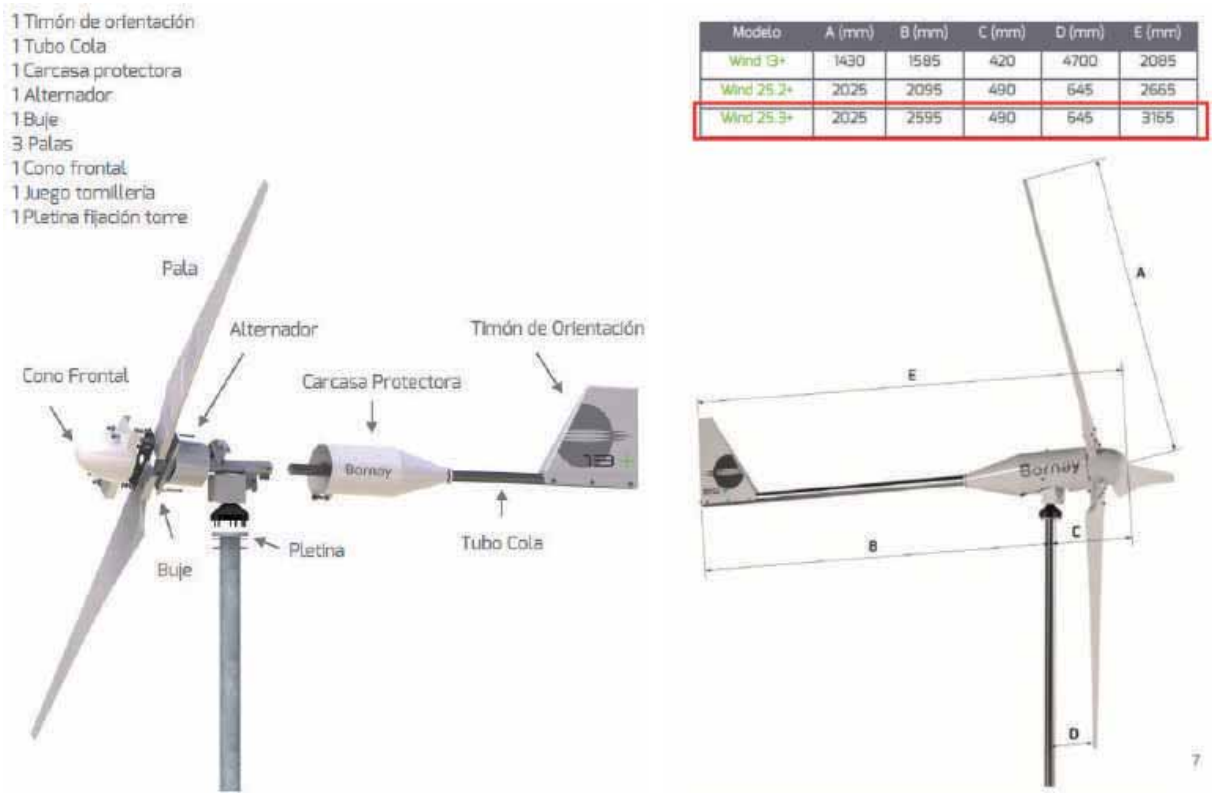
Descripción de la mejora

Se ha proyectado la instalación de un aerogenerador de 5 kW de potencia nominal. La instalación estará formada por los siguientes elementos:

- Aerogenerador de 5 kW
- Torre
- Interface Wind +
- Inversor 5 kW

Aerogenerador de 5 kW

El aerogenerador especificado está formado por los siguientes elementos y dimensiones:



El aerogenerador consta de 3 partes móviles:

- El eje delantero (hélice – alternador), provisto de rodamientos blindados y recubiertos totalmente con una grasa de por vida.
- El eje de orientación (aerogenerador – torre), provisto con rodamientos blindados.
- El eje de inclinación (alternador – giratoria).

Torre

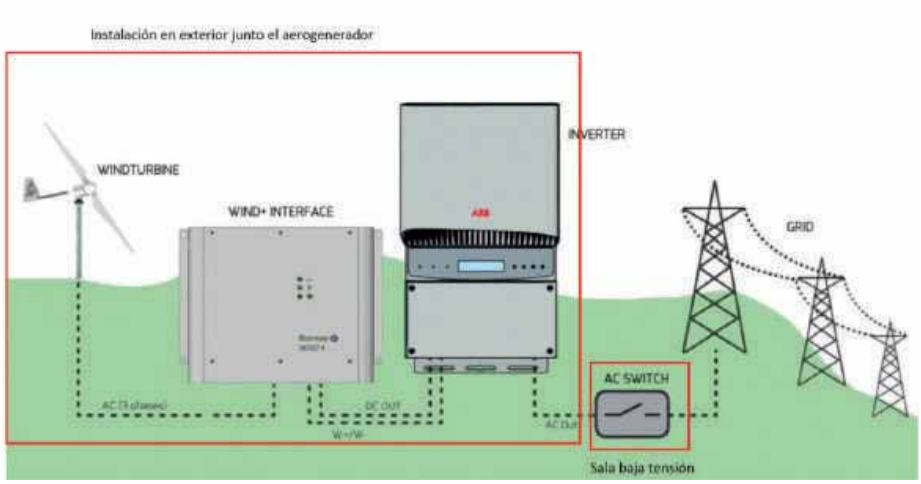
Se ha proyectado el montaje del aerogenerador en una torre metálica cuatripata autosoportada de 13 m de altura.

Interfaz wind+

El interfaz Wind+ rectifica, controla y filtra la energía producida por el aerogenerador entregando energía apta para su entrada al inversor. Dispone de comunicación modbus RTU.

Su función es controlar el aerogenerador y la energía que produce para alimentar los consumos de una forma eficiente.

Se muestra a continuación el esquema de conexionado entre el aerogenerador, el interfaz – controlador, el inversor y el CGBT:



Inversor 5 kW

El aerogenerador produce 5 kW de potencia máxima en 230 Vac, se conecta al controlador y este la rectifica para poder transformarla a tensión alterna trifásica por medio de un inversor de 5 kW.

Tanto el controlador como el inversor se proyectan en un armario a pie de campo junto al aerogenerador.

Las características principales del inversor previsto son:

- Tensión de entrada máxima: 850 Vdc
- Rango de tensión nominal entrada: 215 – 800 Vdc
- Corriente máxima de entrada: 12 A
- Potencia máxima de salida: 5 kW
- Tensión de salida: 3F 400 Vac
- Corriente máxima de salida: 7,6 A

Emplazamiento

El emplazamiento dónde se instale el aerogenerador el viento debe soplar con la mayor velocidad y constancia posible. La velocidad del viento depende, en gran medida, del terreno sobre el que se mueve el aire, la vegetación y el tipo de terreno. Las construcciones cercanas y otros factores frenan el viento y producen turbulencias.

El lugar idóneo para un aerogenerador, es una zona libre de obstáculos y lo más alto posible respecto a los obstáculos.

A este respecto, se plantean dos opciones de colocación posible:

- Opción A: en la ubicación del radioenlace actual, ya que éste se va a desinstalar y es una zona en la que hay mejores condiciones de viento.
- Opción B: en la ubicación próxima al centro de control, en la zona próxima a la instalación solar fotovoltaica planteada.

Marco normativo

El marco normativo aplicable a esta mejora es el mismo que el explicado anteriormente para la instalación solar fotovoltaica.

Ahorro energético de la mejora propuesta

El ahorro energético se corresponde con la energía eléctrica producida por el aerogenerador minieólico.

- Ahorro energético de la propuesta "A":
  - Velocidad media altura buje: 5 m/s
  - Energía generada día: 16,3 kWh/día
  - Energía total: 5.949,5 kWh/año
- Ahorro energético de la propuesta "B":
  - Velocidad media altura buje: 3,5 m/s
  - Energía generada día: 5,9 kWh/día
  - Energía total: 2.153,5 kWh/año

CONCLUSIÓN

El presente Proyecto recoge diversas medidas para mejorar la sostenibilidad de un túnel de longitud superior a 500 metros, con un conjunto completo de instalaciones, garantizando en todo momento el mantenimiento de los mismos niveles de seguridad y confort existentes en el túnel.

En la siguiente tabla se puede observar un resumen de los ahorros energéticos estimados, así como los presupuestos de inversión asociados a cada mejora y el ratio €/kWh, así como una indicación de los kWh correspondiente a una disminución del consumo (eficiencia energética), como los derivados de una sustitución de la fuente energética por una renovable:

Propuesta de Mejora	Ahorro de Energía Eléctrica (kWh/año)	Inversión (€)	Ratio €/kWh ahorrado	Tipo de ahorro
Mejora 1: Sustituir Proyectores de Refuerzo	51.002,00	105.402,70	2,07	Eficiencia energética
Mejora 2: Sustituir Luminarias de Exterior	7.675,00	8.382,90	1,09	Eficiencia energética
Mejora 3: Sustituir Luminarias de interior de casetas y de las balizas SOS	1.138,59	1.116,80	0,98	Eficiencia energética
Mejora 4: Control y regulación de alumbrado	73.884,13	65.418,74	0,89	Eficiencia energética
Mejora 5: Instalación solar fotovoltaica en la boca de Nagore	22.668,80	28.066,65	1,24	Energía renovable
Mejora 6.A: Instalación de minieólica en la boca de Nagore (Propuesta A)	5.949,50	26.736,11	4,49	Energía renovable
Mejora 6.B: Instalación de minieólica en la boca de Nagore (Propuesta B)	2.153,50	15.058,96	6,99	Energía renovable
Total (con propuesta 6.A)	**162.318,02**	**235.123,90**	1,45	
Total (con propuesta 6.B)	**158.522,02**	**223.446,75**	1,41	

IMPACTO DE LAS CONCENTRACIONES DE NOX EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE VENTILACIÓN

Isaac Guijarro Meléndez
AECOM

Durante el diseño de sistemas de ventilación de túneles carreteros, en ocasiones se dimensionan los equipos considerando la operación de emergencia, siendo esta operación la más crítica por sus consecuencias (daños personales, materiales, operativos, etc.).

Sin embargo, la operación normal es la que con más frecuencia se utiliza y la responsable de la gestión de los contaminantes producidos por los vehículos durante el uso habitual del túnel.

Los diseños buscan la mejor solución posible con el fin de garantizar el cumplimiento de la normativa medioambiental del país en el que está construido el túnel.

Se han realizado análisis de contaminantes durante el diseño de la ventilación de túneles con herramientas de simulación 1D.

Los países con normativa medioambiental en la que se incluyen límites de contaminantes, estos están asociados a las emisiones del parque de vehículos.

PIARC 2012 establece valores límite recomendados de NO2 de máximo 1 ppm [2].

PIARC 2019 no establece valores límite de NO2, salvo valores establecidos en la normativa de algunos países. (v.g.: Francia 0.4 ppm, Australia 0.5 ppm) [12].

En países donde no existe regulación medioambiental relacionada con límites de concentración, en ocasiones, se acuerdan, con la autoridad medioambiental, valores de otras geografías o recomendaciones PIARC.

En estas geografías donde no se conoce la antigüedad de los vehículos y la proporción de tipos de vehículo y combustible, se observa que el uso de valores inferiores a 1 ppm supone un "sobredimensionado" de las instalaciones de ventilación, sobre todo con vehículos previos a la norma Euro 3.

El presente estudio analiza el diseño de los sistemas de ventilación en túneles carreteros internacionales durante la operación normal y de congestión (o tráfico anormal). La operación del sistema de ventilación del túnel se produce con un caudal de aire variable en función del tráfico.

El objetivo de este estudio es evaluar el impacto que tienen estos valores límite, tanto en costes de capital (CAPEX) como en operativos (OPEX).

IMPACT OF NOX CONCENTRATION ON THE DESIGN OF THE ROAD TUNNEL VENTILATION SYSTEMS

During the design of road tunnel ventilation systems, sometimes, the equipment is sized considering the emergency operation, being the most critical due to its consequences (personal injury, destruction to property or contents, operational issues, etc.).
However, normal operation is the most frequently used and is responsible for managing the pollutants produced by the vehicles during the normal use of the tunnel.
The designs seek the best possible solution in order to guarantee compliance with the environmental regulations of the country in which the tunnel is located.
Pollutant analysis have been performed during tunnel ventilation design with 1D simulation tools.
There are countries with environmental regulations that include pollutant limits associated with the emissions of the vehicle fleet.
PIARC 2012 establishes recommended limit values for NO2 of a maximum of 1 ppm [2].
PIARC 2019 does not establish limit values for NO2, only values established in the local regulations of some countries. (e.g.: France 0.4 ppm, Australia 0.5 ppm) [12].
Countries without environmental regulations related to pollutant limits, usually use values from other geographies or PIARC recommendations, and occasionally agreed with the environmental authority.
Geographies where the age of the vehicles and the proportion of types of vehicles and fuel are unknown, it is observed that the use of values below 1 ppm supposes an "oversizing" of the ventilation system, specifically with vehicles prior to the Euro 3 standard.
This study analyzes the design of ventilation systems in international road tunnels during normal and congested (or abnormal traffic) operation. The operation of the tunnel ventilation system adapts with a variable air flow depending on the traffic.
The aim of this study is to evaluate the impact of these limit values, both in capital expenditures (CAPEX) and in operational expenditures (OPEX).

IMPACT DES CONCENTRATIONS DE NOX SUR LA CONCEPTION DES SYSTÈMES DE VENTILATION

Lors de la conception des systèmes de ventilation des tunnels routiers, les équipements sont parfois dimensionnés en tenant compte de l'opération d'urgence, cette opération étant la plus critique en raison de ses conséquences (dommages personnels, matériels, opérationnels, etc.).
Cependant, l'exploitation normale est la plus utilisée et est responsable de la gestion des polluants produits par les véhicules lors de l'utilisation normale du tunnel.
Les conceptions recherchent la meilleure solution possible afin de garantir le respect des réglementations environnementales du pays dans lequel le tunnel est construit.
Des analyses de contaminants ont été réalisées lors de la conception de la ventilation du tunnel à l'aide d'outils de simulation 1D.
Dans les pays où la réglementation environnementale prévoit des limites de polluants, celles-ci sont associées aux émissions du parc automobile.
L'AIPCR 2012 fixe les valeurs limites recommandées pour le NO2 à 1 ppm maximum [2].
L'AIPCR 2019 ne fixe pas de valeurs limites pour le NO2, à l'exception des valeurs fixées dans les réglementations de certains pays (par exemple, France 0,4 ppm, Australie 0,5 ppm) [12].
Dans les pays où il n'existe pas de réglementation environnementale relative aux limites de concentration, des valeurs provenant d'autres régions ou des recommandations de l'AIPCR sont parfois convenues avec l'autorité environnementale.
Dans ces géographies où l'âge des véhicules et la proportion de types de véhicules et de carburants ne sont pas connus, on observe que l'utilisation de valeurs inférieures à 1 ppm implique un "surdimensionnement" des installations de ventilation, notamment avec les véhicules pré-Euro 3.
Cette étude analyse la conception des systèmes de ventilation dans les tunnels routiers internationaux en fonctionnement normal et encombré (ou trafic anormal). Le fonctionnement du système de ventilation du tunnel se fait avec un débit d'air variable en fonction du trafic.
L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de ces valeurs seuils sur les coûts d'investissement (CAPEX) et d'exploitation (OPEX).

1. INTRODUCCION

En las ciudades una gran parte del consumo energético se realiza en el transporte, siendo los derivados del petróleo la principal fuente de energía, por tanto, siendo uno de los responsables del cambio climático.

En las carreteras se produce el 70% de la contaminación atmosférica del transporte, con el impacto directo al medio ambiente y a la salud. [13]

En los últimos 10 años, con el continuo desarrollo de las tecnologías de transporte y la producción de vehículos de diferentes fuentes de energía se observa una tendencia al uso de vehículos de cero (ZEV) y bajas emisiones (LEV).

La UE busca para el año 2050 alcanzar las "cero emisiones" (netas), centrando su objetivo en las ciudades mediante el uso de transporte de bajas emisiones, el uso de energías renovables y optimizando la eficiencia operativa y la planificación urbana.

En el campo de la ventilación de túneles se puede colaborar en el diseño de estos sistemas, buscando la optimización del sistema de ventilación y de su operación.

El sistema de ventilación de túneles se diseña con dos objetivos, por un lado, conseguir que la calidad de aire, a lo largo del túnel, se ajuste a los límites establecidos por la normativa aplicable durante la vida útil del túnel, así como, el control del humo en las rutas de evacuación para garantizar una evacuación segura del túnel y permitir la intervención de los equipos de emergencia en los casos de eventualidad con incendio.

En este documento se incluye el estudio de un túnel singular por su configuración de tipo "giratory", en el que el movimiento del tráfico discurre a lo largo de un túnel unidireccional de más de 2 km, en forma de "feedback loop", circunvalación que dispone de diferentes accesos y salidas que conectan las principales vías de comunicación con la ciudad.

El estudio del diseño del sistema de ventilación permite valorar el impacto ambiental que tiene el tráfico en el túnel con la solución adoptada. Los resultados obtenidos indican que el impacto ambiental es aceptable.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El diseño de las instalaciones de protección contra incendios de los túneles (tales como detección y alarma de incendios, sistemas automáticos de rociadores de diluvio a base de agua, iluminación de emergencia, señalización, circuito cerrado de televisión, entre otros) está basado en los escenarios de emergencia, dado la elevada carga de fuego que suele considerarse en los túneles. En el túnel de estudio está permitido el paso de vehículos con altas cargas de fuego (camiones cisterna con combustible, camiones de basura y containers).

En caso de un incidente de incendio dentro de los túneles de carretera, el sistema de ventilación de emergencia se diseñará para extraer el humo y garantizar un entorno sostenible a lo largo de las rutas de salida de acuerdo con el plan de salida de emergencia previsto. El sistema de ventilación de emergencia también debe garantizar un entorno sostenible para la intervención del cuerpo de bomberos.

Además, el sistema de ventilación de emergencia también debe estar diseñado para garantizar que las escaleras de emergencia estén protegidas frente a la entrada de humo en su interior.

Para minimizar las provisiones de espacio dentro de los túneles de carretera, así como los costos operativos y de capital, se recomienda que el diseño del sistema de ventilación de emergencia también se utilice como el sistema de ventilación normal del túnel de carretera. El sistema normal de ventilación del túnel de

carretera se establece para mantener un nivel aceptable de productos contaminantes, como el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx), etc., durante las operaciones de tráfico normal y congestionado.

Aunque se ha considerado que podrían producirse situaciones de congestión de tráfico en los accesos y salidas del túnel estudiado, se estima que el tráfico fluirá sin problemas a través del túnel la mayoría de los días.

Dado la elevada carga de fuego considerada en caso de emergencia de incendio y la baja probabilidad de congestión, los escenarios de congestión se han estudiado con posterioridad al diseño de la ventilación de emergencia requerida.

Dada la configuración del túnel y las características de la vía y el tráfico, es necesario el uso de ventilación mecánica.

Con el fin de buscar un sistema de ventilación adecuado para el túnel y siendo la circulación de vehículos unidireccional, se propuso la instalación de un sistema de ventilación longitudinal. Este sistema tiene una alta efectividad en escenarios de emergencia, así como una instalación y una implantación más sencilla, por otro lado, permite una reducción en los costes de mantenimiento y operación del sistema de ventilación del túnel.

La solución adoptada para el diseño del sistema de ventilación del túnel consiste en la instalación de parejas de jet fans distribuidas a lo largo del túnel y puntos de extracción masiva situados de manera que el túnel quede dividido en varias (5) zonas de ventilación de emergencia.

El principal inconveniente que nos encontramos en el diseño de los sistemas de ventilación longitudinal, son los elevados caudales de aire requeridos y la acumulación de la concentración de contaminantes en los puntos de extracción.

Este estudio supone un reto desde el punto de vista de la operación de congestión dado que el diseño usual busca la dilución de los contaminantes mediante el aporte de aire fresco exterior con pozos de ventilación.

En este túnel se diseñó un sistema de ventilación capaz de conseguir los resultados aceptables para los distintos casos de emergencia; actuando los ventiladores en los pozos en modo extracción.

Para el diseño del sistema de ventilación en operación normal se propusieron tres alternativas: La reversibilidad de los ventiladores axiales para que los pozos puedan actuar en impulsión o extracción, la instalación de un sistema de impulsión paralelo a la extracción, y por último, la regulación del sistema de ventilación de emergencia (usando los pozos de extracción), suministrando el aire fresco para la dilución de los contaminantes, por compensación, a través de las entradas y salidas del túnel.

Con el objetivo de minimizar las provisiones de espacio dentro de los túneles de carretera, así como los costes capitales y operativos, el diseño del sistema de ventilación de emergencia también se encargará de la operación normal del túnel.

El sistema de ventilación ha sido revisado para adaptarse a la operación normal/ambiental.

En túneles con ventilación longitudinal, la máxima concentración de contaminantes aparece en las zonas de salida de los contaminantes, en nuestro caso en los pozos de extracción, donde estos son expulsados a una altura elevada, a diferencia de los sistemas clásicos que se extraen directamente al exterior por las salidas del túnel.

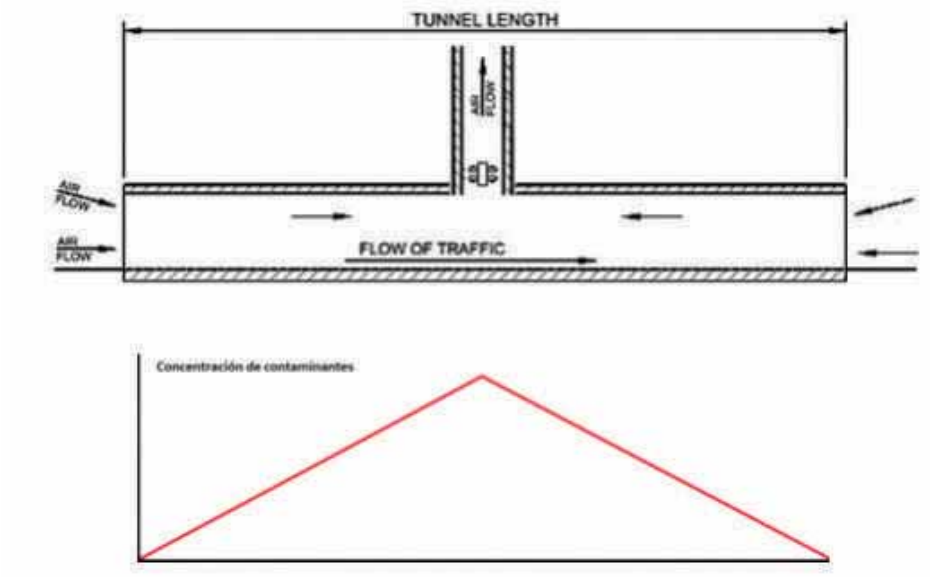


Fig. 1. Proporción de vehículos según tipo [11]

2.1. Simulaciones

Se ha analizado el sistema de ventilación del túnel mediante simulaciones 1D usando el software "IDA tunnel" para distintos escenarios de congestión del túnel y se evalúa el impacto de las concentraciones de NOx en el diseño del sistema de ventilación propuesto.

Este estudio desarrolla un diseño detallado para los sistemas de ventilación del túnel, el cual fue elaborado sobre la base de diferentes diseños a los efectos de la validación de la estrategia de ventilación normal del túnel.

Mediante cálculos y simulaciones 1D se han analizado considerando la geometría del túnel, las condiciones de tráfico, las condiciones ambientales y de sostenibilidad, así como distintas operaciones de los equipos del sistema de ventilación.

2.2. Sistema de ventilación

El sistema de ventilación del túnel se diseñó en base a la alineación de la carretera. Los esquemas de ventilación del túnel incluyen la disposición de los (5) pozos de ventilación, los espacios necesarios para las salas de ventilación y la distribución de las (45) parejas de jet fans.

Los requisitos de capacidad de ventilación de emergencia se han verificado cuidadosamente con análisis de simulación por computadora, como el software de túnel IDA y las herramientas CFD.

La tasa de flujo de aire requerida durante la operación congestionada se calculó en base a PIARC 2019 "Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation", y posteriormente se optimizó la capacidad y la operación del sistema mediante simulaciones 1D.

En este estudio se presentan los resultados obtenidos durante estas simulaciones.

En el modelo de simulación se considera que el sistema de ventilación se activa cuando las condiciones de tráfico o los niveles de concentración de contaminantes en una zona del túnel así lo requiere. El modelo de ventilación incluye zonas con puntos de extracción, apoyados por parejas de jet fans en la dilución de contaminantes con el aporte de aire fresco desde los accesos situados aguas arriba de la zona.

El control de la ventilación para un sistema con puntos de descarga múltiples es complejo, ya que necesita un ajuste de los caudales de los ventiladores en función del escenario.

El sistema de control de la ventilación para la gestión de la calidad del aire y su optimización están fuera del alcance de este estudio.

2.3. Descripción

Este estudio se ha realizado para un túnel singular de tipo circunvalación (gyratory) unidireccional de 2,1 km de longitud.

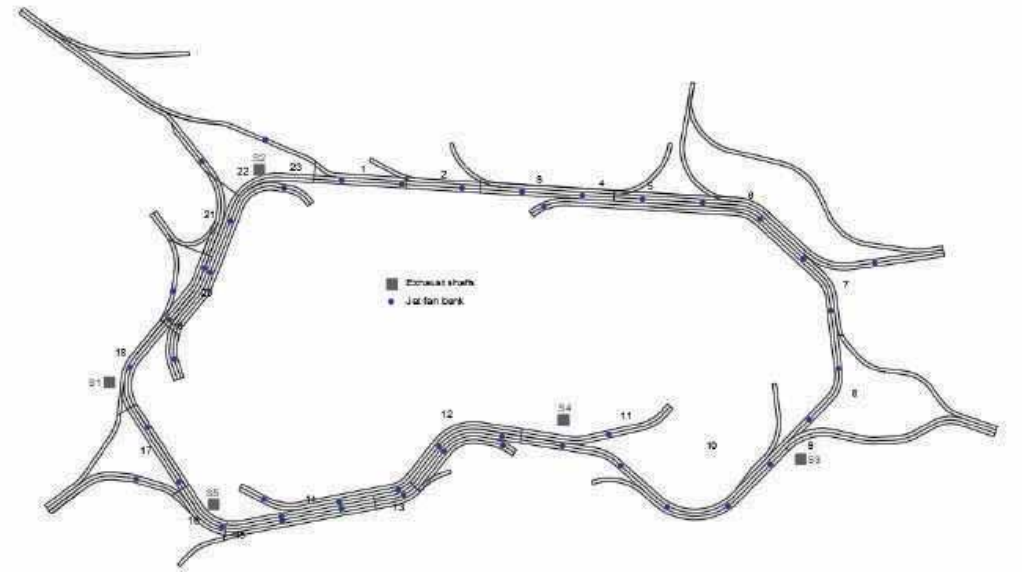


Fig. 2. Geometría del túnel de estudio. Vista en planta. Elaboración propia.

Se espera un tráfico de hasta 4.800 vehículos por hora, donde hasta el 10 % de la generación total de viajes se asociará con vehículos pesados HGV (heavy goods vehicle).

En este túnel urbano se permite el acceso ilimitado de vehículos con mercancías peligrosas (HAZMAT), siendo una vía principal donde se generará la mayor parte del tráfico potencial.

Los HGV impulsarán la clasificación de peligro y, en última instancia, la HRR máxima del incendio y las tasas de crecimiento del incendio en el peor escenario de incendio a considerar.

El túnel de carretera giratorio se clasifica como túnel de carretera de categoría D, de acuerdo con NFPA 502, cláusula 7.2.2.

El tráfico en este anillo es exclusivamente unidireccional y fluye en sentido antihorario. El humo se extrae hacia cinco puntos de extracción ubicados alrededor del túnel.

2.4. Tráfico

El estudio de tráfico se realizó únicamente para la hora pico PM Peak (7 a 9 pm), por lo que se establece un tráfico de flujo libre a una velocidad promedio de 40 km/h para una operación normal.

El volumen de tráfico (veh/h) se ingresa en el modelo ambiental del túnel que se realiza con el software IDA.

Se ha calculado la composición del tráfico para el cálculo de las Unidades de Automóviles de Pasajeros (PCU), donde se ha considerado una relación PCU:HGV de 2:1, con la proporción de vehículos en el túnel indicada en la siguiente tabla (Tabla 1):

Tabla 1. Proporción de vehículos según tipo. Input

Passenger Cars (PC)	Light Duty Vehicles (LDV)	Heavy Goods Vehicles (HGV)
73%	10%	17%

Se ha estimado el volumen de tráfico de vehículos a PCU para PM Peak.

Para el modelado de control ambiental se ha considerado un perfil de volumen de tráfico de 24 h. para el túnel giratorio y las diferentes rampas de entrada/salida, con el fin de examinar cómo fluctúa la concertación de contaminantes.

El volumen de tráfico se ha ajustado usando el valor conocido en el pico de la tarde (se ha asumido que el pico de la mañana es igual al pico de la tarde).

2.5. Aire ambiente

La concertación de contaminantes (CO, NO2, PM10) en el ambiente se ingresa en el cálculo del control ambiental.

Las concentraciones de contaminantes ambientales se establecerán en los valores promedio según la entrada de 2018 y 2019 que se proporciona en la tabla a continuación (Tabla 2).

Tabla 2. Concentración ambiental. Input

CO µg/m3	O3 µg/m3	PM10 µg/m3	NO2 µg/m3	SO2 µg/m3	
2800	45	157	50	12	2018
2124	39	178	47	9	2019

2.6. Emisiones de vehiculos

Para las emisiones de vehículos se utiliza como base para tecnología clase C según PIARC 2019, se adopta EURO 2. Dado que el año de apertura del túnel será 2023, las tasas de emisión se calcularon en base a PIARC 2012, por lo que la generación de emisiones asociadas y los factores de correlación se clasifican en tecnología B.

Por la distribución de combustibles y la antigüedad de la flota de los vehículos, se utiliza la composición de la flota que figura en la Tabla 5 de PIARC 2012.

Tabla 3. Fleet composition factor [1]

FLEET COMPOSITION USED FOR BASE CASE EMISSION FACTOR CALCULATIONS FOR TECHNOLOGY STADARD A		
Type	Year	EU 2
PC Gasoline	2010	12,40%
PC Diesel		8,11%
LDV Gasoline		14,31%
LDV Diesel		8,26%
HGV Diesel		16,08%

Se adoptó la siguiente proporción de vehículos Diesel [1]:

- Turismos (Passenger cars): Gasolina 40% - Diesel 60%
- Vehículos Ligero (Light duty vehicles) - Gasolina 4% - Diésel 96%.
- Vehículos pesados (Heavy Goods vehicles and buses) - Diesel 100%

Se incluyen factores de degradación por edad para todos los vehículos de gasolina de acuerdo con la tabla 78 de PIARC 2012.

Tabla 4. Degradation factor [1]

DEGRADATION FACTOR PC AND LDV GASOLINE				
Euro2	Years after implementation of the standard in the country			
Emission standard	1	5	10	>=15
CO	1	1.4	1.8	2.2
NOx	1	1.5	1.9	2.0

Se excluyen los factores de arranque en frío ya que la gran mayoría de los vehículos habrán recorrido cierta distancia para acceder al túnel, por lo que los motores estarán a su temperatura normal de funcionamiento.

El túnel de este estudio está situado cerca del nivel del mar, por lo que no se requieren factores de altitud.

Se asume una masa media de 15t para autobuses y autocares, lo que supone el 20% de los Vehículos Pesados.

Las tablas de PIARC dan tasas de generación de NOx en función de la velocidad del vehículo y la pendiente de la carretera. Dado que el NO2 es el contaminante de diseño dominante, se necesita la fracción de NO2: NOx para calcular la proporción de NO2.

La recomendación de PIARC 2019 es aplicar valores individuales de relación NO2: NOx para los diferentes tipos de vehículos (PC gasolina, PC diésel, etc.).

PIARC 2012 no proporciona orientación sobre la relación NO2: NOx que se aplicará en los factores de emisión base Euro.

Se utiliza la siguiente tabla para estimar las relaciones NO2:NOx y, por lo tanto, calcular las emisiones de NO2 (fuente: Política de calidad del aire en túneles -dióxido de nitrógeno-, Comité Asesor sobre Calidad del Aire en Túneles (NSW, Australia), febrero 2016).

Tabla 5. Relación NO2:NOx [12]

Emission standard	PC		LDV		HGV
	Gasoline	Diesel	Gasoline	Diesel	Diesel
Pre Euro	0.07	0.15	0.07	0.15	0.11
Euro 1	0.06	0.13	0.06	0.13	0.11
Euro 2	0.05	0.13	0.05	0.13	n/a
Euro 3	0.04	0.51	0.04	0.51	0.14
Euro 4	0.03	0.42	0.03	0.42	0.10
Euro 5	0.03	0.33	0.03	0.33	0.17
Euro 6	0.03	0.30	0.03	0.30	0.08

2.7. Modelo 1D

Las siguientes figuras muestran el modelo utilizado, consistente en una red de segmentos simplificada de la tunnel network. Estos segmentos están unidos por los nodos donde concurren distintos tramos de túnel.

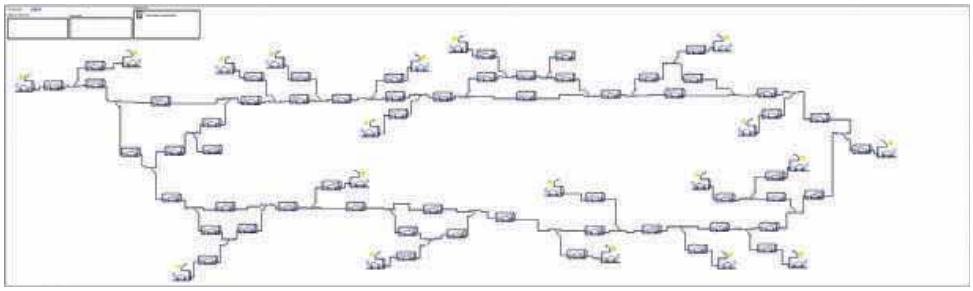


Fig. 3. Modelo IDA tunnel

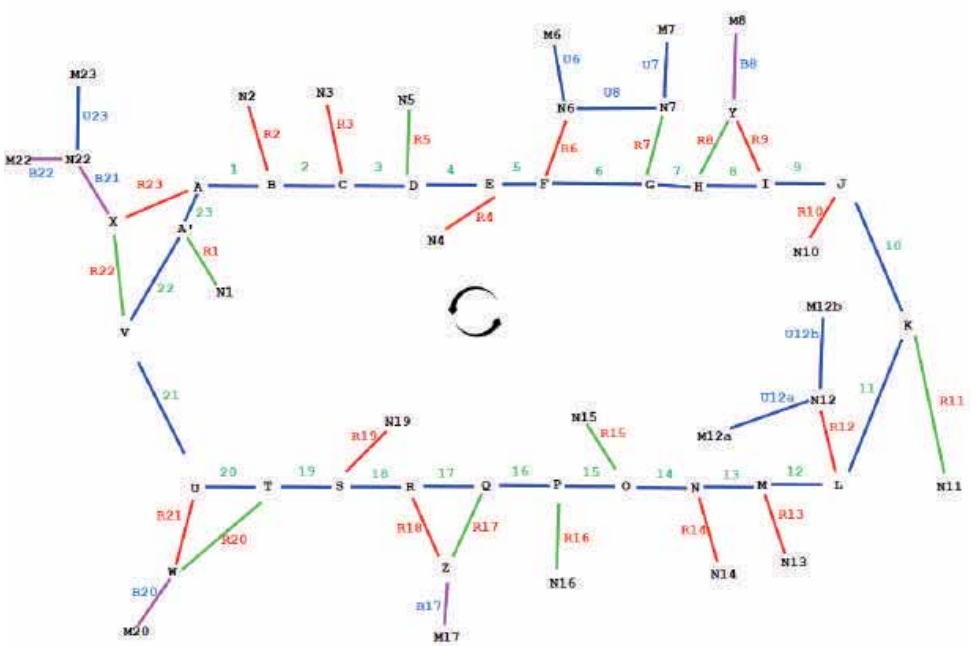


Fig. 4. Esquema de ventilación

2.8. Factores de resistencia en el modelo

El modelado realizado en IDA es un modelo de red 1-D. Por lo tanto, el modelo solo puede capturar efectos 1-D en los túneles, pozos y cámaras. Las resistencias del modelo pueden capturar un ángulo de 90 grados que represente un flujo convergente o divergente mediante un coeficiente de pérdida aplicado (factor k) integrado y validado en el modelo. Hay funciones integradas en el modelo, como bifurcaciones, túneles de dos orificios que se fusionan como uno solo, flujo de un túnel a una gran cámara, amortiguadores, etc. Estas son funciones disponibles directamente a través de IDA. Los parámetros de entrada (factores k) para estos han sido bien validados para su uso en el modelado.

2.9. Escenarios de funcionamiento del sistema de ventilación

Se ha estudiado la operación normal y la congestión del túnel. La operación de emergencia está fuera del alcance de este estudio.

2.10. Criterios de diseño - Entorno del túnel

Los criterios de diseño se basan en PIARC 2019 "Emisiones de vehículos y demanda de aire para ventilación".

La siguiente tabla describe los criterios de diseño para las distintas operaciones en función de la situación de tráfico en el túnel.

Tabla 6. Criterios de diseño para distintas operaciones en función de la situación de tráfico. [1]

Traffic situation	CO	Visibility/Extinction
	ppm	10^{-3} m^{-1}
Free flowing peak traffic 50 –	70	5
Daily congested traffic, stopped on all lanes	70	7
Exceptional congested traffic, stopped on all lanes	100	9
Planned maintenance work in a tunnel under traffic	20	3
Threshold values for closing the tunnel	200	12

El NO por sí mismo no se considera un contaminante dañino en los niveles comúnmente encontrados. Por otro lado, pequeñas concentraciones de NO2 irritan los pulmones y producen infecciones respiratorias como la influenza. El Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional de EE. UU. (NIOSH) propone un valor de 1 ppm como límite a un corto plazo de 15 minutos.

PIARC 2019 no adopta un valor umbral de NO2, sino que proporciona ejemplos de regulaciones internacionales, como que Francia introdujo un valor umbral de 0,4 ppm sobre la longitud del túnel, mientras que Australia 0,5 ppm como promedio de la ruta del túnel.

PIARC 2012 propuso un valor umbral de 1 ppm como una cifra promedio sobre el encadenamiento del túnel.

Para este análisis, se utilizó un valor umbral de 1 ppm para NO2.

3. RESULTADOS

3.1. Operación normal

La operación se considera "normal" cuando los vehículos circulan por el túnel según lo previsto.

En operaciones normales, se requiere ventilación para asegurar que las emisiones creadas por el tráfico no conduzcan a niveles inaceptables de concentración de contaminantes dentro de los túneles.

Para túneles unidireccionales, el efecto pistón generado por los vehículos en movimiento suele ser adecuado para el control ambiental en condiciones normales de tráfico.

Las simulaciones de control ambiental se han realizado con el software IDA. En el Apéndice B se pueden encontrar los gráficos de CO, NO2 y Visibilidad para el tráfico pico de PM y el tráfico diario; los resultados selectivos se presentan en esta sección.

El cumplimiento de todos los criterios de rendimiento de contaminación en el interior del túnel puede lograrse únicamente mediante ventilación natural sin utilizar el sistema de ventilación.

La emisión de NO2 es la contaminación inducida por vehículos dominante para el diseño de sistemas de ventilación (PIARC 2000). Como puede verse en la Figura 5, la concentración de contaminantes promedio ponderada por longitud se mantiene por debajo del límite de diseño de 1 ppm.

Lo mismo se aplica a los máximos de un solo punto, que se obtienen aguas arriba de la carretera MC80. Como era de esperar, en esta ubicación, la velocidad de aire más baja del túnel se obtiene alrededor de 2,5 m/s (consulte la Figura 6). Como puede verse, el efecto pistón del tráfico de flujo libre a 40 km/h genera velocidades de aire en un rango de 3,5 a 7 m/s.

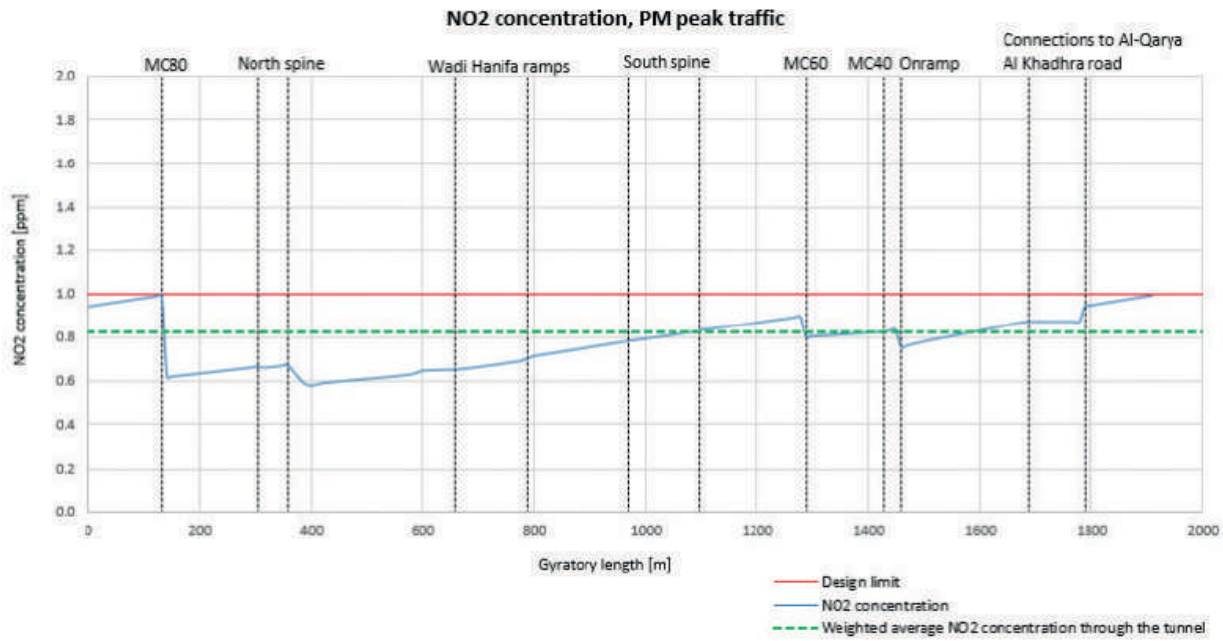


Fig. 5. Concentración de NO2 en el túnel con tráfico durante hora pico

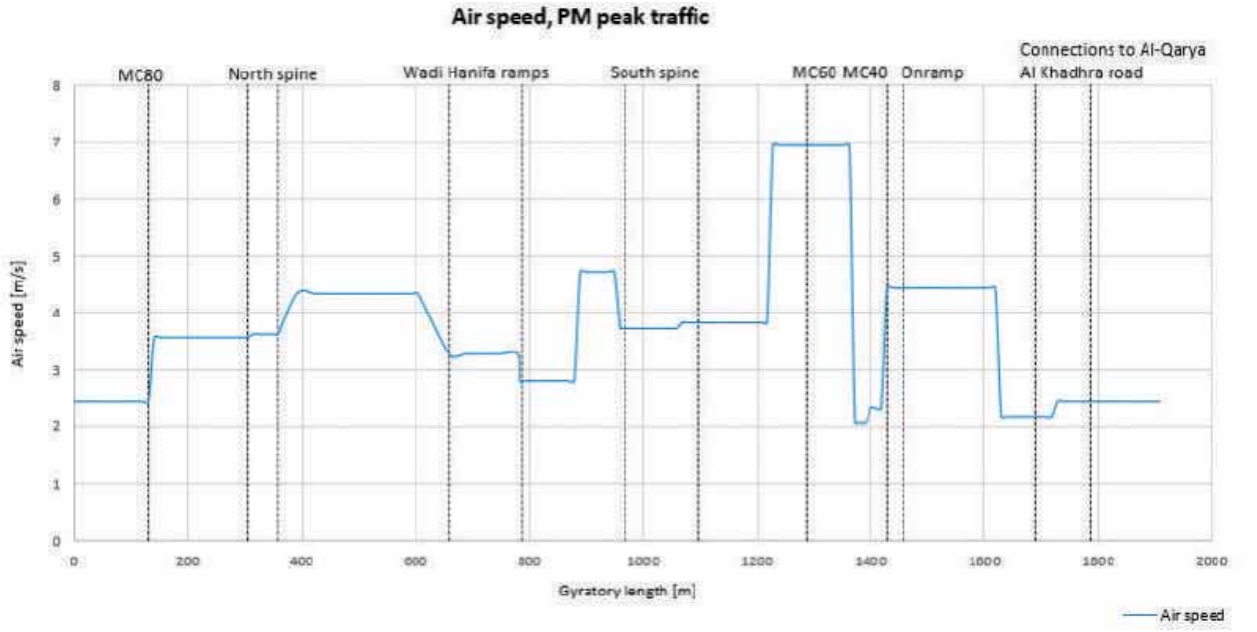


Fig. 6. Velocidad del aire en el túnel con tráfico durante hora pico

Los perfiles de contaminación diaria de CO, NO2 y Visibilidad son menos onerosos que los correspondientes al tráfico pico de PM. Como se puede observar en la Figura 12 a las 3 am. se obtiene un pico en la concertación de contaminantes. Esto se debe a que el tráfico está configurado para disminuir notablemente y, por lo tanto, el flujo de aire generado por los vehículos en movimiento disminuye de manera similar.

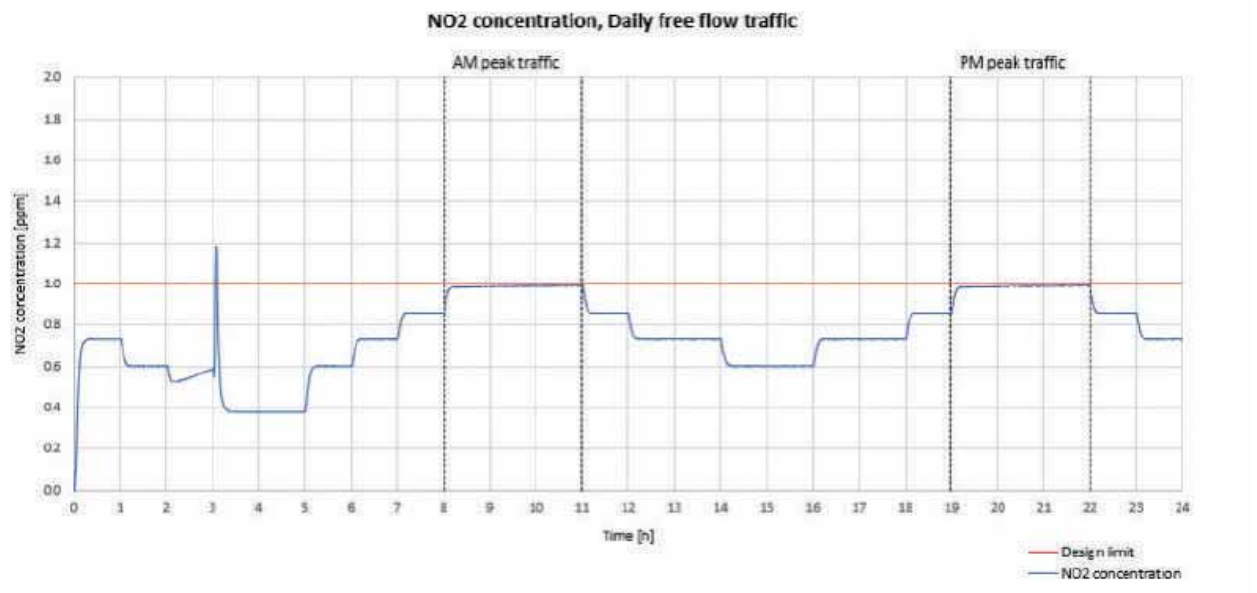


Fig. 7. Concentración de NO2 de tráfico 24H

3.2. Operación congestionada

Se ha simulado el Giratorio completo congestionado considerando todo el sistema de ventilación mecánica desconectado. Los resultados de NO2 se representan en el siguiente gráfico, Figura 8.

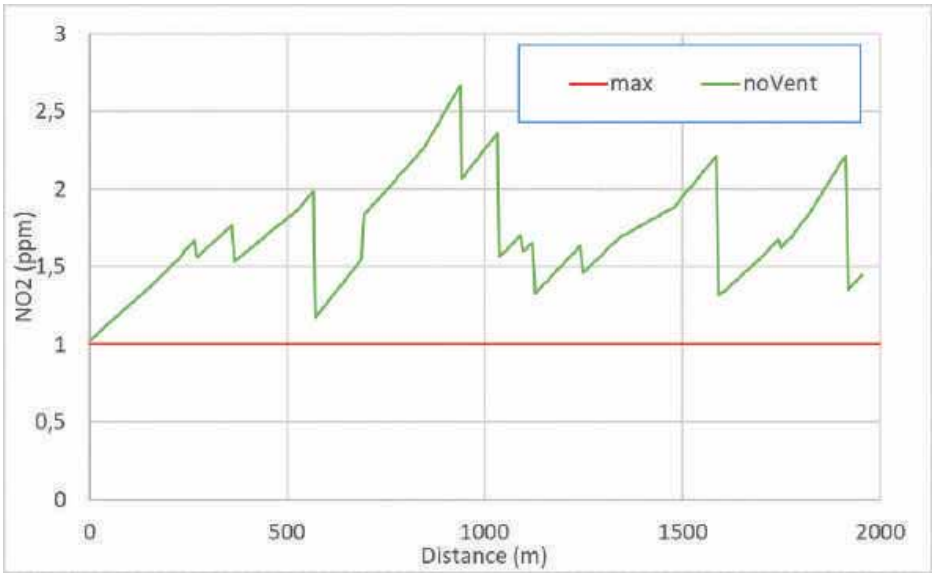


Fig. 8. Niveles de NO2 giratorios sin ventilación mecánica

Como se puede observar, la contaminación dentro del túnel está por encima del límite de 1 ppm en cualquier punto del túnel. Por lo tanto, se requiere ventilación mecánica durante un escenario de tráfico congestionado en el túnel giratorio, para diluir el contaminante y dirigir el aire contaminado del túnel hacia los puntos de escape.

Para reducir los niveles de contaminación en el interior del túnel se ha propuesto diferentes escenarios en función de los posibles orígenes del aire fresco y los puntos de extracción del aire contaminado.

Para estos escenarios se ha optimizado el sistema de ventilación necesario para conseguir que las concentraciones de NOx no superen el valor umbral considerado de 1 ppm.

En este estudio existen limitaciones desde el punto de vista de la explotación del túnel y en concreto en el consumo eléctrico de los equipos, dado que el sistema de ventilación está alimentado por distintas subestaciones eléctricas en las distintas zonas del túnel, y por tanto, existe un límite de la potencia de consumo de los ventiladores de chorro y los ventiladores axiales.

Las siguientes figuras muestran los resultados de los diferentes casos realizados.

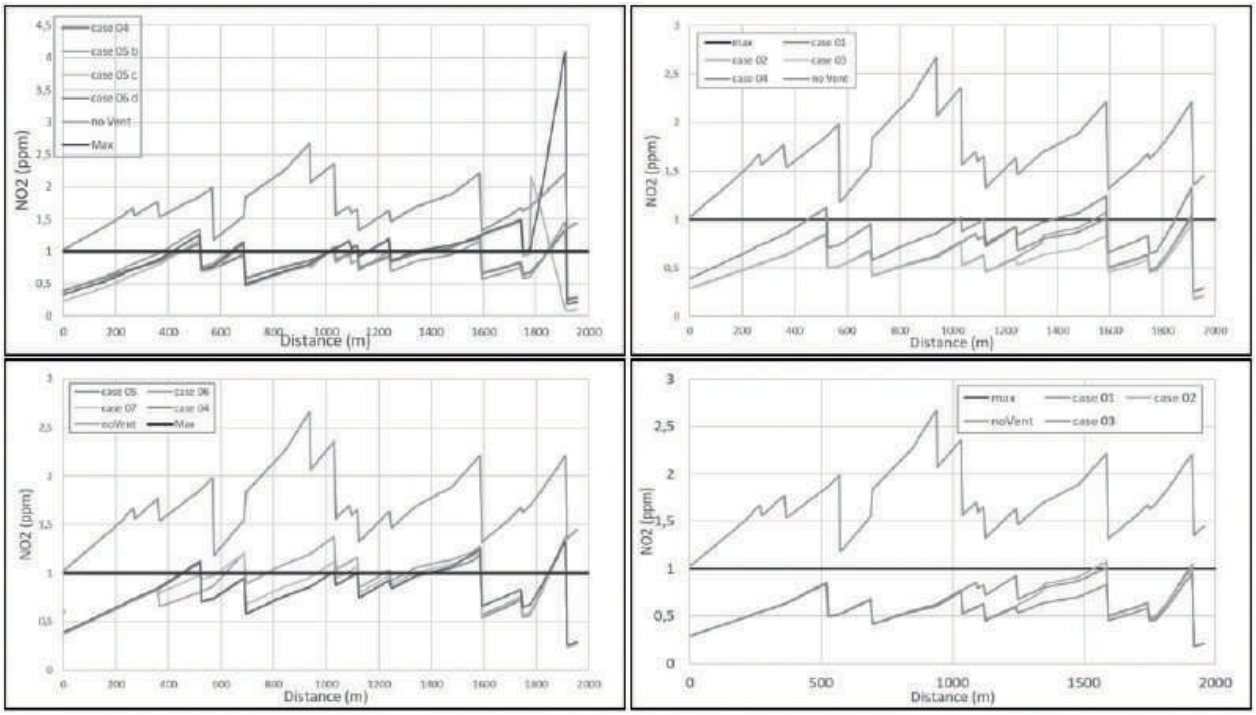


Fig. 9. Concentración de NO2 obtenidos mediante simulaciones 1D

La figura 10 muestra los tres mejores resultados en los que se cumplen con los requisitos de contaminación.

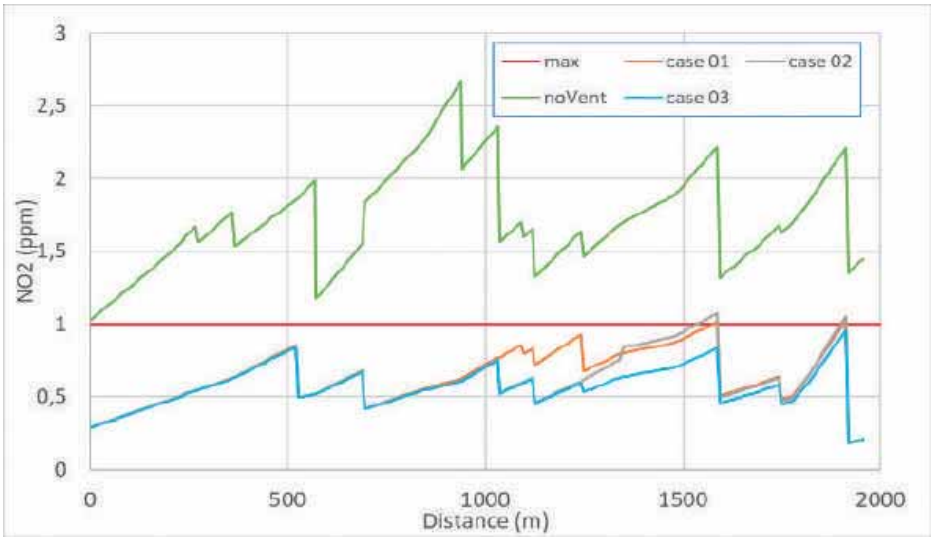


Fig. 10 Concentración de NO2 obtenidos mediante simulaciones 1D. Escenarios a analizar

Los resultados muestran para el caso 01 que los niveles de contaminación se redujeron para toda la longitud del túnel, teniendo dos picos alrededor de 1 ppm de NO2. Sin embargo, estos dos picos no son relevantes y son aceptables debido al área limitada y al pequeño valor que excede el límite.

El caso 02 logró mejores resultados desde el PK 1+000 hasta el PK 1+250, pero niveles de NO2 ligeramente peores desde ese punto hasta el PK 1+600. Este caso hizo uso de un jet-fan adicional en comparación con el caso 01 y toda la sala de ventiladores 4.

Solo en el caso 03, es cuando todo el túnel está por debajo de los límites de contaminación. Se requieren dos ventiladores a chorro adicionales para lograr finalmente los resultados deseados.

Análisis consumo eléctrico

Este estudio debe analizar los escenarios de ventilación presentados desde el punto de vista eléctrico.

Los 3 escenarios presentados, se han comparado con la situación más desfavorable considerada para la emergencia en caso de incendio, donde la demanda total de ventilación de potencia fue:

- 6 ventiladores axiales (500 kW): 3000kW
- 12 Jet fans (75 KW): 900kW
- Carga de ventilación total escenario crítico de incendio: 3900kW

El túnel dispone de 4 subestaciones que se conectan a los lazos según un esquema de línea única MT 132/13.8kV.

De acuerdo con estas consideraciones, la demanda de carga de ventilación para cada escenario es la siguiente:

- Caso 1:
  - 1 ventilador axial: 500kW
  - 36 ventiladores a chorro: 2700kW
  - Carga total de ventilación: 3200kW
- Caso 2:
  - 2 ventiladores axiales: 1000kW
  - 38 ventiladores a chorro: 2850kW
  - Carga total de ventilación: 3850kW
- Caso 3:
  - 2 ventiladores axiales: 1000kW
  - 40 ventiladores a chorro: 3000kW
  - Carga total de ventilación: 4000kW

Tabla 7. Resumen de Carga de Demanda por Subestación - Ventilación de Túnel

	FIRE	CONGESTION STUDY 1	CONGESTION STUDY 2	CONGESTION STUDY 3
TOTAL kW	3900	3200	3850	4000
SUB G1 kW	675	900	1050	1050
SUB G2 kW	0	600	600	600
SUB G3 kW	1500	650	1150	1300
SUB G4 kW	1725	1050	1050	1050
Axial fan total	**6**	**1**	**2**	**2**
Jet Fans total	12	36	38	40

Se han obtenido las siguientes conclusiones desde el punto de vista eléctrico:

- En todos los casos, no se supera la potencia máxima disponible en cada subestación (3150kVA).
- Caso 1: no produce aumento de potencia en los bucles de MT. En este caso el escenario más restrictivo seguiría siendo el escenario más desfavorable de incendio considerado hasta ahora.
- Caso 2: resulta un aumento de potencia en el bucle MT de 456kVA y pasaría a ser un escenario más restrictivo.
- Caso 3: resulta un aumento de potencia en el bucle MT de 590kVA y pasaría a ser el escenario más restrictivo.

4. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Las simulaciones de control ambiental han documentado que para el tráfico de flujo libre con una velocidad vehicular promedio de 40 km/h, los criterios de diseño se cumplen únicamente mediante la ventilación natural inducida por el tráfico en movimiento.

En ausencia de un estudio de tráfico que defina las condiciones de operación de un evento de congestión, no se puede acceder al desempeño de la ventilación del túnel.

Para una operación de tráfico anormal en la que se obtienen velocidades de vehículos más bajas (por ejemplo, como resultado de un incidente), es posible que sea necesario activar el sistema de ventilación del túnel.

Es probable que se produzca un escenario de operación de tráfico anómalo, ya que aún no se han definido los procedimientos de gestión que restringen la entrada de vehículos al túnel de carretera.

Se ha demostrado que es necesario proporcionar una solución de ventilación mecánica durante un escenario de tráfico anómalo en el túnel giratorio.

De entre todas las simulaciones y estudios de sensibilidad del sistema de ventilación del túnel que se han realizado, se han seleccionado tres de ellas como las soluciones óptimas de ventilación.

El escenario de ventilación propuesto del Caso 01 otorga un nivel de NO2 por debajo del límite requerido de 1 ppm, y además no afecta ni a la potencia total disponible en cada subestación ni a la potencia disponible en los lazos de MT.

Los Caso 02 y Caso 03, otorgan un nivel de NO2 por debajo del límite solicitado de 1 ppm, lo que afecta a la potencia total disponible en cada subestación, y además a la potencia disponible en los lazos de MT.

Los tres escenarios de ventilación mecánica analizados cumplen los requisitos de contaminantes. Para el caso 1, no resulta en un aumento de potencia en los bucles de MT, por lo que esta solución es la operación de ventilación congestionada recomendada para giratorios.

5. REFERENCIAS

[1] Sturm, P-J., Brandt, R., Hervé, F., Zumsteg, F., Borchiellini, R., Norris, H., Dix, A., & Henn, M. (2012). Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation. (1 ed.) World Road Association. http://www.piarc.org/

[2] T.Y. Chen, Y.T. Lee, C.C. Hsu, Investigations of piston-effect and jet fan-effect in model vehicle tunnels, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 73, Issue 2, Pages 99-110, 1998. https://doi.org/10.1016/S0167-6105(97)00281-X

[3] Chung, CY., Chung, PL. A Numerical and Experimental Study of Pollutant Dispersion in a Traffic Tunnel. Environ Mon. Assess 130, 289–299 (2007). https://doi.org/10.1007/s10661-006-9397-0

[4] Zhang, Kai, and Stuart Batterman. "Air pollution and health risks due to vehicle traffic." The Science of the total environment vol. 450-451 (2013): 307-16. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.01.074

[5] Bari, S., & Naser, J. (2010). "Simulation of airflow and pollution levels caused by severe traffic jam in a road tunnel". Tunnelling and Underground Space Technology, 25(1), 70–77. https://doi.org/10.1016/J.TUST.2009.09.004

[6] WHO Regional Publications (2000). "Air quality guidelines for Europe", Second edition, European Series, No. 91, 2000, x + 273 pages ISBN 92 890 1358 3. https://www.euro.who.int/en/publications/abstracts/air-quality-guidelines-for-europe

[7] Technical committee of road tunnels. "Pollution by Nitrogen Dioxide in Road Tunnels". Reference 05.09.B, PIARC 2000.

[8] The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NITROGEN DIOXIDE. https://www.cdc.gov/niosh/pel88/10102-44.html

[9] Centre d'Études des Tunnels (Centre for Tunnel Studies). INFORMATION MEMO No. 26. November 2017. Measuring nitrogen dioxide and controlling ventilation in road tunnels. https://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/cetu_ni26_measuring- NO2__ang.pdf

[10] Advisory Committee on Tunnel Air Quality. IN-TUNNEL AIR QUALITY (NITROGEN DIOXIDE) POLICY. Feb 2016.

[11] A. Berhanu, "CFD analysis of a railway tunnel ventilation", 2016

[12] Advisory Committee on Tunnel Air Quality. TP07: Criteria for In-tunnel and Ambient Air Quality. November 2018

[13] Agencia europea del medioambiente. https://www.eea.europa.eu/es

PRUEBAS DE EFICIENCIA PARA LA VENTILACIÓN E ILUMINACIÓN EN TÚNELES DE CARRETERAS

David Zamora Martínez
CEO Tecasem

El objetivo es establecer, analizar y proponer procedimientos que, relacionando ambos subsistemas de gestión, de una parte, fijen en su justa medida la importancia de los elementos de ventilación e iluminación para la gestión de las emergencias, y no sólo en el caso de incendios que también, cuando por circunstancias sobrevenidas, los factores medioambientales y la visibilidad se ven comprometidos.

La utilización de nuevos combustibles y sistemas de propulsión introducen requerimientos nuevos a los sistemas de ventilación, sistemas encargados casi en exclusiva de mantener la calidad de los factores medioambientales en el interior de los túneles, y las nuevas tecnologías y diseños en los sistemas de iluminación, permiten dar respuesta al cumplimiento de la exigente normativa que, en ambos casos, en ocasiones o no se cumplen en su integridad, o son manifiestamente mejorables.

Fruto de la experiencia en estos campos, se aportará la mejor práctica contrastada en la ejecución de ejercicios y simulacros, con la utilización de humo inocuo que simule el escenario de un incendio que determine la pérdida total de visión, y la mejora de los sistemas de iluminación y guiado que garanticen la intervención de los equipos de seguridad, y especialmente la evacuación segura.

Damos valor a la utilización de criterios de calidad en estos procesos, que garanticen el mejor resultado, y expondremos estos criterios.

Finalmente proponemos ejercicios prácticos de bajo coste, para la verificación de la idoneidad tanto de las pruebas de ventilación, como los de iluminación.

EFFICIENCY TESTS FOR VENTILATION AND LIGHTING IN ROAD TUNNELS

The objective is to establish, analyse and propose procedures that, by linking both management subsystems, on the one hand, establish the importance of ventilation and lighting elements for emergency management, and not only in the case of fires but also when, due to unforeseen circumstances, environmental factors and visibility are compromised.

The use of new fuels and propulsion systems introduce new requirements for ventilation systems, which are almost exclusively responsible for maintaining the quality of the environmental factors inside tunnels, and new technologies and designs in lighting systems make it possible to comply with the demanding regulations which, in both cases, are sometimes either not fully complied with or can be clearly improved.

As a result of the experience in these fields, best practice will be provided in the execution of exercises and drills, with the use of harmless smoke to simulate the scenario of a fire that leads to total loss of vision, and the improvement of lighting and guidance systems to guarantee the intervention of the security teams, and especially safe evacuation.

We value the use of quality criteria in these processes, which guarantee the best result, and we will set out these criteria.

Finally, we propose low-cost practical exercises to verify the suitability of both ventilation and lighting tests.

TESTS D'EFFICACITÉ DE LA VENTILATION ET DE L'ÉCLAIRAGE DANS LES TUNNELS ROUTIERS

L'objectif est d'établir, d'analyser et de proposer des procédures qui, en reliant les deux sous-systèmes de gestion, d'une part, établissent l'importance des éléments de ventilation et d'éclairage pour la gestion des urgences, et ce non seulement en cas d'incendie mais aussi lorsque, en raison de circonstances imprévues, les facteurs environnementaux et la visibilité sont compromis.

L'utilisation de nouveaux carburants et systèmes de propulsion introduit de nouvelles exigences pour les systèmes de ventilation, qui sont presque exclusivement responsables du maintien de la qualité des facteurs environnementaux à l'intérieur des tunnels, et les nouvelles technologies et conceptions des systèmes d'éclairage permettent de respecter les réglementations exigeantes qui, dans les deux cas, ne sont parfois pas entièrement respectées ou peuvent être nettement améliorées.

Grâce à l'expérience acquise dans ces domaines, les meilleures pratiques seront fournies dans l'exécution d'exercices et d'entraînements, avec l'utilisation de fumée inoffensive pour simuler le scénario d'un incendie entraînant une perte totale de la vision, et l'amélioration des systèmes d'éclairage et de guidage pour garantir l'intervention des équipes de sécurité, et surtout une évacuation sûre.

Nous apprécions l'utilisation de critères de qualité dans ces processus, qui garantissent le meilleur résultat, et nous allons définir ces critères.

Enfin, nous proposons des exercices pratiques peu coûteux pour vérifier la pertinence des tests de ventilation et d'éclairage.

INTRODUCCIÓN

Por nuestra actividad empresarial, siempre relacionada con la protección civil en infraestructura en este caso los túneles, seguimos la evolución que siguen los materiales, instalaciones y utilización de subsistemas tan determinantes para la prevención e intervención, en su caso, de incidentes en los que se ven comprometidas las condiciones medioambientales, especialmente en lo que repercute sobre una rápida evacuación de los usuarios, sin olvidar que los procedimientos operativos empleados en la correcta explotación de los sistemas y subsistemas, junto con la formación del personal, su entrenamiento habitual y la resolución de distintos escenarios en la ejecución de los simulacros, constituyen la base esencial para mantener el servicio adecuado, en las mejores condiciones que se determinarán en los Planes de Calidad.

VENTILACIÓN

Es un hecho que la tendencia actual para preservar la integridad de las personas en caso de un siniestro en un túnel, especialmente en los casos en que se produce incendio, es la evacuación ordenada y gestionado desde los centros de control, en la que el liderazgo de los agentes intervinientes adquiere especial relevancia.

La evacuación no se limita a un simple desplazamiento de personas entre dos sitios, sino que es un complejo proceso que empieza con la aparición misma del problema, iniciándose así una inexorable carrera contra el tiempo, cuyo resultado final pretende ser la inexistencia de daños personales. Todo el proceso de la evacuación se desarrolla en distintas etapas, cada una de las cuales requiere de un mayor o menor tiempo para su ejecución, tiempo que en definitiva limita las posibilidades de éxito.

Las acciones operativas en cuanto a las diferentes actuaciones encaminadas a proteger y socorrer la vida de las personas, y dentro de éstas aquellas específicas de utilización de la ventilación.

Como introducción se describen de forma somera la necesidad de la utilización de sistemas de ventilación en túneles, sus condicionantes y de forma general su utilización. Se ha partido como fuente bibliográfica el "Manual de Túneles de Carretera de la Asociación Mundial de la Carretera – PIARC".

No es objeto del presente trabajo analizar en detalle la utilización de la ventilación, ya que además ésta está íntimamente relacionada con cada proyecto, sino mostrar la necesidad de su correcto mantenimiento, pruebas aerodinámicas periódicas y ensayos con humos calientes que permitan no sólo la comprobación empírica del control de humos si no el chequeo del correcto funcionamiento de todos los elementos que constituyen el sistema y su control y monitorización.

El sistema de ventilación del túnel tiene como objeto la selección de la mejor opción para cumplir los siguientes objetivos:

- Dilución de contaminantes en el aire (dentro del túnel);
- Impacto medioambiental (en el exterior);
- Control del humo en caso de incendio.

Para llevar a cabo una evaluación de las necesidades concretas de un túnel que lleven a la selección de un sistema de ventilación adecuado, se deben tener en cuenta tanto el caudal de aire necesario para diluir los contaminantes como otros factores diversos, tales como la longitud del túnel, su ubicación, el tipo de tráfico, las leyes medioambientales; sin olvidar los aspectos relacionados con la protección frente a incendio.

TIPOS DE SISTEMA DE VENTILACIÓN

En los túneles de carretera se pueden encontrar muy diversos tipos de sistemas de ventilación incluyendo, entre otros, los siguientes:

- Ventilación natural, la cual se consigue a través de las corrientes inducidas por la temperatura del aire y las condiciones meteorológicas y/o por el tráfico;
- Ventilación mecánica, que a su vez puede ser:
  - o longitudinal;
  - o extracción masiva o puntual;
  - o Transversal;
  - o Semitransversal (y semitransversal reversible);
  - o pseudotransversal.
  - o (las combinaciones de varios de estos sistemas pueden darse, a veces de forma inevitable)
- filtrado del aire combinado con ventilación mecánica.

Existen numerosos documentos en los que se puede encontrar una descripción de las características de cada uno de estos sistemas e incluso describen tanto los criterios como la metodología para el diseño y dimensionamiento de la ventilación, los cuales se basan en los principios básicos de ventilación, aplicables tanto a situaciones de explotación normal como incendio.

VENTILACIÓN DURANTE EXPLOTACIÓN NORMAL

Las emisiones de CO, partículas y NOx (como mezcla de NO y NO2) son considerados los contaminantes de referencia originados por los vehículos de combustión interna en los túneles de carretera.

La cantidad de aire fresco necesaria ante unas determinadas condiciones de tráfico, depende del número de vehículos presentes en el túnel, las emisiones promedio por vehículo y las concentraciones admisibles para cada contaminante.

La legislación suele establecer los niveles máximos permitidos para aquellos contaminantes que pueden afectar a la salud de las personas. La dosis de contaminante depende del tiempo de viaje necesario para atravesar el túnel. En caso de no disponerse de normativa de referencia, el capítulo 4 "Valores de contaminantes admisibles de proyecto y durante la explotación" del informe AIPCR 2019R02 "Túneles de carretera: emisiones de vehículos y demanda de aire de ventilación" recomienda umbrales admisibles y aplicables durante la explotación normal o en actividades de mantenimiento.

Además, debido a criterios medioambientales, a menudo se exige que la calidad del aire expulsado por las bocas del túnel respete unos determinados umbrales de contaminantes, especialmente NO2. Esto puede conseguirse mediante la gestión de emisiones por las bocas. En algunos casos, los requisitos de calidad del aire en el interior o a través de las bocas puede condicionar la capacidad del sistema de ventilación.

ESCENARIOS DE INCENDIO

La comprensión de los fenómenos que influyen en el comportamiento del humo durante un incendio es crucial para la explotación de un túnel, condicionará el tipo y capacidad del sistema de ventilación a instalar, las actuaciones que se lleven a cabo sobre él durante una emergencia y los procedimientos de intervención que se desarrollarán para la gestión segura por los operadores y servicios de emergencia durante el incidente.

Los diferentes tipos de vehículos que pueden atravesar un túnel (coches, autobuses, camiones, vehículos especiales, etc.) así como las distintas cargas de fuego que portan (personas, materiales combustibles o no combustibles, sustancias explosivas, productos tóxicos, etc.) pueden originar incendios con gran variabilidad en cuanto a su magnitud y características.

En la mayoría de los casos los incendios son pequeños con escasa producción de humos y energía por lo que sus efectos son relativamente poco dañinos, pero también pueden ocurrir incendios de vehículos cisterna, muy peligrosos, con una norme producción de humo, altas temperaturas y riesgo de explosión. Como resultado, no es posible definir las condiciones de producción de humo y temperatura que pueden darse en cualquier tipo de incendio.

El desarrollo y dispersión a lo largo del túnel por el humo generado por el incendio depende principalmente de los siguientes factores:

- posible reducción del suministro de aire al fuego;
- producción de calor;
- fracción convectiva del calor;
- pendiente longitudinal;
- tipo de ventilación;
- dimensiones del espacio de circulación y posibles obstrucciones;
- empuje generado por los vehículos en movimiento;
- causas meteorológicas (fuerza y dirección del viento).

En general puede decirse que, como resultado de la energía liberada en las proximidades del foco, el humo se eleva hasta incidir en la clave y continuará avanzando, bien en un único sentido si la velocidad es elevada, aunque podría darse cierto retroceso de la capa de humos, en inglés backlayering, o en los dos sentidos cuando la velocidad longitudinal del aire es baja. De esta forma, debería crearse una zona libre de humos en la zona de la calzada en las proximidades del foco, al menos, durante los periodos iniciales del incendio.

La ventilación del túnel es un elemento clave para mitigar las consecuencias de un incendio en un túnel.

PRESURIZACIÓN DE SALIDAS DE EMERGENCIA

Los sistemas de control de presurización permiten evitar la entrada de humo en las salidas de emergencia ubicadas en el trazado los túneles. De este modo se aseguran las condiciones de seguridad para conseguir la evacuación de personas de forma adecuada.

Habitualmente se hace uso de la norma europea "UNE-EN 12101-6 Sistemas para el control de humo y de calor. Parte 6: Especificaciones para los sistemas de diferencial de presión. Equipos." Para el diseño y caracterización de la instalación. El método de control de humo por sobrepresión consiste en la presurización mediante inyección de aire en habitáculos que son utilizados como vías de escape de personas en caso de incendio, tales como cajas de escalera, pasillos, corredores, elevadores, etc. Este método está basado en el control de humo mediante la velocidad del aire y la barrera artificial que crea la sobrepresión. Acorde con la norma europea existen diferentes clases de sistemas de presión diferencial en los edificios según su uso.

- En caso de evacuación de personas, la velocidad del flujo de aire a través de la puerta entre un espacio presurizado y el área de alojamiento no debe ser inferior a 0.75 m/s.
- En caso de intervención de los bomberos, la velocidad del flujo de aire a través de la puerta entre un espacio presurizado y el área de alojamiento no debe ser inferior a 2,00 m/s.

La diferencia de presión a ambos lados de una puerta cerrada entre el espacio presurizado y el área de alojamiento debe tener un valor mínimo de 50 Pa.

Dependiendo de los condicionantes geométricos de sección y longitud de galerías y del propio túnel se dimensionarán las características principales de los equipos a emplear en cada caso.

ILUMINACIÓN

A continuación, se realiza una breve descripción del estado del arte en cuanto a los diferentes sistemas de alumbrado a emplear en túneles haciendo especial énfasis en los sistemas de alumbrado de emergencia para evacuación en el propio túnel.

Los elementos integrantes de la instalación, deben cumplir de forma genérica con:

- Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.
- Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC) BT01 a BT51, aprobado por Real Decreto 842/2002 de 2 de agosto, publicado en el B.O.E. nº 242 de fecha miércoles 18 de septiembre de 2002.
- Normas UNE de obligado cumplimiento.
- CIE-88 Comisión Internacional de Iluminación, Guía para el alumbrado de túneles de carretera y pasos inferiores.

En fase estudio se realiza un análisis de cálculo tanto eléctricos de la instalación como luminotécnicos en las diferentes zonas de la cada infraestructura.

Se da comienzo a estos estudios asegurando la luminancia en la zona de acceso. Siendo esta la cantidad de luz que percibe el conductor que se aproxima a un túnel, cuando mira hacia la boca del mismo a una distancia cercana. A los efectos de realizar el cálculo de la misma, se define como:

"La luminancia media contenida en un campo cónico de visión que subtiende un ángulo de 20º, con el vértice en la posición del ojo del conductor, situado a una distancia anterior al túnel igual a la distancia de parada, y orientado el cono hacia el portal de túnel sobre un punto situado a una altura de 1/4 de la boca del túnel".

Es necesario el cálculo de la distancia de seguridad y la zona umbral

Respecto a la distancia de parada (o de seguridad), esta depende de la velocidad de circulación, la fricción del pavimento, y la pendiente. Dicha distancia se calcula con arreglo a la siguiente fórmula, de acuerdo con la norma CIE88:

$$D_p = u \cdot t_0 + \frac{u^2}{2 \cdot g \cdot (f \pm s)}$$

Dónde: Dp es la distancia de parada; u es la velocidad del vehículo; t0 es el tiempo hasta comenzar el frenado; g es la constante de gravedad; f es el coeficiente de fricción; y s es la pendiente.

La longitud de la zona umbral está directamente relacionada con la distancia de parada, debiendo mantener la luminancia de zona umbral durante una distancia equivalente a la mitad de la distancia de parada, y pudiendo reducir la luminancia a partir de ese punto, de forma lineal, hasta alcanzar el valor del 40% de la luminancia umbral.

El siguiente paso es determinar la luminancia de la zona umbral que viene establecida por la normativa mostrando la relación entre L20 y la luminancia de la zona de umbral Lth.

Sistema de alumbrado Velocidad (km/h)	Simétrico $k = L_{th}/L_{20}$	Contraflujo
≤ 60	0,05	0,04
80	0,06	0,05
120	0,10	0,07

Por último, se deberá calcular la luminancia de la zona interior que como referencia se parte de los siguientes valores:

Distancia de parada	Túneles largos Caudal de tráfico (vehículos/hora/carril)	
	Bajo	Elevado
160 m	6	10
60 m	3	6

Luminancia de la zona interior para túneles largos

Distancia de parada	Túneles muy largos Caudal de tráfi. (vehículos/hora/carril)	
	Bajo	Elevado
160 m	2,5	4,5
60 m	1	2

Luminancia de la zona interior para túneles muy largos

Caudal de tráfico	Tráfico unidireccional	Tráfico bidireccional
Elevado	>1500	>400
Bajo	<500	<100

Clasificación de los túneles con respecto a su caudal de tráfico

$$Caudal\ de\ tráfico = \frac{0{,}1 \cdot IMD}{número\ de\ carriles}$$

Cálculo del caudal de tráfico respecto a la IMD

Acorde con lo expuesto hasta ahora se deberá tener en cuenta los criterios de calidad del alumbrado como,

- Nivel de luminancia en la calzada.
- Nivel de luminancia en las paredes, en particular hasta una altura de 2m.
- Uniformidad de distribución de luminancia en calzada y paredes.
- Limitación del deslumbramiento.
- Control del efecto flicker.

Habitualmente, y dependiendo de la longitud de los túneles, se definen distintos tipos de zonas de alumbrado a lo largo del túnel. Se tiene que en primer lugar se dispondrá de una zona umbral, con los valores de iluminación indicados en el apartado anterior, y posteriormente una zona de transición, que se sitúa a continuación de la zona umbral, y permite la adaptación de la vista del conductor a las condiciones de iluminación del interior del túnel.

La luminancia de la zona de transición deberá disminuir gradualmente según la curva definida por la siguiente expresión:

$$L_{tr} = L_{th} \cdot (1{,}9 + t)^{-1{,}428}$$

Relación entre tiempo transcurrido y reducción de la luminancia en la zona de transición

Tradicionalmente se definían una serie de zonas de alumbrado, aproximando la curva previa mediante escalones. Actualmente, mediante el uso de la tecnología LED y la regulación individual de cada luminaria, es posible aproximar la discretización de dicha curva con unos niveles de precisión mucho mayores, por lo que, en lugar de proponer una serie de escalones, se incluyen las curvas de variación de luminancia para cada uno de los túneles.

Una vez terminada la zona de transición, se llegaría a la zona interior del túnel, que dependiendo de la longitud del túnel puede tener dos niveles (interior e interior de túneles muy largos).

Por último, en el tramo final del túnel, se suele indicar la posibilidad de que en aquellos casos en los que se puedan dar situaciones peligrosas a la salida del túnel, se incluya un refuerzo de salida, que deberá tener una longitud de 20 m antes de la boca de salida, y una transición lineal entre los niveles de interior y el de salida durante una distancia igual a la distancia de seguridad. El nivel de iluminancia en la salida será de 5 veces el de la zona interior.

Se prevén tres regímenes de iluminación:

- Diurno
- Nocturno
- Nocturno reducido

En este caso no se contemplan más posibilidades para la iluminación diurna, ya que, el uso de tecnología LED junto con el sistema de control permitirá adaptar la iluminación en la zona umbral y en la de transición dependiendo de las condiciones exteriores, haciendo innecesario definir los tradicionales niveles de soleado, nublado y crepuscular.

La iluminación del interior de los túneles, así como el alumbrado exterior de los accesos a ellos se controla mediante el sistema de control de alumbrado de los túneles. Se suele hacer uso de un sistema de control con tecnología DALI, compuesto por fuentes de alimentación, módulos de control y cable apantallado y resistente al fuego, para permitir la regulación del flujo de las luminarias para el ahorro de energía. Este sistema de control se integra en el sistema de control general y se establecerán los criterios en función de los cuales se deberán realizar las regulaciones de flujo de los diferentes circuitos. Para ello, se deberán instalar tantos equipos como sean necesarios para el control de cada circuito independientemente del resto. Así en función de las lecturas de los luminancímetros exteriores se establecerán las consignas de regulación.

El Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado establece en su apartado 2.10 de Iluminación los siguientes requisitos:

2.10. Iluminación.

2.10.1 La iluminación normal se proporcionará de modo que asegure a los conductores una visibilidad adecuada de día y de noche en la entrada del túnel, en las zonas de transición y en la parte central.

2.10.2 La iluminación de seguridad se proporcionará de modo que permita una visibilidad mínima para que los usuarios del túnel puedan evacuarlo en sus vehículos en caso de avería del suministro de energía eléctrica.

2.10.3 La iluminación de emergencia, estará a una altura no superior a 1,5 metros y deberá proyectarse de modo que permita guiar a los usuarios del túnel para evacuarlo a pie con un mínimo de 10 lux y 0,2 cd/m2.

Actualmente para asegurar el cumplimiento de las necesidades en cuanto iluminación de emergencia existen tres soluciones:

- Iluminación lineal mediante tiras continuas de LED en hastial.
- Luminarias tipo pantalla estanca ubicadas con muy poca interdistancia entre ellas.
- Luminarias cada 12,5m de interdistancia con distribución asimétrica bilateral de uso regulado en modo explotación y modo máximo en modo emergencia.

Los sistemas anteriormente descritos se ven complementados desde el punto de vista de mejora de la evacuación en caso de emergencia con los sistemas de señalización de emergencia que también implementan inteligencia y tecnología LED.

PRUEBAS PERIÓDICAS A REALIZAR SOBRE LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN Y PRESURIZACIÓN

Los sistemas de ventilación y alumbrado de los túneles se renuevan, modifican y actualizan habitualmente. Durante la puesta en marcha y mantenimiento de los sistemas es preciso realizar un conjunto de ensayos de funcionamiento y operación que permitan comprobar:

- La adecuada capacidad del sistema de ventilación para hacer frente a la potencia de fuego propuesta en el estudio de dimensionamiento, e igualmente la adecuada capacidad de iluminación de los sistemas de alumbrado es caso de baja visibilidad provocada por el humo en caso de incendio.
- El correcto funcionamiento y parametrización de los algoritmos de control del sistema para el caso de incendio, verificando que las estrategias de actuación definidas cumplen los objetivos deseados.
- La correcta operación de los sistemas de presurización de las galerías de emergencia para su funcionamiento en caso de incendio.

Los trabajos que se requieren tienen como objetivo último la validación del sistema de ventilación del túnel y el sistema de sobrepresión de las galerías de evacuación.

Para ello es necesario la ejecución de una serie de trabajos en campo y la explotación posterior de los datos obtenidos.

A continuación, se relacionan los trabajos que quedan incluidos en esta fase.

Se montarán suficientes secciones de medida, cada una de ellas compuesta por una malla de anemómetros. Las secciones de medida se ubicarán en las localizaciones de los anemómetros fijos del túnel.

Los ensayos aerodinámicos y funcionales tienen por objeto la caracterización del túnel y su sistema de ventilación y alumbrado (ventiladores, anemómetros y luxómetros). Las etapas que incluyen son:

- Determinación de las curvas características del sistema de ventilación y coeficiente aerodinámico del túnel.
- Contraste de la capacidad máxima real de impulsión de aire, tanto en sentido directo como inverso.
- Ajuste/calibración del sistema de anemómetros.
- Comprobación de distribución lumínica y cumplimento de valores tras el envejecimiento de las luminarias instaladas.

Las pruebas de los sistemas de presurización de galerías se ejecutarán de modo que puedan comprobarse las prestaciones de los mismos según norma UNE-EN 12101-6 (diferencia de presión con puertas cerradas y velocidad de paso del aire con puertas abiertas) y CTE-DBSI (fuerza de apertura de puertas). Para ello será necesario contar con un equipo de presión diferencial, anemómetro portátil y dinamómetro.

Los ensayos descritos deberán realizarse en todas las galerías del túnel, con hipótesis de incendio en cada tubo.

Los objetivos que se persiguen en un ensayo con humos calientes limpios son los siguientes:

- Reproducir las condiciones de movimiento de humo de un incendio en condiciones de control (trazabilidad del humo).
- Comprobar la respuesta del sistema de ventilación, probando los algoritmos implementados en caso de incendio bajo diferentes hipótesis.

La metodología debe ser como se describe a continuación:

- Instalación y puesta en marcha de equipamiento de ensayos:
  - Despliegue de secciones de medida según se indica en ensayo aerodinámico.
  - Instalación del sistema de producción de humos.
  - En caso de existir riesgo de daños en la infraestructura, se deberán colocar elementos de protección acordes (elevadas temperaturas u otros), en toda la zona expuesta al riesgo.
  - Despliegue de cámaras de vídeo sobre trípode con las que se recoja toda la información de interés (generación y evolución de los humos).
- Antes de iniciarse los ensayos, se deberán recrear en el tubo condiciones de movimiento de aire representativos del tiro natural y que simulen en escenario desfavorable (si es necesario, mediante el uso de ventiladores del túnel).
- Inicio de ensayo con arranque del sistema de producción de humos. Se activará la señal de incendio y se operará el algoritmo en modo automático.

Los requerimientos mínimos de material son los siguientes:

- Sistema de producción de humos limpios no tóxicos, situado en el lugar donde se simula el incendio. Especificaciones mínimas:
  - Caudal de humos equivalente al generado por vehículo ligero (un mínimo de 20 m3/s).
  - Temperatura de salida del humo suficiente para generar un penacho de humos estratificado en la parte alta de la sección (temperatura de 80-100ºC en el extremo de la chimenea de producción de humos). Se excluye la utilización de botes fumígenos.
  - Tiempo mínimo de 15 minutos de producción de humos para cada ensayo.

- El humo artificial caliente ofrecido debe cumplir las siguientes especificaciones:
  - Ser visible.
  - No ensuciar.
  - No ser tóxico.
  - Representar un muy bajo nivel de riesgo.
  - Permite simular en muy corto espacio de tiempo varios incendios, pudiéndose ampliar fácilmente las pruebas a varios escenarios (distintas ubicaciones en el túnel o repetición de una prueba varias veces, probando distintos algoritmos de ventilación).

CONCLUSIÓN

En definitiva, se trata de valorar y verificar los sistemas tanto de ventilación y alumbrado fijados en los proyectos iniciales, durante la explotación de la infraestructura y con posterioridad a planes de adecuación. Su valoración con la ayuda de los resultados de las pruebas periódicas nos aproximará a la capacidad real de los sistemas de la infraestructura a gestionar.

CENTRAL-WAN CHAI BYPASS TUNNEL AIR PURIFICATION SYSTEM, HONG KONG. EXPERIENCE AFTER THREE YEARS OF OPERATION

Elke Deux, Izaskun Martos, Anika Schnelle
FILTRONtec GmbH, Andresenstr

The Central-Wan Chai (CWB) tunnel is the key element of the new road link to the north of Hong Kong Island. The tunnel is 3.7 km long and bypasses the main shopping streets helping to alleviate traffic in the city centre. The CWB tunnel is equipped with the world's largest road tunnel air purification system to date consisting of eight individual filter systems with the capacity to treat a total air flow of 1,500 m^3/s. Those filter systems consist of a particle and a gas filter. First, the air passes through a two-stage electrostatic precipitator which consists of an ioniser and a collector and removes more than 85% of the fine dust particles from the air stream. The particle-cleaned air is then passed through an activated carbon filter, where more than 90% of the nitrogen dioxide (NO2) is removed from the exhaust air. The clean air can be returned to the tunnel or discharged directly to the outside. The CWB tunnel was opened to traffic in January 2019. As part of the commissioning of the air purifications sys-tems, an efficiency test was carried out by an independent laboratory in November 2019. During this test and also afterwards, all individual air purification systems were found to permanently meet and exceed the 85% separation efficiency requirements for both particulate matter (PM10) and nitrogen dioxide contained in the tunnel air. The air purification systems operate 19 hours a day. The paper focuses on the operating experience to date with empha-sis on the maintenance and overhaul works carried out.

SISTEMA DE PURIFICACIÓN DEL AIRE DEL TÚNEL DE CIRCUNVALACIÓN CENTRAL-WAN CHAI, HONG KONG. EXPERIENCIA TRAS TRES AÑOS DE FUNCIONAMIENTO

El túnel Central-Wan Chai (CWB) es el elemento clave del nuevo enlace vial al norte de la isla de Hong Kong. Tiene una longitud de 3,7 km y permite circunvalar las principales calles comerciales, contribuyendo a aliviar el tráfico del centro de la ciu-dad. El túnel CWB está equipado con el mayor sistema de filtración de aire para tú-neles de carretera del mundo instalado hasta la fecha, consistente en ocho sistemas de filtrado individuales con capacidad para tratar un caudal total de aire de 1.500 m^3/s. Cada uno de ellos cuenta con un filtro para partículas y un filtro para gases. En primer lugar, el aire pasa por un precipitador electrostático en dos etapas. Éste se compone de un ionizador y un colector y elimina más del 85% de las partículas finas de polvo del aire. A continuación, el aire limpio de partículas pasa por un filtro de carbón activo, en el que se elimina más del 90% del dióxido de nitrógeno (NO2) del aire de escape. El aire limpio puede ser devuelto al túnel o expulsado directamente al exterior. El túnel CWB se abrió al tráfico en enero de 2019. Como parte de la pues-ta en marcha de los sistemas de filtrado, se realizó una prueba de eficiencia por par-te de un laboratorio independiente en noviembre de 2019. Durante esta prueba y también después, se comprobó que todos los sistemas de filtrado cumplían y exce-dían permanentemente los requisitos de eficiencia de separación del 85% tanto pa-ra las partículas (PM10) como para el dióxido de nitrógeno contenido en el aire del túnel. Los sistemas de filtración operan durante 19 horas al día. El artículo se centra en la experiencia de funcionamiento hasta la fecha y hace hincapié en los trabajos de mantenimiento y revisión realizados.

SYSTÈME DE PURIFICATION DE L'AIR DU TUNNEL DE CONTOURNEMENT DE CENTRAL-WAN CHAI, HONG KONG. EXPÉRIENCE APRÈS TROIS ANS D'EXPLOITATION

Le tunnel Central-Wan Chai (CWB) est l'élément clé de la nouvelle liaison routière au nord de l'île de Hong Kong. Longue de 3,7 km, elle permet de contourner les principales rues com-merçantes, contribuant ainsi à désengorger le centre-ville. Le tunnel de la CWB est équipé du plus grand système de filtration d'air pour tunnel routier au monde à ce jour, composé de huit systèmes de filtration individuels capables de traiter un flux d'air total de 1 500 m^3/s. Chaque système de filtration possède un filtre à particules et un filtre à gaz. Tout d'abord, l'air passe par un précipitateur électrostatique à deux étages. Il se compose d'un ionisateur et d'un collecteur et élimine plus de 85 % des fines particules de poussière présentes dans l'air. L'air nettoyé des particules passe ensuite par un filtre à charbon actif, où plus de 90 % du dioxyde d'azote (NO2) est éliminé de l'air évacué. L'air purifié peut être soit renvoyé dans le tunnel, soit évacué directement à l'extérieur. Le tunnel de la CWB a été ouvert à la circulation en janvier 2019. Dans le cadre de la mise en service des systèmes de filtration, un test d'effi-cacité a été réalisé par un laboratoire indépendant en novembre 2019. Au cours de cet essai, et également par la suite, il a été constaté que tous les systèmes de filtration respectaient et dépassaient en permanence les exigences d'efficacité de séparation de 85 % pour les parti-cules (PM10) et le dioxyde d'azote contenus dans l'air du tunnel. Les systèmes de filtration fonctionnent 19 heures par jour. L'article se concentre sur l'expérience d'exploitation à ce jour, en mettant l'accent sur les travaux de maintenance et de révision effectués.

INTRODUCTION

On 24th February 2019 the new Central Wan Chai Bypass tunnel in Hong Kong was fully opened. The tunnel is located on the island's coast. The 4 km long tunnel connects the districts of Sheung Wan and Fortress Hill. The tunnel is built to alleviate the existing traffic congestion and to reduce the noise level in that area. Furthermore, it is also required to improve the air quality in the city. Therefore, it was decided to install a total of eight air purification systems inside three different ventilation buildings. All plants are installed as bypass in a plenum next to the road in the tunnel. Depending on the building and ventilation system design, the cleaned air is returned to the tunnel or discharged into the environment after filtering. Figure 1 shows the East ventilation shaft at Tin Hau which discharges the cleaned air to the environment.

Figure 1: East Ventilation Shaft [1]

The efficiency of an air purification system is very dependent on the air flow through the system and the corresponding velocity of the air in the filter. FILTRONtec was directly involved during the design phase to optimise the air flow and to fit the filter arrangements into the structure of the buildings on site.

Table 1 gives an overview about the different ventilation buildings, the number of plants installed in each one and the corresponding air flow rate.

Table 1: Arrangement of plants

Ventilation Building	Air Flow Rate	Number of APS plants
West Ventilation Building	250 m^3/s	1
East Ventilation Building	625 m^3/s	3
Middle Ventilation Building	625 m^3/s	4

CONSTRUCTION PHASE

FILTRONtec was awarded with the contract for the design, installation and commissioning of the air purification systems in 2014. After a long planning and design phase, the installation of the first air filtration plant started in the West Ventilation Building in November 2016. The installation in the East and Middle Ventilation Building followed in 2017. Installation and commissioning were successfully completed in all buildings and the complete system was handed over to the client in November 2018. The tunnel was officially opened for traffic in January 2019. The installed air filtration plants run up to 19 h per day. After several months of operation, an efficiency test was conducted for all plants and successfully passed. In November 2020 the warranty period of the plants was also successfully completed without any defects.

INSTALLATION

The air purification systems for CWB designed by FILTRONtec consist of two parts: a particle filter and a gas filter each made up of different, individual components. The first stage of the system removes particles from the air stream measured as PM_1, $PM_{2,5}$ and PM_{10}. The integrated components are the following:

Roughing Filter

A grid mounted on a unistrut frame is installed to protect the electrostatic precipitator from larger objects like paper, plastic bags and leaves. This roughing filter is installed at the inlet of the air path upstream each plant.

Electrostatic Precipitator

The dedusting systems in Hong Kong consist of differently sized arrays of ESP modules. The dimensions and size of those particle filters are adapted to the available cross section and to the air flow rate to be treated at the eight different locations. Each of the installed modules is divided into an ioniser part and a collector part. The particles are electrically charged in the ioniser before being deposited at the collector plates (refer to Figure 2).

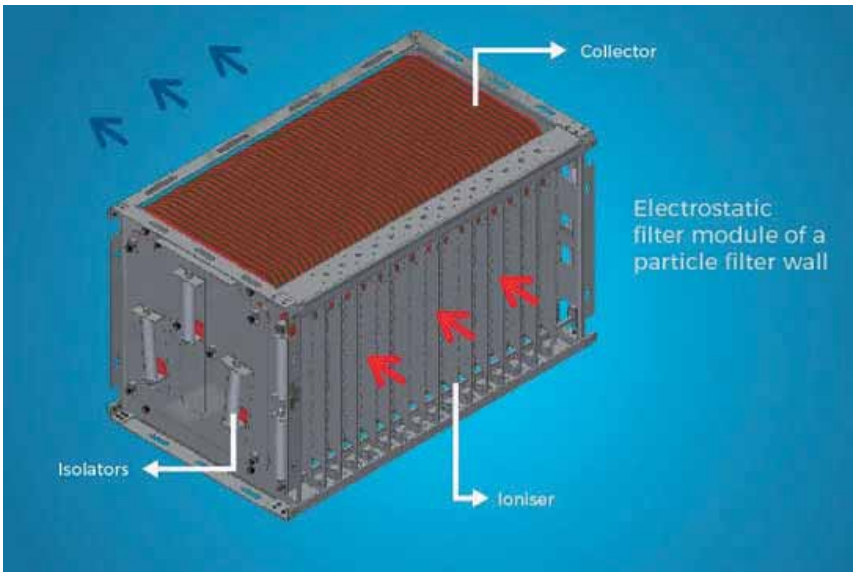


Figure 2: Electrostatic precipitator module [2]

Each electrostatic precipitator array is equipped with rinsing nozzles and water supply pipes for cleaning and drying of the filter modules. These components as well as the electrical connections supplying the voltage for the individual filter modules are integrated in the ESP module support rack. The electrostatic precipitator modules are made of stainless steel (AISI 316) to ensure a long lifetime.

High Voltage Transformer Rectifiers

The high voltage transformer rectifiers provided for Central Wan Chai Bypass are especially designed for the parameters of the installed electrostatic precipitators. Three phase transformer rectifier systems are selected for this project to ensure that the power supply for the filter is most effective. Ioniser and collector are connected to two different transformer rectifier systems providing different output voltages. Thus, each plant consists of two transformer rectifier sets and a corresponding HV control panel.

Wash Down Equipment

Once the collector plates of the ESP are loaded with dust, they are washed down with water applied via spray nozzles (refer to Figure 3). During the cleaning process the filter modules must be electrically disconnected and voltagefree. In order to keep the filter downtime as short as possible, the ESP is predried after the wash down by blowing compressed to the filter via the same spray nozzles. The control system of the filter system starts the cleaning process automatically. It takes about 20 minutes in total and is scheduled to run during low traffic period, usually during nighttime.

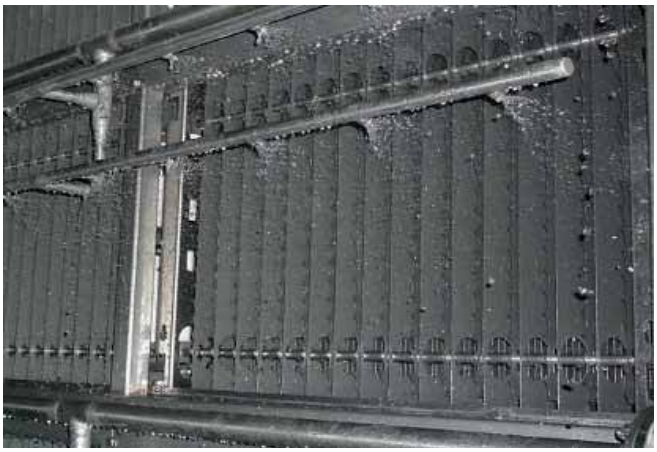


Figure 3: Wash down of the ESP [2]

A compressor charging an air receiver is installed to provide compressed air for the drying process. The whole rinsing and drying sequence is fully automatic and controlled by the APS PLC system.

Water recycling plant

The dirty wash water with the filter deposits is collected in a storage tank first and treated in a water treatment plant later. More than 90% of the dirty water can be reused for a new filter cleaning sequence. A small topup of fresh water is required after the completion of the water treatment process to compensate losses during the wash down process, mainly due to water still remaining in the filter area or retained in the concentrated slurry. The collected filter deposits form liquid slurry which is collected in the tunnel waste water system and treated in a sewage treatment plant if required. One water recycling plant is located in the auxiliary room of each ventilation building treating the wash down water from all ESP filters installed in this particular building.

Gas filter

The second stage of the filtration plants filters gaseous pollutants with the focus on nitrogen dioxide. The specially treated activated carbon is optimised for a maximum adsorption of nitrogen dioxide from the air stream. At the same time, other components like ozone and some unburned hydrocarbons are also removed. The activated carbon is provided as pellets with a diameter of 4 mm. The carbon pellets are filled in rectangular metal walls with two opposite airpermeable perforated plates. The filled walls are mounted next to each other on a vertical frame and thus, form a closed filter wall through which the exhaust air is forced. In order to achieve sufficient filter face area, the filter walls in the air channel are arranged in a "W" shape (refer to Figure 4).

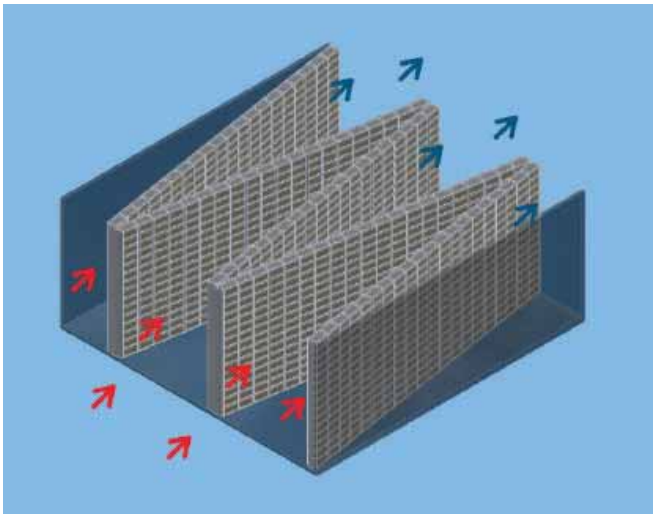


Figure 4: Activated carbon wall schematic [2]

The activated carbon filter has a service life of several years. When the capacity of the activated carbon is used up, it can be regenerated by the manufacturer and then reused. Alternatively, it can be used further for other applications or for generation of heat and power.

Control system and electrical components

All operations related to the installed air purification system are fully automatic. A PLC, which is located in the auxiliary room, controls all functions of the plant, monitors the performance, operates the filtration and wash down sequences and raises alarms in case of malfunctions. Furthermore, the plant is connected to the tunnel control and monitoring system which has also the possibility to remotely control and operate the APS.

Different types of air monitoring systems (AMS) are installed inside the filter areas to measure the particles and nitrogen dioxide concentrations before and after the system in order to constantly monitor the performance of the APS. These air monitoring systems transmit the measured values to the tunnel control system for further analysis and are transmitted to the Environmental Protection Department of Hong Kong for further processing.

The Air Purification System is capable of operating continuously 24 hours per day with an allowance of a one hour shutdown for wash down and drying of the particle filter. The necessary time for maintenance works and inspections is less than 5 % of the yearly operational time.

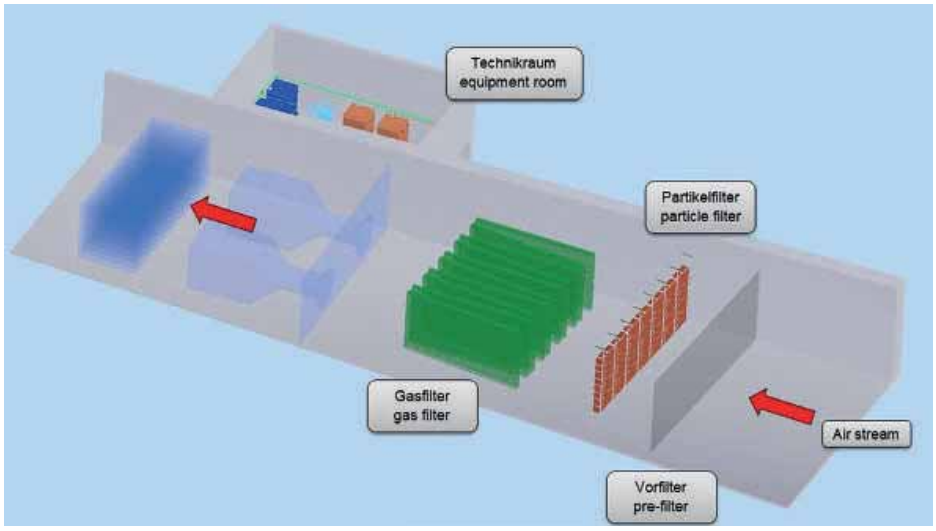


Figure 5: Schematic arrangement of an air purification system as installed in Hong Kong [2]

EFFICIENCY TEST

The project specification required to successfully conduct an efficiency test for all installed plants. The test should proof that the measured data of the air monitoring stations are cor-rect and that the plants work within the limits prescribed in the specification. The efficiency test, conducted by an accredited independent laboratory, started on 02 November 2019 and ended on 09 November 2019. The tunnel was fully open and in normal operation during the test.

The systems in the different buildings were checked individually. Portable measuring devices for PM10 and NO2 were set up in addition to the already installed measuring equipment to record reference measurements. The efficiency values were compared after completion of the measurement. Each plant also performed a wash down sequence during the test to completely fulfil with the normal operation conditions. Beside the requirement that separation rates measured by fixed and reference AMS had to be comparable, the filter efficiency had to meet the following criteria:

At an inlet concentration of ≥ 0.25 ppm for NO_2 or ≥ 0.5 mg/m³ for PM_{10} particles the removal rate had to be above 85% (criterion 1). At an inlet concentration < 0.25 ppm for NO_2 or < 0.5 mg/m³ for PM_{10} particles the outlet concentration of 0.05 ppm for NO_2 or 0.1 mg/m³ for PM_{10} particles should not be exceeded (criterion 2).

The efficiency test done in November 2019 successfully proved that the installed measuring stations show correct values and all plants fulfil the requirements of the specification as shown in the figures below (Figure 6 and Figure 7).

Figure 6 shows the results of the efficiency test of one plant located in the Middle Ventilation Building. The diagram shows the value measured of the additionally installed monitoring station. The vertical axes show the concentration of PM10 in mg/m³ and the corresponding separation rate. The horizontal axis shows the measuring time. The separation rate is always around 85% and higher and the outlet concentration is nearly zero. Thus, the plant fulfils both requirements of the specification. The good results are constant over the whole day.

Figure 7 shows the results of the NO2 measurement for the plant during the efficiency test. The horizontal axis shows again the measurement time. The vertical axes show the concentration of NO_2 in ppb and the separation rate. The separation rates for NO_2 are over 90 % most of the time and the outlet concentrations are nearly zero. Thus, the plant fulfils the requirements of the specification for this pollutant, too.

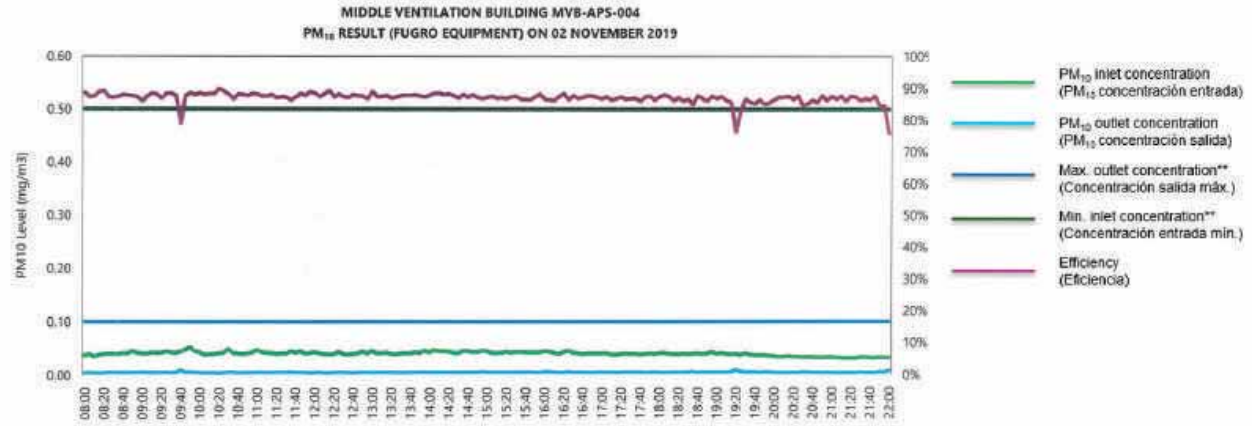


Figure 6: Results of the PM_{10} measurement obtained during the efficiency test in Middle Ventilation Building [3]

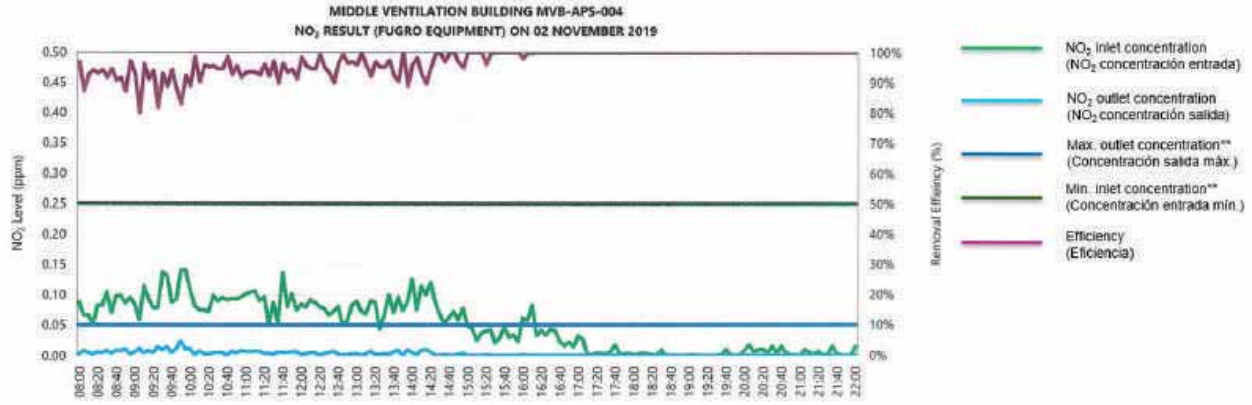


Figure 7: Results of the NO_2 measurement obtained during the efficiency test in the Middle Ventilation Building [3]

The test showed that the installed air purification systems achieve the required efficiencies for the complete test period. For the evaluation of the performance, the second criterion is mostly used since the inlet concentrations are lower than originally expected. In addition, the first criterion is also achieved at the same time.

OPERATION OF THE PLANT

The measurement data are continuously stored and analysed by the PLC. For the period of January 2019 to December 2020 analysed by FILTRONtec, the plants achieve the required efficiency with only a handful of exceptions. Those exceptions are also not a failure of the APS but could be related to other malfunctions such as AMS failures or excessive dust creation due to unscheduled maintenance works. The plants run an average time of 19 hours per day at 7 days a week. Between 1 a.m. and 6 a.m. the plants are turned off. This period is considered as low traffic mode, due to the low frequency of vehicles passing through the tunnel, which makes the operation of the air filtration plants unnecessary. Therefore, this period is used for the necessary washing operation and maintenance work at the APS or other equipment installed in the air path.

A system availability analysis was carried out for the West Ventilation Building for the year 2020. All faults occurred, whether internal faults of the air purification system or external faults such as disturbances in the tunnel, were analysed and evaluated (refer to Figure 8). The fault rate for the period from January 2020 to December 2020 is only 2%. This proves that the installed systems achieve the required availability of 95% and run al-

most faultfree. Any faults that occurred were rectified by the 24hour active emergency service. Thus, the downtime was kept to a minimum. The 21% representing low traffic mode shown is part of the normal operation but is shown individually at the diagram for better understanding.

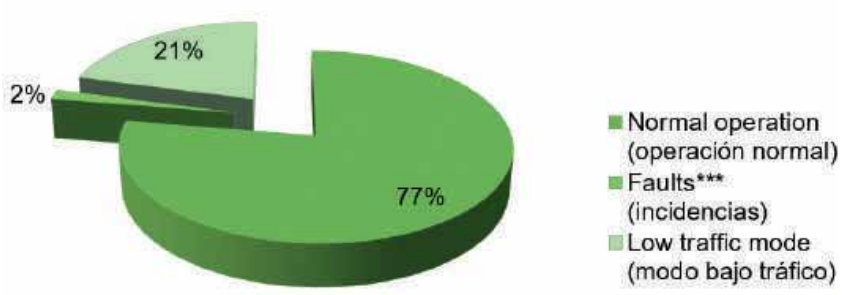


Figure 8: System availability for the West Ventilation Building 2020 [2]

In addition to the system availability the measured values were also continuously evaluated by the APS PLC and the tunnel control system. The diagram in Figure 9 displays the daily average values of the NO_2 inlet and outlet concentration from a plant in the East Ventilation Building measured in May 2020. The vertical axis of the diagram shows the concentrations in µg/m³ and the horizontal axis the time.

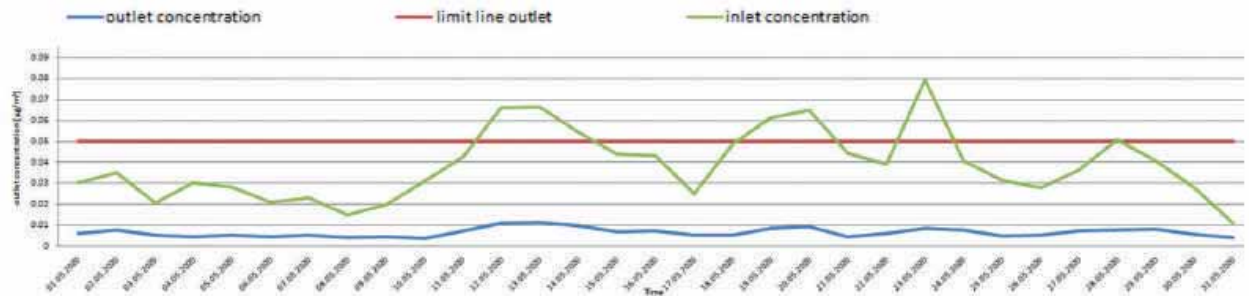


Figure 9: NO2 concentration measured in East Ventilation Building, May 2020 [2]

Again, it can be seen that the outlet concentrations are nearly zero and well below the 0.25 ppm value required by criterion 2. Therefore, the performance of the gas filter is meeting and exceeding the requirements. Furthermore, the diagram shows that also the inlet concentrations are very often smaller than the value specified as maximum outlet concentration.

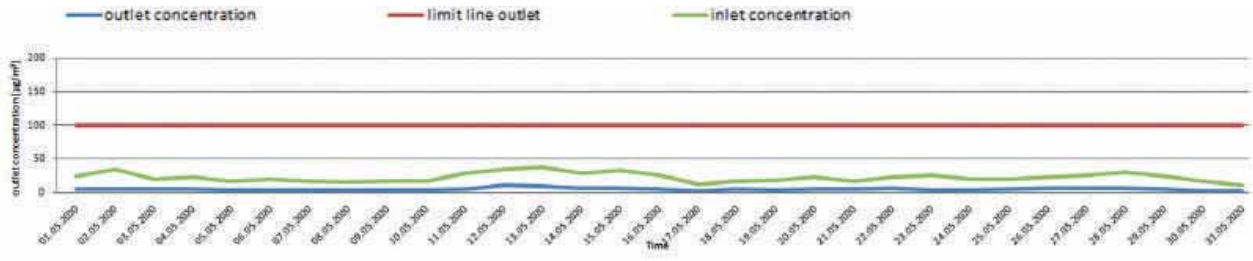


Figure 10: PM10 concentration measured in East Ventilation Building, May 2020 [2]

Figure 10 shows the daily average values for PM10 measured for one plant in the East Ventilation Building in May 2020. The values prove that the electrostatic precipitator achieves a significant reduction of the particle

concentration even for very low concentrations and meets the project specification. The vertical axis of the diagram shows the concentration in µg/m3 and the horizontal axis the measurement time. As for NO_2, the inlet limits for the particle concentration for the first criterion are not reached and the outlet concentration is nearly zero. The measured rates are very similar for all installed systems in the different ventilation buildings and show the excellent performance of all APS.

Another requirement prescribed in the project specification was a maximum value for the system pressure drop. The pressure drop of the entire system (roughing filter at the inlet of the APS to outlet of the gas filter) was not allowed to exceed 850 Pa. This requirement could also be fulfilled by the installed system. The following diagram (refer to Figure 11) shows as an example the mean values of the pressure drop for the months December 2019 to March 2020 for the plant installed in the West Ventilation Building.

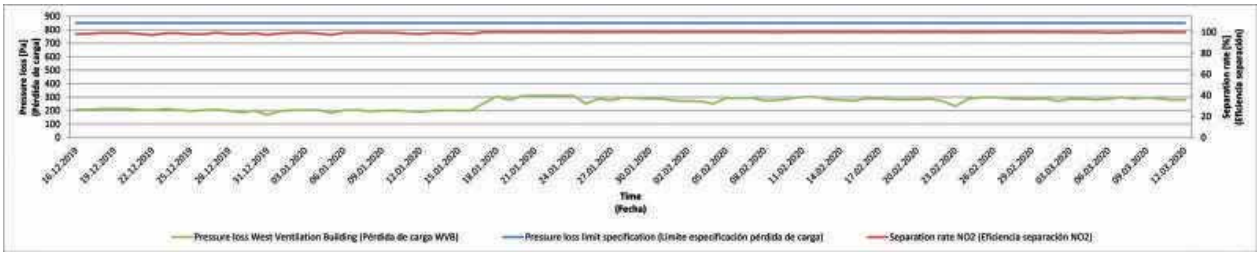


Figure 11: Pressure loss and NO_2 separation rates measured in West Ventilation Building, December 2019 - March 2020 [2]

The two vertical axes in the diagram show the pressure drop and the NO2 separation rate of the plant. The horizontal axis gives an overview about the measurement period. The diagram proves that the measured pressure losses are always well below the limit specified. It can also be seen that the pressure loss of the plant increases in January 2020. The reason for the increase is a refilling of the gas filter with activated carbon. After one year of operation some of the carbon had been settled requiring a topup. The figure also shows that this settlement had nearly no impact on the NO2 separation rate that was above the limit of 85% all time.

MAINTENANCE

From the opening of the tunnel until the end of 2020 maintenance of the air filtration systems was carried out by FILTRONtec in cooperation with a local partner. To avoid long duration of downtime a 24-hour emergency service was available during 7 days a week. Thus, it was possible to react very quickly in the event of faults occurring. FILTRONtec developed a maintenance plan for all installed plants. Most of the maintenance works concentrated on the installed air monitoring system and the water treatment plant and, therefore, auxiliary equipment to the air purification system with no impact on its operation and performance. The tunnel operators were trained during the year of maintenance and they took over the responsibility of the system in 2021.

REFERENCE LIST

[1] [Online]. Available: www.cwb-hyd.hk/en/. [Access 03 05 2022].

[2] FILTRONtec internal information.

[3] Fugro Technical Services Limited: Report for Air Quality Measurement for Central-Wan Chai Bypass Tunnel Buildings - Efficiency Tests, Re. No 1195116EN192218, 2019.

METHODOLOGY OF SELECTING A ROAD TUNNEL VENTILATION SYSTEM IN POLISH CONDITIONS USING VENTSIM SOFTWARE

Zwolińska Klaudia, Szmuk Andrzej, Borowski Marek
AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland

Successive implementations of road projects and the continuous development of road infrastructure result in the construction of more and more advanced engineering structures. Therefore, road tunnels are gaining popularity. Tunnels ensure smooth road traffic and shorten the travel time between particular cities. The crucial equipment of each tunnel is a ventilation system which enables comfortable and safe operation. The ventilation system is crucial, especially in the event of a fire, when the life of the users depends on its correct operation. Proper selection of the system and design of its operation is essential. At the same time, it requires considering many factors and operational circumstances. At the design stage, regulations, guidelines, and good practices in this field are most often used. Each tunnel is an individual project that requires attention and considering its particular characteristics.

The paper presents a method of verifying the parameters of the ventilation system and its proper operation with the use of the VentSim software. The presented analysis was carried out for the concept of a tunnel in Krakow connecting the city with the A4 highway. The model was prepared based on the construction concept, meteorological data for the surroundings, traffic forecasts, and traffic analysis for nearby areas. The analysis includes simulations for both normal operations and in case of fire. Both the parameters of the entire system and its particular components have been determined. Fire analysis provides the results of the concentration of pollutants and the temperature distribution inside the analyzed tunnel. In the introduction, a detailed analysis of the ventilation system selection procedure was carried out. This part contains a description of the types of ventilation, fire development characteristics, and possible factors affecting the fire situation. Special attention was paid to tunnel conditions in Poland, which are described in detail in the third chapter.

METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE VENTILACIÓN DE TÚNEL DE CARRETERA EN CONDICIONES POLACAS UTILIZANDO EL SOFTWARE VENTSIM

Las sucesivas implementaciones de proyectos viales y el continuo desarrollo de la infraestructura vial dan como resultado la construcción de estructuras de ingeniería cada vez más avanzadas. Por lo tanto, los túneles de carretera están ganando popularidad. Los túneles aseguran un tráfico rodado fluido y acortan el tiempo de viaje entre ciudades particulares. El equipamiento crucial de cada túnel es un sistema de ventilación que permite una operación cómoda y segura. El sistema de ventilación es crucial, especialmente en caso de incendio, cuando de su correcto funcionamiento depende la vida de los usuarios. La selección adecuada del sistema y el diseño de su funcionamiento es esencial. Al mismo tiempo, requiere considerar muchos factores y circunstancias operativas. En la etapa de diseño se utilizan con mayor frecuencia las normas, lineamientos y buenas prácticas en este campo. Cada túnel es un proyecto individual que requiere atención y consideración de sus características particulares.

El artículo presenta un método de verificación de los parámetros del sistema de ventilación y su correcto funcionamiento con el uso del software VentSim. El análisis presentado se llevó a cabo para el concepto de un túnel en Cracovia que conecta la ciudad con la autopista A4. El modelo se elaboró en base al concepto de construcción, datos meteorológicos del entorno, pronósticos de tráfico y análisis de tráfico de las zonas aledañas. El análisis incluye simulaciones tanto para operaciones normales como en caso de incendio. Se han determinado tanto los parámetros de todo el sistema como sus componentes particulares. El análisis de incendios proporciona los resultados de la concentración de contaminantes y la distribución de temperatura dentro del túnel analizado. En la introducción se realizó un análisis detallado del procedimiento de selección del sistema de ventilación. Esta parte contiene una descripción de los tipos de ventilación, las características de desarrollo del fuego y los posibles factores que afectan la situación del fuego. Se prestó especial atención a las condiciones de los túneles en Polonia, que se describen en detalle en el tercer capítulo.

MÉTHODOLOGIE DE SÉLECTION D'UN SYSTÈME DE VENTILATION DE TUNNEL ROUTIER DANS LES CONDITIONS POLONAISES À L'AIDE DU LOGICIEL VENTSIM

Les réalisations successives de projets routiers et le développement continu des infrastructures routières se traduisent par la construction d'ouvrages d'art de plus en plus avancés. Par conséquent, les tunnels routiers gagnent en popularité. Les tunnels assurent un trafic routier fluide et raccourcissent le temps de trajet entre certaines villes. L'équipement crucial de chaque tunnel est un système de ventilation qui permet une exploitation confortable et sûre. Le système de ventilation est crucial, notamment en cas d'incendie, lorsque la vie des utilisateurs dépend de son bon fonctionnement. Une sélection appropriée du système et la conception de son fonctionnement sont essentielles. En même temps, il faut tenir compte de nombreux facteurs et circonstances opérationnelles. Au stade de la conception, les réglementations, les lignes directrices et les bonnes pratiques dans ce domaine sont le plus souvent utilisées. Chaque tunnel est un projet individuel qui nécessite une attention et compte tenu de ses caractéristiques particulières.

L'article présente une méthode de vérification des paramètres du système de ventilation et de son bon fonctionnement à l'aide du logiciel VentSim. L'analyse présentée a été réalisée pour le concept d'un tunnel à Cracovie reliant la ville à l'autoroute A4. Le modèle a été préparé sur la base du concept de construction, des données météorologiques pour les environs, des prévisions de trafic et de l'analyse du trafic pour les zones voisines. L'analyse comprend des simulations pour les opérations normales et en cas d'incendie. Les paramètres de l'ensemble du système et de ses composants particuliers ont été déterminés. L'analyse incendie fournit les résultats de la concentration des polluants et de la répartition de la température à l'intérieur du tunnel analysé. Dans l'introduction, une analyse détaillée de la procédure de sélection du système de ventilation a été effectuée. Cette partie contient une description des types de ventilation, des caractéristiques de développement du feu et des facteurs possibles affectant la situation du feu. Une attention particulière a été accordée aux conditions des tunnels en Pologne, qui sont décrites en détail dans le troisième chapitre.

1. INTRODUCTION

The number of road tunnels in the world is increasing every year. This tendency is also visible in Poland. In recent years, several road tunnels have been built and designed. Currently, at least eight road tunnels are under construction or at the design stage. The dynamic development of road infrastructure results in the execution of many new engineering structures. In some cases, to improve car traffic, it is necessary to avoid certain terrain obstacles, such as rivers, water reservoirs, or mountain hills. Road tunnels are one of the solutions that are increasingly used for these situations. Nevertheless, in the urban landscape, road tunnels also enable smooth vehicle traffic, especially in the transport hubs of large urban agglomerations. All this, as well as the development of technical possibilities and an increase in the experience of designers in this field, cause subsequent tunnel objects to appear on the map not only in Poland. Undoubtedly, with the increase in the number of road tunnels and the increase in the length of newly built facilities, the emphasis on the safety systems. Safety systems play an important role in the face of possible emergencies in the tunnel. During the operation of road tunnels, users are exposed to many hazards, including an increased concentration of harmful solid and gaseous pollutants. From the point of view of the scale of the threat, fires are the largest and most dangerous events. In the case of fire heat, smoke, and toxic products are generated. This causes a hazard to the health and life of users as well as the structure and equipment of the tunnel itself.

The article presents the issue of a fire in a road tunnel, including the causes and frequency of fire as well as the characteristics of fire development. Particular attention was paid to the methodology of selecting a ventilation system, considering the principles of operation of individual types of installations used in road tunnels. The applied practices and recommendations were analyzed in terms of tunnels in Poland, both existing and designed. Finally, the method of verifying the appropriate operation of the ventilation system with the use of VentSim software was presented. The analysis was based on the concept of a tunnel designed in Krakow.

2. SELECTION OF A ROAD TUNNEL VENTILATION SYSTEM

The choice of the type of ventilation system is one of the most important decisions when designing the tunnel, taking into account the operation of the system in normal, emergency, and fire conditions. Thanks to the constant reduction of gas emissions by vehicles in the last 20 years, the emergency conditions associated with the occurrence of fire are becoming the most important factors determining the choice of ventilation system in tunnels.

In tunnels with bidirectional traffic where the tunnel users may be on both sides of the fire, the following conditions must be achieved:

- smoke stratification is not disturbed,
- longitudinal velocity of air movement is kept within the range of small values,
- smoke is extracted through openings in the ceiling to the ceiling duct or through the shafts.

In tunnels with unidirectional traffic where users may be behind the fire location, the following conditions must be achieved :

- for a longitudinal ventilation system - prevent the formation of a return layer by creating a longitudinal air velocity along the tunnel axis. At the initial stage of fire development, breaking the smoke layer should be avoided by way of switching off the jet fans located near the fire place and starting the fans behind the fire towards the outlet portal, which prevents smoke stratification and recirculation in the immediate vicinity of the fire seat.
- for transverse or semi-transverse ventilation system - maximize the flow of air removed from the zone in the vicinity of the fire seat and minimize the external air flow supplied to the tunnel from the outside.

The longitudinal ventilation system is recommended for tunnels that are:

- unidirectional,
- with unrestricted vehicle traffic (no congestion, smooth traffic> 40km / h),
- with a low share of heavy cargo vehicles in the entirety of vehicles passing through the tunnel,
- with a small difference in height between the tunnel portals,
- with a low longitudinal slope,
- up to 2500 m long.

In other cases, it is recommended to use a transverse or mixed ventilation system.

Currently in Poland there are no detailed guidelines for the design of ventilation systems in road tunnels, including those in fire mode. Polish legal regulations regarding engineering and road constructions are contained in [1,2,3,4] the minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network. The best-known guidelines for ventilation in fire mode that specify requirements in road tunnels are the studies of World Road Association (PIARC) and Forschungesellschaft fur Strassen und Verkehrswesen (RABT). In addition, there exist standards and guidelines developed by the European Union (EU), the United States, Austria [5] and many other countries that have numerous tunnels and have many years of experience in road tunnel ventilation. Designing ventilation systems for road tunnels is a complicated issue, which should take into account the following factors:

1. What level of risk does the tunnel security system require based on the tunnel length and traffic conditions?
2. Does the tunnel require a mechanical tunnel ventilation system and permanent fire extinguishing systems?
3. What are the fire parameters that will affect the ventilation system solution?
4. What type of ventilation system is required?
5. Is a permanent fire extinguishing system needed and of what type?
6. How will the ventilation in the tunnel be controlled? Is a control center required?

2.1. Causes and frequency of occurrence of fires in road tunnels

Fires in road tunnels, despite the fact that they occur much less often than in buildings due to their nature are more difficult to extinguish. Theoretically, the frequency of fires in tunnels is related to such parameters as: the length of tunnel, type of traffic (unidirectional or bidirectional), traffic intensity, speed of vehicles and longitudinal slope of the road in the tunnel. Urban tunnels are characterized by a higher incidence of events that lead to fires. Trucks and cargo vehicles are more likely to be the cause of fire than passenger cars. When the fire involves heavy trucks, there exists a greater risk that the it will turn into a much larger and more severe fire with a heat release rate of over 20 MW, which may cause damage to the tunnel structure and equipment. According to [6], the duration of major fires in road tunnels varies from 20 minutes to 4 days. Mostly, even major fires last 2 to 3 hours. Table 1 presents the results of research on the number of fires per kilometre of tunnel.

Table 1. Estimated number of fires per km of tunnel [6]

Classification of fires		**Number of fires per 10^8 vehicles per kilometer**
Passenger cars	Fires that do not cause damage to the tunnel	1-2
Cargo vehicles without hazardous load	Fires that do not cause damage to the tunnel	8
	Fires causing minor damage to the tunnel equipment	1
	Major fires >20 MW, causing damage to the structure and equipment of the tunnel	0.1-0.3
Cargo vehicles carrying hazardous loads	Fires that do not cause damage to the tunnel	2
	Fires with presence of hazardous goods, causing damage to the structure and equipment of the tunnel	0.3

Collisions and other car accidents are the most common cause of tunnel fires. A primary cause of collisions and traffic accidents is the lack of concentration and attention of the drivers. The risk of a vehicle fire is increased in the situations where the engine (steep climbs in tunnels, tunnels after a long climb) and the brakes get hot (long descents).

In addition to collisions, impacts and accidents, the causes of vehicle fires include [6]:

- Engine fires that may result from damage to fuel or oil pipes or overheating of the heating, ventilation and air conditioning system.
- Short circuits in the electrical system followed by fire,
- Overheating of braking systems (according to French statistics, 60-70% of fire incidents involve trucks).
- Other defects leading to the self-ignition of vehicle.

Based on the analysis of major fires in tunnels involving heavy cargo vehicles, it can be concluded that [6]:

- Tunnel fires develop very quickly during the first 5-15 min.
- High heat emission occurs and the volume of fire gases emitted increases rapidly.
- Fire temperature may exceed 1000 °C.
- A rapid spread of fire between vehicles takes place over considerable distances from the source of outbreak.

Although major fires are rare, the effects of such fires can be fatal, as shown in Figure 1.

Figure 1. Mont Blanc tunnel after a fire [7]

2.2. Characteristics of fire development in a road tunnel

The outbreak and development of a fire in a tunnel have been the subject of many studies [7]. Development of fires inside vehicles depends on a number of factors, including but not limited to fire resistance of materials and internal components, fire resistance of cargo in the vehicle, size and location of the origin of the fire incident. A tunnel fire may include the following phases [7]:

- initial period during which the fire is initiated.
- growth, period of spread, potentially leading to flashover.
- development, period of full combustion of fuel
- disappearance, period of decreasing fire intensity
- extinction, the period during which thermal energy is no longer released.

Figure 2 shows the phases of development and disappearance of fire. The figure also shows the fire development when the sprinkler system is started. As you can see, the impact of sprinklers on the development of fire depends on the time of their activation from the moment of fire.

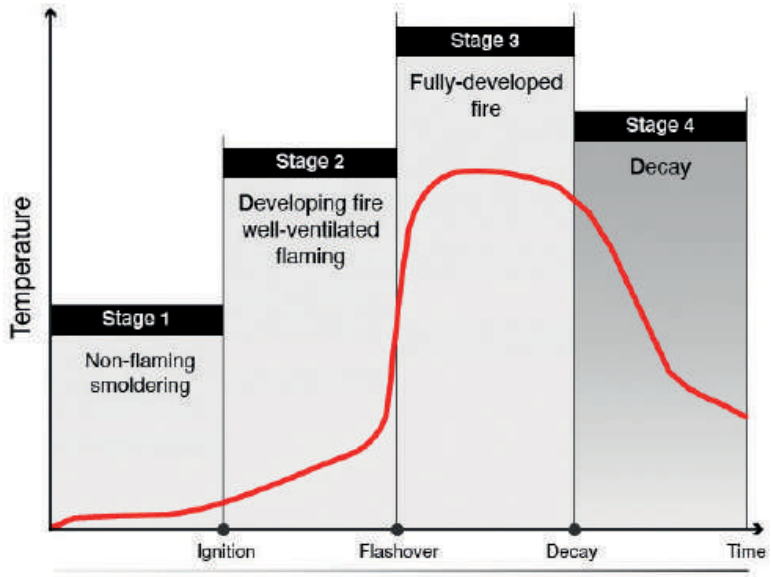


Figure 2. Phases of fire development [7]

To combat fires in tunnels featuring very heavy traffic, especially in Japan, Australia and the United States, fi-refighting systems are used All water-based fire protection systems have a limited ability to extinguish fires inside or under vehicles, thus a fire in high traffic tunnels will continue despite activation of the water-based fire protection system. Therefore, the main purpose of the water-based fire protection system is to mitigate the effects of fire and protect the structure and equipment of the tunnel [8].

Fire tests [7] have shown that sprinkler systems do not provide the required level of protection and are very susceptible to the operation of the ventilation system, due to the large volume of the tunnel.

Spreading of smoke and heat in the tunnel depends on many factors, the most important of them being the speed of airflow. At airflow speed close to 0 m/s, the mixture of air and fire gases is lifted to the tunnel ceiling and dissolves from the source of the fire in two directions.

As the fire progresses, buoyancy forces lift hot gases and spread them along the ceiling, depending on the tunnel slope and initial ventilation conditions associated with longitudinal airflow. Due to the increase in density (lowering of temperature) smoke gradually falls down at a certain distance from the source. It turns out that the distance of smoke backflow backwards in the direction opposite to air movement (so-called backlayering) and its relatively good stratification in the direction of movement are strongly dependent on ventilation conditions [9, 10]. Precipitation of the top layer of smoke under the ceiling occurs in sufficiently long tunnels. This phenomenon depends on the size of the fire (fire temperature), shape of the tunnel, air speed, ambient conditions as well as the height and cross-section of the tunnel.

The smoke layer may also be falling down if the fire heat release rate and thus the smoke production rate is higher than the speed of fire gases spreading along the tunnel. Figure 3 shows areas of smoke stratification.

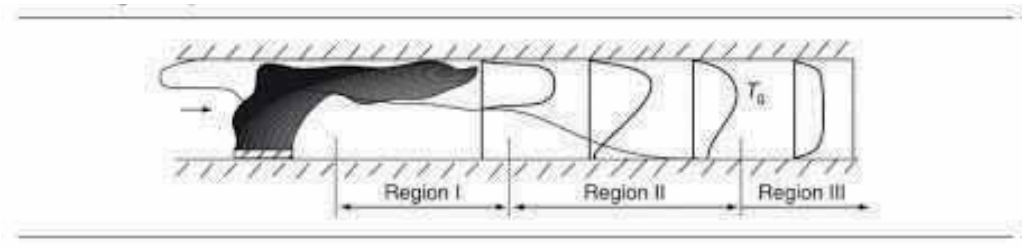


Figure 3. The areas of smoke stratification [10]

In order to determine the distance at which fire gases fall towards the roadway, the Froude dimensionless number (Fr) is used, which describes the effect of gravity or buoyancy forces on fluid flow phenomena [10]. In order to state the occurrence of fluid stratification, it is determined whether the Froude number is less than one. The division into stratification zones is as follows (Figure 3):

- I - where Fr <0.9, stratification occurs in which hot combustion products move along the ceiling. In zone I, the gas temperature near the road is close to the ambient temperature. This zone is adjacent to the fire and allows the evacuation of tunnel users.
- II - in which 0.9 <Fr <10, is dominated by the interaction between horizontal flow and buoyancy forces and is not strongly stratified. This is the area where the process of mixing fire gases with flowing air begins.
- III - where Fr> 10, has insignificant vertical temperature gradients and, consequently, a low stratification, which results in mixing of fire gases with the flowing air.

The main design parameter for tunnel ventilation systems in the event of a fire is the stream of generated fire gases, which depends on the combustion process and can generally be assumed to vary linearly with the amount of heat released, from about 50 m3/s at about 10 MW, to about 250 m3/s at around 150 MW. Figure 4 shows the relationship between heat release rate (HRR) expressed in MW and fire gas stream flow [11].

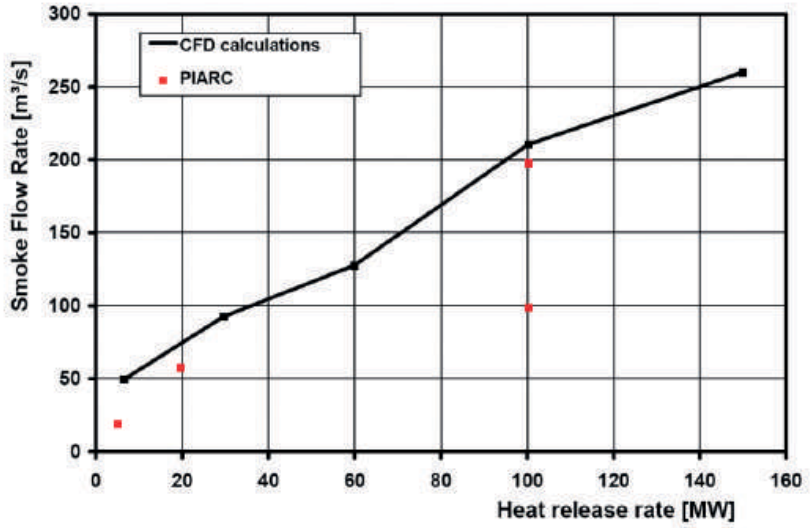


Figure 4. Amount of smoke and fire heat release rate [12]

2.3. Ventilation system during normal operation and in case of fire

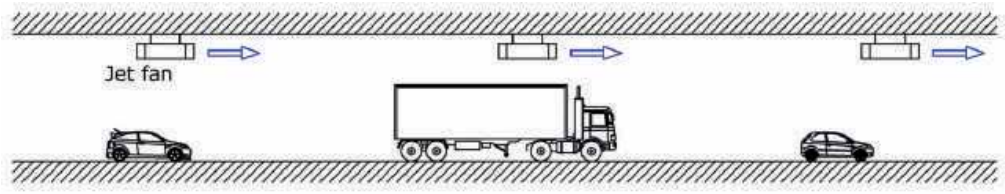
Road tunnel ventilation in vehicle traffic conditions should provide the necessary required air volume flow having in mind dilution of harmful exhaust components and for ensuring adequate visibility. The air volume flow is calculated with consideration to the permissible pollution in both normal and stationary traffic (e.g. traffic jam).

When a fire incident occurs, ventilation in the tunnel is started up in the so-called fire mode and it's role is to provide a controlled flow of smoke and fire gases in the tunnel and to discharge them outside the tunnel. Creation of a controlled flow of smoke and fire gases allows the evacuation of users with minimal smoke contamination of escape routes, preventing smoke intrusion to the access routes for rescue teams leading to the place of the incident. Most often, the same ventilation system is used in tunnels in both normal and emergency conditions, as well as in fire conditions, but different ventilation system parameters are provided for each operating mode.

For tunnel ventilation both natural and mechanical ventilation is used . Natural ventilation is used in tunnels of not more than 700 m in length for unidirectional traffic and not more than 500 m for tunnels in which bidirectional traffic is provided for [3]. A limitation in the use of natural ventilation in fire conditions is the risk of an uncontrolled process of fire gas flow, which is associated with high fire dynamics.

Mechanical tunnel ventilation systems according to [7] are divided into: longitudinal, transverse and mixed. Whereas [3] introduces the division of mechanical ventilation systems into: longitudinal, semi-transverse and transverse. In longitudinal ventilation systems, the air flow takes place along the tunnel axis, usually between its inlet and outlet (fig. 5). It is forced by the operation of fans located inside the tunnel, e.g. jet fans suspended under the tunnel ceiling or fans installed in the supply and exhaust shafts. Typically, longitudinal ventilation is designed, with axial fans arranged inside the tunnel every 60-120 m (Figure 5a). This solution does not require routing of ventilation ducts under the roadway or tunnel ceiling. The fans are to ensure smoke removal over the entire length of the tunnel, and speed of air flow through the tunnel should prevent smoke backflow by providing so-called critical speed.

a)



b)

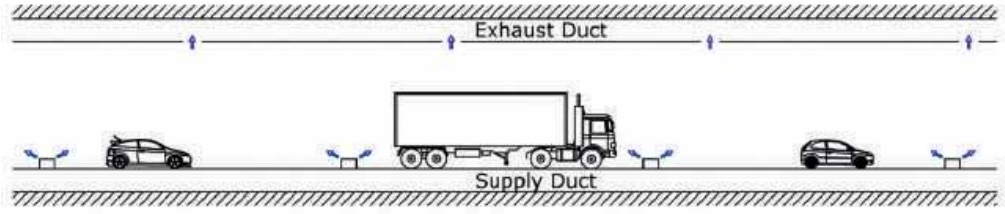


Figure 5. Diagram of longitudinal a) and transverse ventilation b) in a road tunnel

Transverse ventilation (Figure 5b) is used in long tunnels with heavy traffic, as it allows even distribution of air along the entire length of the tunnel and removal of solid and gaseous pollutants emitted by the vehicles. This solution requires routing supply pipes inside the tunnel, usually under the tunnel roadway, and the gas stream is removed through a ventilation duct located under the tunnel's ceiling. In such a ventilation system, air is supplied at the height of vehicle wheels and discharged under the ceiling of the tunnel. Mixed (semi-transverse) ventilation is a combination of transverse and longitudinal ventilation. Ventilation systems in road tunnels are designed for maximum fire power.

Maintaining a controlled smoke flow and evacuation of fire gases to the outside of the tunnel can be accomplished through a longitudinal ventilation system or an exhaust system. In a tunnel ventilated with longitudinal ventilation (Figure 6), smoke and fire gases are directed along the tunnel under the influence of forced air movement with speed exceeding the so-called critical speed (depending on the size of the fire) which prevents smoke backflow. This solution is most often used in unidirectional tunnels.

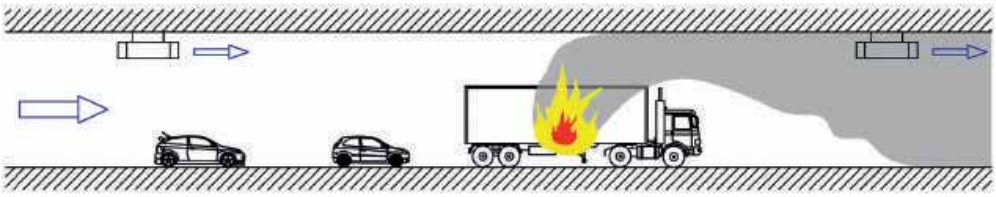


Figure 6. Control of smoke and fire gases with longitudinal ventilation

When using exhaust ventilation (Fig. 7), smoke and fire gases are removed directly from the place of fire origin. Extraction of smoke is achieved by maximizing the exhaust rate in the zone where the fire seat occurs, which prevents the stratification of smoke by longitudinal air velocities. This solution is used in bidirectional tunnels or in long unidirectional tunnels with heavy traffic.

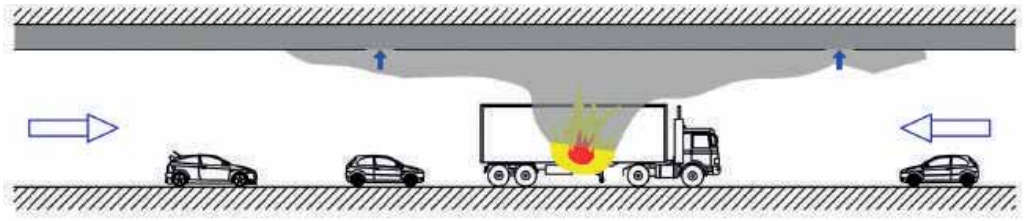


Figure 7. Tunnel with spot smoke extraction

3. ROAD TUNNELS IN POLAND – CURRENT SITUATION

So far, not many communication tunnels have been built in Poland. The existing facilities mainly serve rail transport. Nevertheless, the planned implementation of express and national roads requires the construction of road tunnel facilities. In the case of road tunnels, the following ones are currently in use: a tunnel on the S2 express road in Warsaw, a tunnel under the bottom of Martwa Wisła in Gdańsk, a tunnel Emilia in Laliki, a tunnel Wisłostrada, a tunnel under the roundabout of General Jerzy Ziętek in Katowice and 10 tunnels with a length less than 500 m. Further road tunnels are being built, such as the one along the national road No. 7, so-called Zakopianka, the tunnel under the Luboń Mały massif, the tunnel along the S3 express road on the Bolków-Kamienna Góra route, the tunnel on the route of the southern Warsaw bypass under the Ursynów district, where probably the longest urban road tunnel in Poland will be built. New tunnel facilities will also be built along the S19 road on the Via Carpatia international road route, where four tunnels will be built. Among tunnels investments in the West Pomeranian Voivodeship, two tunnels underwater obstacles are planned. The first one will be built under the Świna canal and will connect the islands of Uznam and Wolin, while the second one will connect (under the Odra river) the towns of Police and Święta, shortening the road from Police to Goleniów. It is also worth mentioning the two tunnels of the Węgierska Górka bypass and the next three tunnels that will be built as part of the construction of the Kraków Northern Bypass.

The list of road tunnels divided into: in use, under construction, in design, and development is summarized in Table 2. The subject matter of analysis in this article is road tunnels whose length exceeds 500m, which according to legal regulations requires the use of ventilation systems for tunnel ventilation and excludes the use of natural ventilation.

Table 2 gives the length of the tunnel or its tubes. While the first six tunnels are in use and accurate data can be provided, the information on others will be based on current knowledge because they are either under construction or in the design or development process.

Table 2. Characteristics of road tunnels in Poland (own study)

It	Name of tunnel	Location	Length	No of lanes (in tube)	Type	Ventilation system
1.	Warsaw Southern Bypass - S2 express road	Warsaw	2355 m	3	Urban	Transverse
2.	Under Martwa Wisła	Gdańsk	1377 m	2	Urban	Semi-transverse
3.	Wisłostrada	Warsaw	930 m /889 m	3	Urban	Longitudinal
4.	Emilia Δ	Laliki	678 m	2	Extraurban	Longitudinal
5.	Under the General J. Ziętek Roundabout	Katowice	657 m /650 m	3	Urban	Longitudinal
6.	Drogowa Trasa Średnicowa - Road Bypass	Gliwice	493 m	2	Urban	Longitudinal
7.	Under Luboń Mały - S7 express road	Luboń Mały	2058 m	2	Extraurban	Semi-transverse*
8.	Express road S3	Bolków–Kamienna Góra	2300 m	2	Extraurban	Longitudinal *
9.	Express Road S19	Rzeszów	2025 m	3	Extraurban	Semi-transverse *
10.	Under Świna Δ	Świnoujście	1440 m	2	Urban	Semi-transverse *
11.	Tunnel of the S1 express road	Białożyński Groń	984 m/975 m	2	Extraurban	Longitudinal *
12.	Express Road S1	Barania Góra	834 m/807 m	2	Extraurban	Longitudinal *
13.	Express Road S52	Zielonki	870 m	3	Urban	Longitudinal **
14.	Express Road S52	Batowice	653 m	3	Urban	Longitudinal **

** - Under construction,* *** - In design,* *Δ – Bidirectional traffic*

According to the designers of road tunnels, the key parameter is the length of the tunnel, which affects the adoption of a proper ventilation system solution. The analysis of the list shows that the tunnel on the S2 express road in Warsaw is currently the longest tunnel being in use (2355 m). The length of the other four tunnels does not exceed 1500 m. There are four tunnels under construction or in design that have from 1440 to 2355 m in length. In Polish conditions, tunnels are built as two-tube, which allows the achievement of unidirectional traffic. Most tunnels have at least two or three lanes in each tube and often an emergency lane. In tunnels being currently in use, both unidirectional and bidirectional, with a length of up to 1000 m, longitudinal ventilation with jet fans suspended under the ceiling of the tunnel was used. Fresh air is fed into the tunnel through the inlet portal and discharged through the outlet portal. The exception is the 1377 m long tunnel under the Martwa Wisła, which has a semi-transverse ventilation system, where the air is supplied through ducts under the roadway and discharged by the tunnel tube in the direction of vehicle traffic. In this system, fresh air is gradually supplied through the air vents along the entire length of the tunnel, on the right side of

the road. In normal car traffic, the airflow forces the piston-like movement of moving vehicles, which is sufficient and the jet fans are not started. In the tunnel, air flows in the direction of travel of the vehicles, which results in a longitudinal airflow. The difference from the classic longitudinal ventilation system is that the air is supplied along the entire length of the tunnel. In tunnels on S7 and S19 expressways (respectively 2058 m and 2025 m long) located outside urban areas, ventilation systems are designed in which air is supplied through the ducts under the roadway and discharged through the tunnel tube in the direction of movement of vehicles (semi-transverse ventilation). Only on the S3 express road in the 2300 m long tunnel a classic longitudinal ventilation system is designed. The justification for such a solution may be the low traffic alone. On the other hand, for unidirectional two-tube tunnels, which are planned along S1 and S52 expressways, and whose length is up to 1000 m, regardless of the location (urban / extra-urban), longitudinal ventilation is planned.

Only two tunnels: Emilia (in use) and the one under Świna (planned) are tunnels with one tube and have been designed as bidirectional. Because the Emilia tunnel is shorter than 1000 m, according to regulations [4], it was possible to use longitudinal ventilation. In bidirectional tunnels, in the event of a fire and vehicle traffic being stopped, vehicles will be on both sides of the fire seat. Therefore, in the case of a bidirectional tunnel, a local (spot) extraction ventilation solution should be used in order to protect the tunnel users. This solution was used in the tunnel under Świnna with a length of 1440 m. Because the tunnel is bidirectional and has been designed in such a way that fresh air is supplied through the portal and the exhaust air is discharged via a ceiling duct. In the event of a fire, in the danger zone, three or four smoke vents are opened in the plane of the sub-ceiling duct, into which fumes and fire gases are discharged. The spread of smoke is limited and allows the evacuation of users on both sides of the fire seat as well as rescue and firefighting operations. A sprinkler system has also been designed in the Świna tunnel to protect the tunnel structure against damage.

4. VENTILATION ANALYSIS FOR THE SELECTED EXAMPLE

4.1. Description of the software

Ventsim Design is a software package for the design and examination of ventilation networks. The software allows for obtaining information about airflow, pressure, heat, gases, smoke, fire, and many other necessary results. It is mainly used for ventilation systems in the underground mines as well as road and rail tunnels.

4.2. Subject of the analysis

The tunnel was designed as two tubes from east to west. It is located in western Krakow. The concept provides for the implementation of a new road connection between the highway and the city. A total length is approx. 1200 m. Each of the two parallel tunnel structures will have 2 lanes. The aisles of the tunnel are connected by evacuation passages. The assumed mean cross-sectional area is 72 m2. The list of tunnel parameters for individual sections is presented in Table 3. The leveling heights of the tunnel sections and the calculated gradients are presented in Table 4.

Table 3. Parameters of the individual sections of the tunnel/division according to the slope of the tunnel

Tunnel section	Section length, m	Cross-sectional area, m^2	Perimeter of the tunnel, m
Section I	75,00	72	36
Section II	93,44		
Section III	155,96		
Section IV	518,69		
Section V	205,00		
Total length:	1048		

Table 4. Altitude ordinates in the tunnel

Tunnel section	Cross-section	Altitude elevation, m.a.s.l.	Length, m	Gradient / Ascent radius
Section I	East Portal	205,40	75,00	r= 6000m
	$P_{I/II}$	203,45		
Section II	$P_{I/II}$	203,45	93,44	-3.40%
	$P_{II/III}$	200,27		
Section III	$P_{II/III}$	200,27	155,96	r= 4000m
	$P_{III/IV}$	198,01		
Section IV	$P_{III/IV}$	198,01	518,69	0.50%
	$P_{IV/V}$	200,60		
Section V	$P_{IV/V}$	200,60	205,00	r= 6000m
	West Portal	205,20		

The meteorological data determined on the basis of a typical meteorological year from the Kraków-Balice meteorological station are presented in Table 5.

Table 5. Characteristic meteorological data for the location of the tunnel

Parameters	Value
Average annual air temperature	+8,3 oC
Maximum air temperature	+32,9 oC
Minimum air temperature	-20,2 oC
Average wind speed	2,5 m/s
Maximum wind speed	14,0 m/s
Average wind speed from west	2,7 m/s
Maximum wind speed from west	8,0 m/s
Average wind speed from the east	4,0 m/s
Maximum wind speed from the east	14,0 m/s

Each aisle of the tunnel is equipped with 11 pairs of jet fans with a diameter of 800 mm, a thrust of 750 N, and an electric power of 30 kW. The pairs of fans will be spaced every 108 m.

4.3. Results

4.3.1. Calculations of ventilation parameters

Firstly, to simulate the operation of longitudinal ventilation in the tunnel, a model in the VentSim software was prepared. Figure 8 shows the distribution of airflow volume in the tunnel for the designed arrangement of jet fans in the tunnel. A color scale was used to highlight the value ranges of the airflow in each of the tunnel segments.

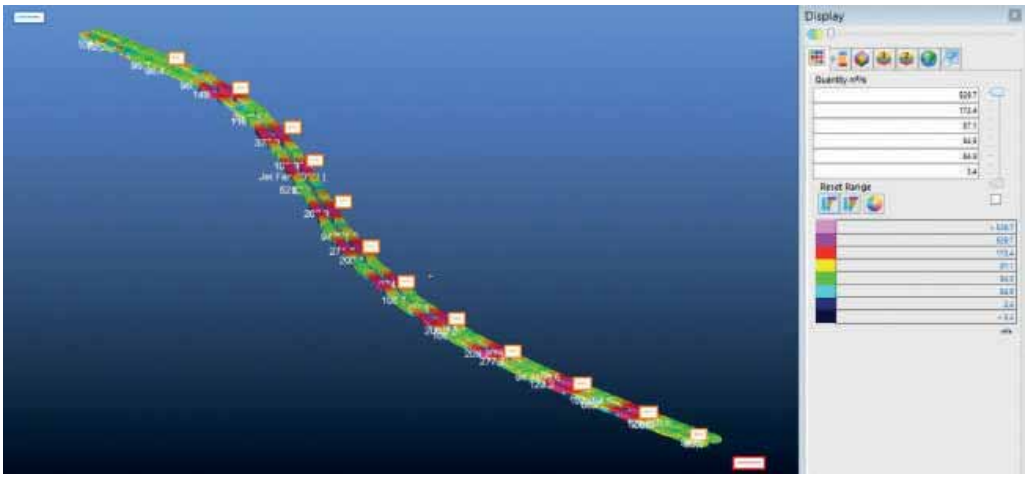
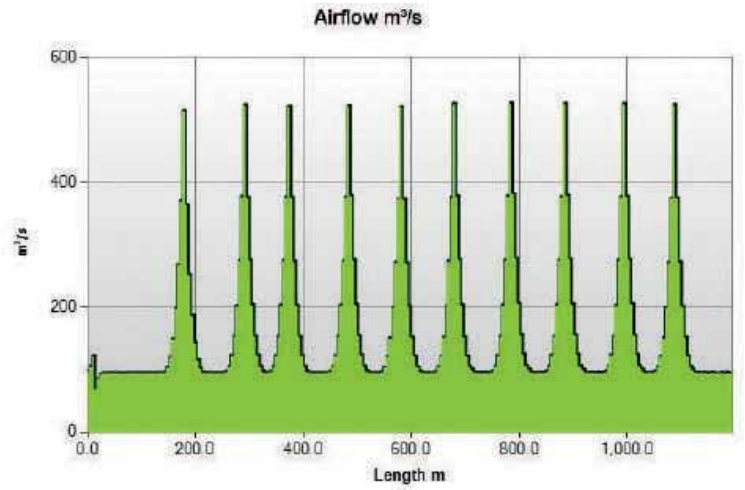


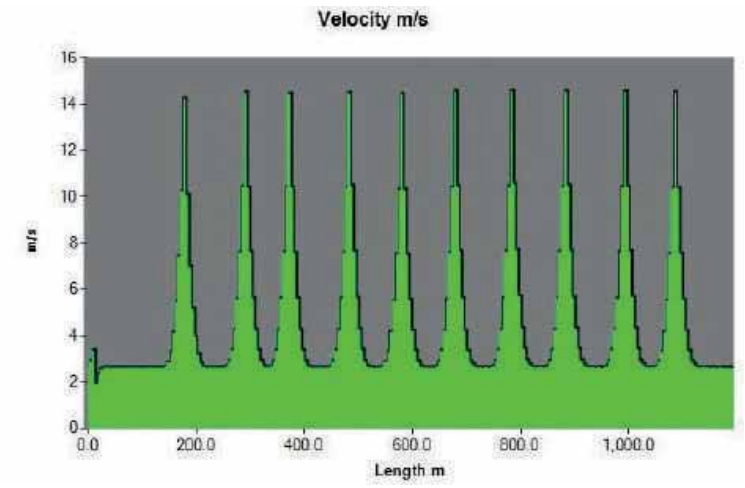
Figure 8. A geometrical model with the airflow volumes distribution.

Figure 9 shows changes in the tunnel for airflow, air velocity, and pressure loss over the length.

a)



b)



c)

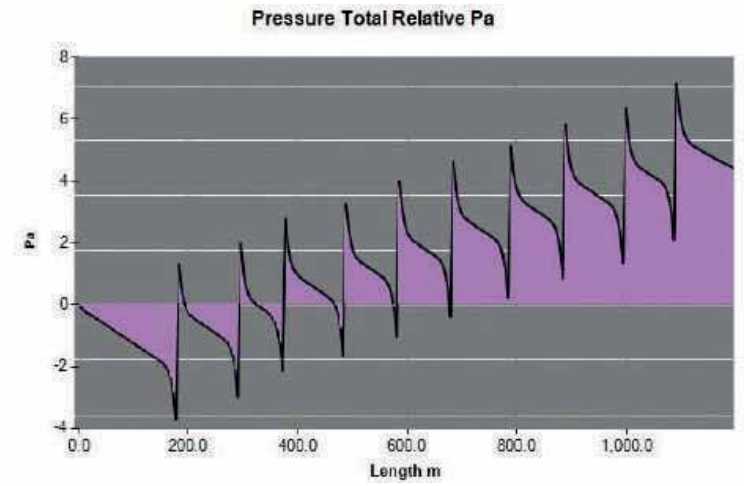


Figure 9. Changes in a) airflow, b) velocity and c) total pressure distribution in Ventsim Design software

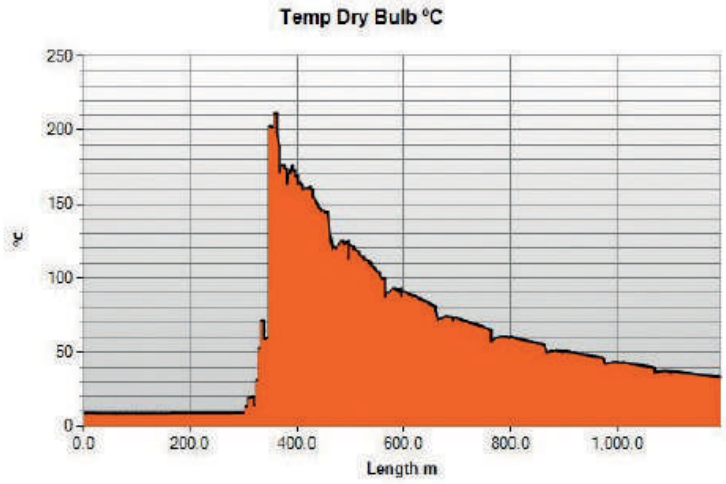
4.3.2. Ventilation analysis in case of fire

The next stage of the analysis is the calculation of ventilation system operation in the case of fire. An accident of a gasoline tanker, which occurred in 1/3 of the tunnel length from its inlet portal, was assumed. The calculations considered the impact of fire depression on the longitudinal ventilation system. A fire development curve was assumed as follows:

- 0 min - 5 min - Start of fire - burning gasoline at a rate of from 0 to 4 150 kg/h,
- 5 min - 2 hours - constant fire - burning gasoline at the rate of 4 150kg/h,
- Peak fire heat release rate: 50 MW,

Figure 10 shows the distribution of the temperature and CO concentration in the tunnel for a developed fire. According to the results, the temperature in the fire location reaches 210 °C, and the CO concentration accounts for 1150 ppm. The analysis shows that the temperature decreases significantly with the distance from the fire location. It proves that the longitudinal ventilation system works properly. The CO concentration does not change because the fans convey a constant mass stream of air and fire gases through the tunnel.

a)



b)

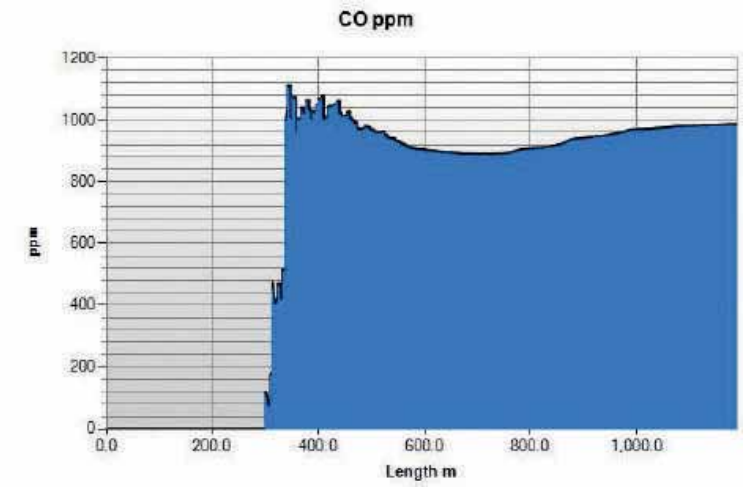
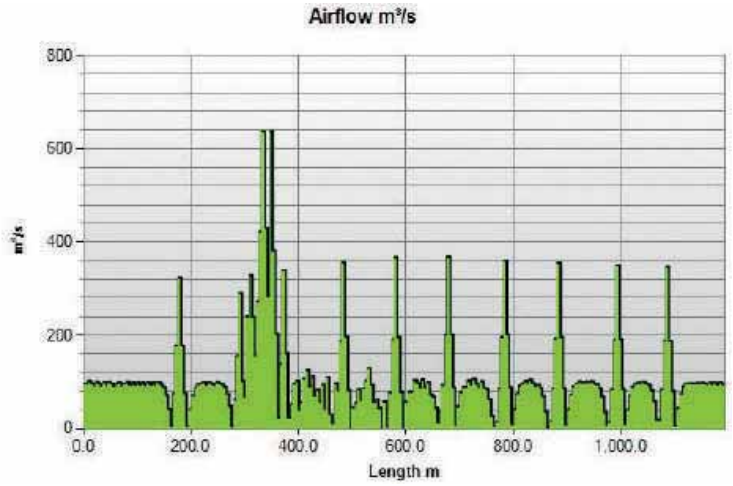


Figure 10. Changes in the a) temperature and b) carbon monoxide concentration over the length of the tunnel

Figure 11 shows the changes in the airflow volume and velocity over the tunnel length for a developed fire. The analysis shows that there is an increase in the volume and velocity of air locally in the fire location. Nevertheless, the entire ventilation system ensures proper operation and removes fire gases.

a)



b)

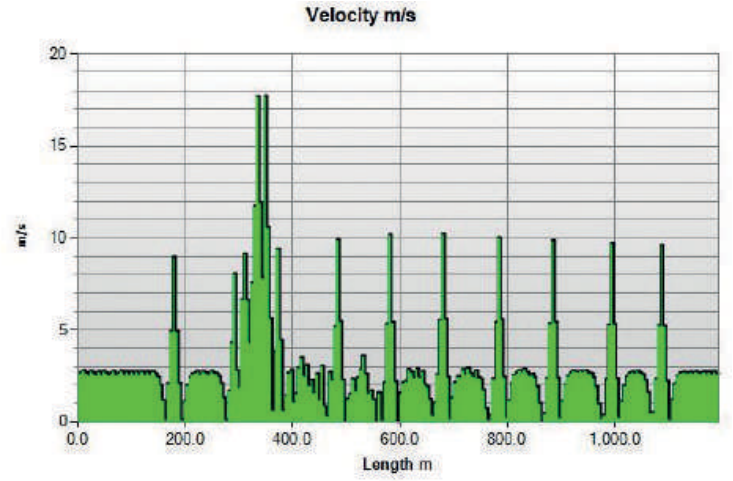


Figure 11. Changes in the a) airflow volume and b) velocity of the air over the length of the tunnel during a developed fire

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Road tunnel ventilation in vehicle traffic conditions should provide the necessarily required air volume flow having in mind the dilution of harmful exhaust components and for ensuring adequate visibility. When a fire occurs, ventilation is started in fire mode and its purpose is to provide a controlled flow of smoke and fire gases and to discharge them outside. The creation of a controlled flow of smoke and fire gases enables the evacuation of users with the minimal smoke amount in the escape routes and prevents smoke from accessing the routes for rescue teams leading to the place of the accident.

Currently, in Poland there are no detailed guidelines for the design of ventilation systems in road tunnels, only [4] indicates the type of ventilation system in relation to the length of the tunnel (longitudinal, semi-transverse, and transverse ventilation). In Polish conditions, tunnels are built as two-tube, which allows for unidirectional traffic. Only two tunnels: Emilia (in use) and under Świnna (designed) are tunnels with one tube and were designed as bidirectional.

As the presented analysis showed, the use of the VentSim software allows for the selection of an appropriate ventilation system and verification of its correct operation. It is especially essential, as in this case, at the stage of designing the concept of the ventilation system. The carried-out simulations make it possible to determine the velocity, airflow volume, and what is more, the distribution of pollutants or the temperature along the length of the entire tunnel. Considering the specific characteristics of the tunnel and the meteorological conditions is crucial here and allows to avoid design errors already at the initial design stage. The use of this methodology allows for simplifying the ventilation process while increasing the reliability of the system operation.

BIBLIOGRAPHY

[1] Law of 7 March 2007 on revision of the law - Road traffic law (Journal of Laws 2007, no 57, item 381).

[2] Directive 2004/54 / EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network.

[3] Regulation of the Minister of Infrastructure of 1 August 2019 amending the ordinance on technical conditions to be met by road engineering facilities and their location (Journal of Laws 2012, item 608). 2019 item 1642).

[4] Ordinance of the Minister of Transport, Construction and Maritime Economy of May 16, 2012 amending the ordinance on technical conditions to be met by road engineering facilities and their location (Journal of Laws 2019 item 1642) 2012, item 608).

[5] AUSTRIAN GUIDELINE 2014 - RVS 09.02.31 Tunnel Equipment, Ventilation, Basic Principles.

[6] NCHPR, 2017 - Report no 836: Guidelines for Emergency Ventilation Smoke Control in Roadway Tunnels, ISBN 978-0-309-44611-2.

[7] NCHPR, 2011 - Report no 425, Design Fires in Road Tunnels, ISBN 978-0-309-14330-1

[8] BEARD A. 2012 - Handbook of Tunnel Fire Safety, 2nd Edition.

[9] INGASON H., LI Y.Z., 2011 - The maximum ceiling gas temperature in a large tunnel fire, „Fire Safety Journal" Vol. 46, No. 4.

[10] INGASON H., LI Y. Z., LONNERMARK A., 2015 - Tunnel Fire Dynamics, New York: Springer.

[11] PIARC 1999 - Fire and Smoke Control in Road Tunnels, 05.05.B, La Defense, France.

[12] LACROIX, D., 1997 - New French Recommendations for Fire Ventilation in Road Tunnels, 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Publication 27, J. Gillard, Ed., BHR, Aosta Valley, Italy.

[13] NFPA 502, 2014 - Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, NFPA, Quincy

ALGORITHMS AND CONTROL LOGICS FOR TUNNEL VENTILATION SYSTEMS

Nicolò Faggioni
DBA PRO. S.p.A. – Italy
Francesca Giauni
DBA PRO. S.p.A. – Italy
Fabio Santucci
Movyon S.p.A. – Italy
Alice Bisirri
Movyon S.p.A. – Italy

Safety project in road infrastructures, especially for tunnels, cannot ignore the study of critical scenarios characterized by fire events and their aftermaths. The designer bases his risk assessments for the structure and its occupants, on his technical experience, on the legislation and on the technical publications.

Consolidation of engineering performance methodology (also known as Fire Safety Engineering - FSE) in the study of fire detection and fire prevention eased the diffusion of quantitative analysis tools. These tools allow the assessment of varying degrees of sophisticated fire safety systems and their interactions with the installations. Among the most commonly used tools, CFD techniques take up a prominent position in the analysis of exposure to the risk caused by the presence of fire events, by means of smoke and heat propagation studies and with the identification of additional safety measures.

FSE, as a means for the above purposes, can also be applied as a support of fire engineering design backing the designer in the most important choices regarding risk prevention and mitigation.

In the specific case of tunnels, FSE approach and CFD analysis can be conducted in order to define the automatic procedures that rule the ventilation strategies in emergency situations, and determine automatic fire fighting ventilation procedures in order to safeguard the users involved.

CFD verification and reliability results are often difficult to argue, because in general the simulation with computational tools is affected by intrinsic error; in order to minimize the uncertainty related to calculation results and to validate the CFD verification tool, fire tests can be set up in tunnel. The comparison of the measures implemented during the real test with the results of the CFD verification allow to validate the methodology used in the project, thereby consolidating the reliability of the results and the design choices adopted.

ALGORITMOS Y LÓGICA DE CONTROL PARA SISTEMAS DE VENTILACIÓN DE TÚNELES

El proyecto de seguridad en las infraestructuras viarias, especialmente en los túneles, no puede ignorar el estudio de los escenarios críticos caracterizados por los eventos de incendio y sus secuelas. El proyectista basa sus evaluaciones de riesgo para la estructura y sus ocupantes, en su experiencia técnica, en la legislación y en las publicaciones técnicas.
La consolidación de la metodología de rendimiento de ingeniería (también conocida como Ingeniería de Seguridad contra Incendios - FSE) en el estudio de la detección y prevención de incendios facilitó la difusión de herramientas de análisis cuantitativo. Estas herramientas permiten evaluar distintos grados de sofisticación de los sistemas de seguridad contra incendios y sus interacciones con las instalaciones. Entre las herramientas más utilizadas, las técnicas de CFD ocupan un lugar destacado en el análisis de la exposición al riesgo causado por la presencia de eventos de incendio, mediante estudios de propagación de humo y calor y con la identificación de medidas de seguridad adicionales.
El FSE, como medio para los fines mencionados, también puede aplicarse como apoyo al diseño de la ingeniería contra incendios, respaldando al diseñador en las decisiones más importantes relativas a la prevención y mitigación de riesgos.
En el caso concreto de los túneles, el enfoque FSE y el análisis CFD pueden llevarse a cabo para definir los procedimientos automáticos que rigen las estrategias de ventilación en situaciones de emergencia, y determinar los procedimientos automáticos de ventilación contra incendios para salvaguardar a los usuarios implicados.
Los resultados de la verificación CFD y de la fiabilidad suelen ser difíciles de argumentar, ya que, en general, la simulación con herramientas computacionales se ve afectada por un error intrínseco; para minimizar la incertidumbre relacionada con los resultados de los cálculos y validar la herramienta de verificación CFD, se pueden establecer pruebas de incendio en túnel. La comparación de las medidas aplicadas durante la prueba real con los resultados de la verificación CFD permiten validar la metodología utilizada en el proyecto, consolidando así la fiabilidad de los resultados y las opciones de diseño adoptadas.

ALGORITHMES ET LOGIQUES DE COMMANDE POUR LES SYSTÈMES DE VENTILATION DES TUNNELS

Le projet de sécurité des infrastructures routières, en particulier des tunnels, ne peut ignorer l'étude des scénarios critiques caractérisés par des événements d'incendie et leurs séquelles. Le concepteur fonde son évaluation des risques pour la structure et ses occupants, sur son expérience technique, sur la législation et sur les publications techniques.
La consolidation de la méthodologie de l'ingénierie de la performance (également connue sous le nom de Fire Safety Engineering - FSE) dans l'étude de la détection et de la prévention des incendies a facilité la diffusion d'outils d'analyse quantitative. Ces outils permettent d'évaluer des systèmes de sécurité incendie plus ou moins sophistiqués et leurs interactions avec les installations. Parmi les outils les plus utilisés, les techniques CFD occupent une place prépondérante dans l'analyse de l'exposition au risque causé par la présence d'événements d'incendie, par le biais d'études de propagation de la fumée et de la chaleur et avec l'identification de mesures de sécurité supplémentaires.
L'ESF, en tant que moyen de réaliser les objectifs susmentionnés, peut également être appliquée en tant que soutien à la conception de l'ingénierie incendie, en aidant le concepteur à faire les choix les plus importants en matière de prévention et d'atténuation des risques.
Dans le cas spécifique des tunnels, l'approche FSE et l'analyse CFD peuvent être menées afin de définir les procédures automatiques qui régissent les stratégies de ventilation dans les situations d'urgence, et de déterminer les procédures de ventilation automatique anti-incendie afin de sauvegarder les utilisateurs concernés.
Les résultats de vérification et de fiabilité CFD sont souvent difficiles à argumenter, car en général la simulation avec des outils de calcul est affectée par une erreur intrinsèque ; afin de minimiser l'incertitude liée aux résultats de calcul et de valider l'outil de vérification CFD, des essais de feu peuvent être mis en place en tunnel. La comparaison des mesures mises en œuvre lors de l'essai réel avec les résultats de la vérification CFD permet de valider la méthodologie utilisée dans le projet, consolidant ainsi la fiabilité des résultats et des choix de conception adoptés.

INTRODUCTION

During the last few years, as part of the planned upgrade of the technological equipment along the national motorway network managed by Autostrade per l'Italia (ASPI), the activities have been completed leading to the installation, in all the tunnels involved, of control and automated management systems for ventilation. Specifically, the activities involved the development and implementation of all the software planned to support systems automation and among these, the systems to set the longitudinal tunnel ventilation systems stand out. The ventilation algorithms, grown as a result of the collaboration between MOVYON S.p.A. and DBA PRO. S.p.A., once installed on the tunnel IT systems, allow the complete automation of the installed systems; the most important of these are the fire safety control systems, which are now able to autonomously initiate and manage the emergency procedures especially during fire scenarios. The equipment that is primarily called upon to deal with the management of danger in the tunnel, is the ventilation system which is required to manage the emergency according to predetermined schemes and procedures. The procedures drawn up by DBA PRO, installed and loaded by MOVYON on Tunnel IT System, while providing for compliance with the performance and functional requirements proposed by the international standards and by the most authoritative guidelines in terms of fire safety, they bring innovation in strategies for approaching the hazard management by increasing the overall effectiveness of protection measures.

ASPI NETWORK

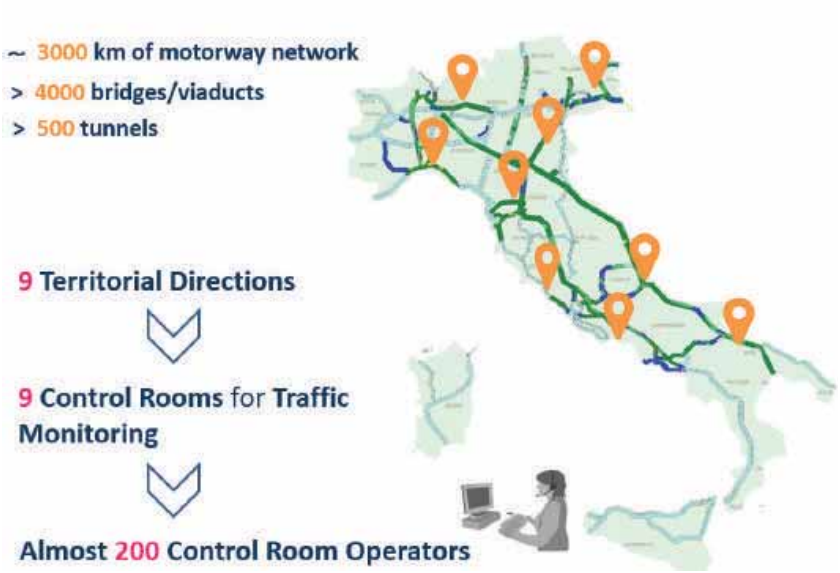


Fig. 1 – ASPI Network and its territorial Direction Centers

Autostrade per l'Italia manages over 3000 km of motorway throughout the country with more than 500 tunnels, 80% of which are more than 500 m long, and almost 10% of them, also equipped with a mechanical ventilation system for fire safety purposes. The network is divided into 9 territorial directorates (Direzioni di Tronco), each of them equipped with a 24/7 Control Room and a Systems Monitoring Centre (CEM). In particular, the first one is in charge of managing traffic-related scenarios (construction sites, accidents, mechanical assistance to users, etc.), the second one is responsible for monitoring fault or alarm reports occurring on the systems.

Traffic-related scenarios, whether accidental or planned, are managed by the Control Room and communicated to external channels, such as road users (via messaging on Dynamic Message Signs), Police, Fire Brigade, Autostrade per l'Italia website, etc.

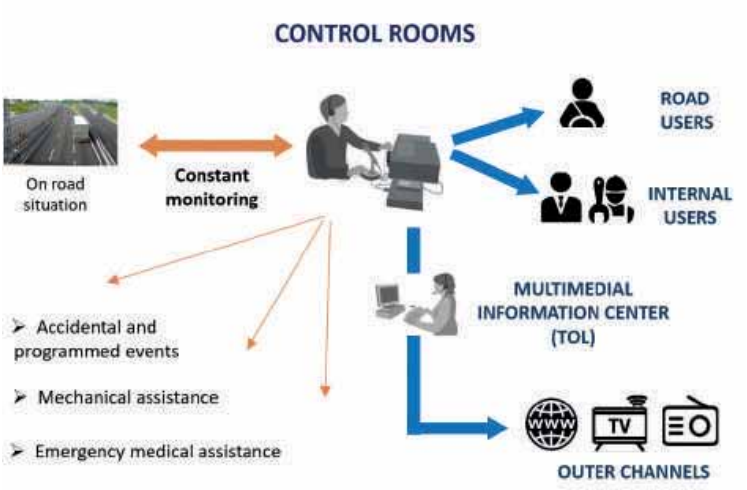


Fig. 2 – Road traffic control system (communication flow chart) SALA RADIO ASPI

TUNNEL REMOTE CONTROL ARCHITECTURE

The remote control system of a tunnel of the ASPI network is characterized by the set of technological systems, installed in the field, capable of detecting and managing disturbances and events related to traffic. The study of the system architecture and its applications up to the final programming on the tunnel systems is managed by MOVYON with its highly qualified staff. In particular, the remote control architecture is made up of three layers, two of which are composed of peripheral systems and one of a central system: PLC (programmable logic controller), SCADA (supervisory control and data acquisition), central system. PLCs are installed inside technical buildings, tunnel niches and inside shelters/emergency pathways. Communication between the various PLCs takes place via an internal LAN network between the technical rooms and a fieldbus network consisting of a series of fibre optic rings connecting the main cabinets in the technical rooms to the field cabinets. The PLCs are responsible for acquiring data and alarms from the installations in the field, transmitting them to the higher level, and managing them within the automated systems. In particular, all the algorithms that automatically manage fire situations are implemented on the PLCs: ventilation, pressurisation, drainage (hazardous liquids) algorithms. The automation system is completed by a supervisory station (SCADA server) in redundant master/slave mode, which collects data from the field and provides interfaces to the outside both to communicate them to Autostrade per l'Italia's central system and to issue commands to the PLCs. From the SCADA user interface it is possible to visualise and control:

- The current status of the system, via web pages;
- Current and history of alarms;
- Measurements of the various magnitudes and system variables;
- Trends of previous variables;
- Configuration of the parameters of the various systems;
- Start-stop command of the individual plants that can be controlled.

The scada system provides an interface for data exchange between the periphery and the central system. In particular, the modules integrated in the system perform the following functions:

- collection of events, functional states, alarms and measurements to be transferred in xml format to the central system. this information is sent to the central system every 60 seconds;
- receiving commands from the central system. each command is forwarded to the scada which executes it and provides feedback on the execution. these commands act on lighting, ventilation, pressurisation, light signals and force the maintenance status of an installation;
- receiving alarms from cameras. messages from the video analysis system are collected on a tcp/ip channel and forwarded to the scada, which uses them in its local algorithms.

Fig. 3 – Typical scada interface view (Autostrade TECH/MOVYON release)

The use of SCADA allows the development of systems with a redundant and distributed architecture. As it has two redundant servers, it guarantees continuity in the supervision service: when the primary server is no longer active, the secondary server comes into operation, which goes back on stand-by when the primary becomes operational again. Finally, the central system receives data from SCADA and is responsible, among other things, for transferring traffic alarms to the application used by the Control Rooms for monitoring the motorway sections (SIV - Sistema Integrato Viabilità/Integrated Traffic System).

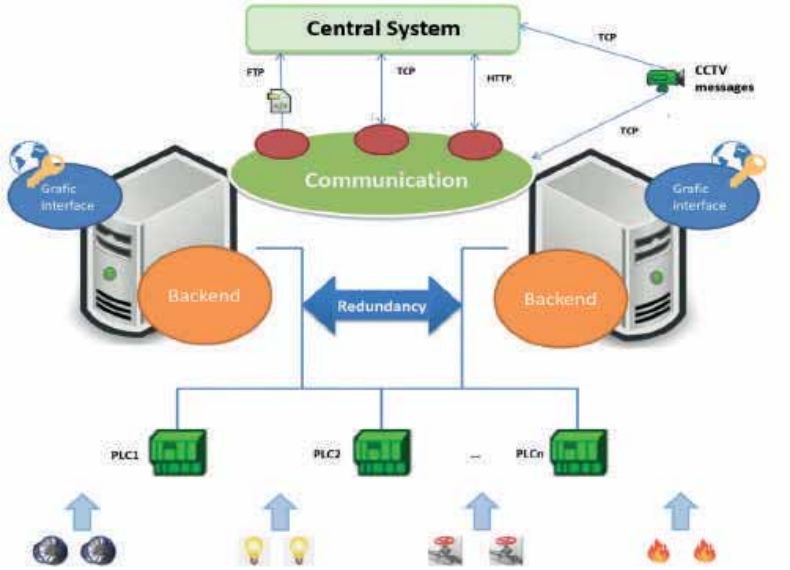


Fig. 4 – Central system control and its functions

PURPOSE OF THE SAFETY PROCEDURES AND MAIN FUNCTIONS

Safety automatic procedures installed in the tunnel systems and subject of this paper aim to control ventilation in all operating scenarios and therefore are proposed:

- in normal operating scenarios: to limit the concentrations of pollutants in the tunnel, maintaining as far as possible the healthiness of the air and the visibility conditions suitable for users. In this case, the proposed procedures assume the controlled concentration of carbon monoxide (CO), particulate matter (OP), and if expected, nitrogen oxides (NO2-NOX) since they constitute the baseline pollutants in the tunnel;
- in emergency scenarios: to ensure flow orientation and dilution of tunnel combustion products. The procedure must ensure the preservation of safety for users and ease the process of exodus from the tunnel while facilitating any operations required by rescue operators.

Control and regulation software for ventilation systems has therefore been designed to perform, among others, the following main functions:

- to define the optimal operating configuration for the ventilation system under normal operating conditions and emergency conditions;
- to manage the sequences for fans start-up time;
- to acquire alarm signals from fire detection systems;
- to acquire all the quantities sampled by the sensors installed in the field.

The ventilation system can be managed manually using the operator interface in the SCADA environment or in fully automatic mode, leaving the PLC software with absolute operating autonomy. In this case, both the ordinary and emergency operating scenarios are ruled by the logic and strategies implemented in the systems and the direct supervision by the operator is not required. It is therefore the task of the general control system, by interrogation of the sensors in the field, of video systems and of fire detection, to determine the nature of the ongoing operating scenario in the tunnel and to define the necessary ventilation measures.

FIRE VENTILATION: TEORETHICAL STRATEGY

The fire ventilation control subroutine is aimed to control the ventilation flow in the tunnel, by adjusting the velocity of the longitudinal flow according to a predetermined time course. In particular, the regulation model distinguishes between a first so-called "self-evacuation" phase in which the target is represented by the maintenance of the stratification of the smoked produced by the fire, and a second "washing" phase in which the ventilation flow, driven at higher regimes, allows the control of smoke propagation and the prevention of back-layering. In this second phase, in fact, we try to ensure the presence of a free smoke area zone inside the tunnel upstream to the fire allowing free access to rescue and/or firefighting operators. Velocity control strategies are essentially based on the following principles:

- to control the longitudinal airflow by retro-actuating the air velocity value measured/detected upstream of fire (at a sufficient distance from the outbreak);
- initially maintain (first phase) a minimum airspeed level (< 1.5 m/s) limiting smoke propagation towards vehicles;
- provide subsequently a more sustained longitudinal ventilation (> 3 m/s);
- prevent the use of jet-fans in the fire area and timely deactivate those that may be active at the time of the fire detection;
- differentiate strategies in terms of initial velocities detected in the tunnel i.e. priority of intervention to the upstream jet-fans in case of positive and negative speed.

REFERENCE STANDARDS AND GUIDELINES

The design of road tunnel safety has always been based on studies and researches carried out over the years in the major European and American projects, including the results of the Eureka tests as well as those conducted in the Memorial Tunnel. The main results have been translated and incorporated into the legislations of those States most sensitive and interested in the topic of tunnel fire safety and moreover in the guidelines issued over time by the PIARC World Road Association and its C5 committee. Nowadays, the main references implemented by designers for the project of fire safety in tunnels are:

- Road Tunnels: Operational Strategies for Emergency Ventilation. PIARC Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operation [Rif.1];
- Road And Transportation Research Association Working Group Traffic Routing And Road Safety. Regulations for the equipment and operation of road tunnels – RABT [2];
- APPENDIX N°2 to interministerial circular n° 2000-63 (France) of August 2000 relating safety of tunnels in the national highways network - Technical Instruction Relating To Safety Measures In New Road Tunnels (Design And Operation) [3];
- Fire And Smoke Control In Road Tunnels - PIARC World Congress 1999 [4];
- NFPA 502 - Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways [5].

All technical literature roughly agree with ventilation activation strategies on the subject of:

- in the first phase of fire retention of smoke stratification in presence of congested traffic/ blocked/bidirectional;
- no use of fans in the area of the outbreak;
- higher ventilation with at least the critical speed in case of absence of vehicles after the outbreak.

According to the entire above, tunnel ventilation strategies are therefore different in order to guarantee the reliability of the procedures both in fluid traffic scenarios and in blocked and/or bidirectional traffic. In fact, direction and intensity of ventilation are parameters related to the nature of the phenomenon of fire detected, but above all to the type of traffic actually present in the tunnel at the time of detection of the fire event.

Tab. 1 – Best Practice Fire Ventilation Strategy (bidirectional traffic tunnel)

Rif.	Bi-Directional traffic	
1	PHASE A: self-evacuation: limit the air speed to maintain the smoke stratification	The use of jet-fans in the area of the outbreak is not recommended. To associate priority of intervention to the jet-fans before rather than after
	PHASE B: adjust the ventilation speed according to the needs of the rescue / fire-fighting process (i.e.: 3.0 m/s)	
2 - 3	Initially the fans speed must be set to the minimum permissible value in order to maintain the best possible stratification. Subsequently, the ventilation system is required to allow the smoke to be pushed in a single direction (higher than the critic speed=3 m/s)	
4	Evacuation Phase: limit air speed to maintain the smoke stratification	The use of jet-fans in the area of the outbreak is not recommended.
	Fire-Fighting phase: adjust the ventilation according to the needs of the rescue/fire-fighting preventing the back-layering of smoke. the ventilation direction can be changed	
5	Keep undisturbed the smoke stratification. The longitudinal speed of the ventilation must be kept within contained values.	Preventing the smoke de-stratification avoiding the activation of jet-fans in the area of the outbreak.

Tab. 2 – Best Practice Fire Ventilation Strategy (unidirectional traffic tunnel)

Rif.	Unidirectional Traffic	
	Congested/Jammed traffic (after the fire)	Fluid traffic
1	Strategy as with bi-directional traffic	Ensure a minimum speed of the ventilation flow that exceeds the critical speed of the scenario
2 - 3	Ventilation must be initially maintained at a minimum level (1-2 m / s) to minimize upstream propagation of smoke. Later, more sustained ventilation must be provided	Ventilation must be started as soon as possible and a minimum speed of at least 3 m/s in the traffic direction must be guaranteed
4	Strategy as with bi-directional traffic	Prevent smoked back-layering ensuring a sustained ventilation in the direction of traffic
5	Strategy as with bi-directional traffic	

In particular, the 4 elementary macro events to which all the ventilation scenarios are summarized (schematized in the following matrix) differ essentially according to the type of traffic present in the tunnel and the air velocity detected by the environmental monitoring systems. The association of the two variables determines the classification of the 4 macro scenarios (A, B, C, D) on the basis of which the condition of mono-directional

traffic blocked after the fire is equated in terms of risk to the two-way traffic situation. In case of traffic flowing after the outbreak (cases A and B), the flow of ventilation will be in line with the direction of traffic; in case of one-way traffic congested/blocked or bidirectional (cases C and D), in order not to compromise the effectiveness of the safety measures, the direction of the ventilation flow will be in principle (first phase) in agreement with the initial air direction ventilation as measured at the alarm event.

Maintaining the speed sign is an aspect that protects the safety and increases the effectiveness of the protection measures since the maintenance of the stratification cannot ignore the maintenance of the speed direction and the regulation must only slow down the ventilation flow. In the first ventilation phase, the ventilation system can then be required to operate counter-thrust to reduce the initial speed (either positive or negative) to the target value between 1 and 2 m / s. After a variable typical time from the onset of the fire event, the situation in the tunnel is the one represented by the 4 scenarios below:

Tab. 3 – Classification for fire scenarios

Tunnel traffic mode					
Monodirectional traffic				Bidirectional traffic	
Traffic condition after the fire					
Fluid Traffic		Congested Traffic		Fluid/Congested Traffic	
W_air > 0	W_air < 0	W_air > 0	W_air < 0	W_air > 0	W_air < 0
A	B	C	D	C	D
W_air = initial/residual tunnel airflow velocity (fire detection)					

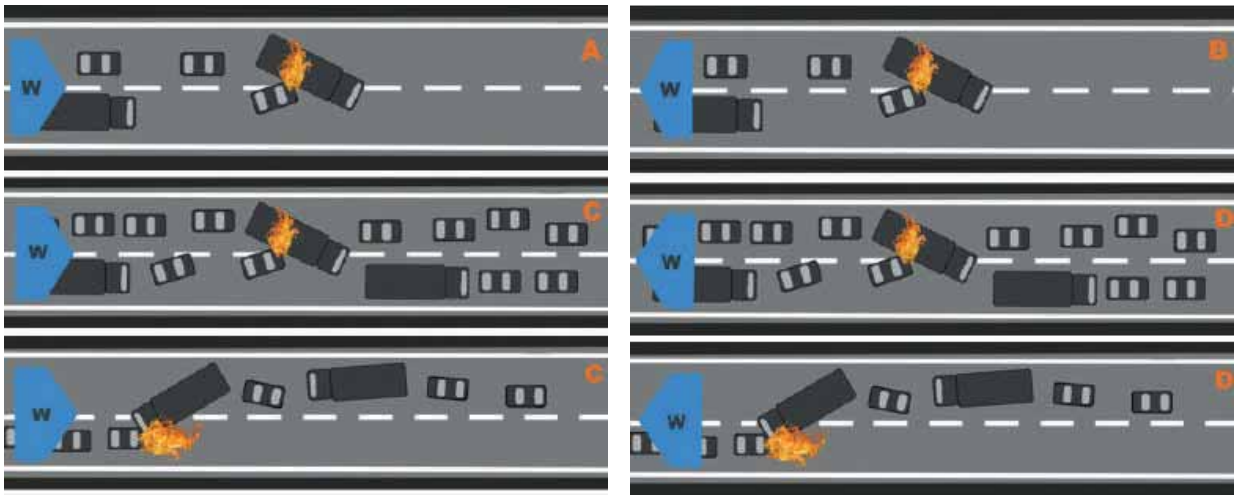


Fig. 5 – Main classification for fire scenarios

Considering what has been defined above, the scenario that, among those previously described, plays a decisive role in safety management is undoubtedly the one indicated under B, in which the greatest critical points concern the presence of the users right before the outbreak; this particular case is not fully defined in the relevant literature, presumably because of its uncommonness, but it is nevertheless very dangerous because it involves, in case of fluid mono-directional traffic where, due to an initial negative air flow or due to an unfavo-

rable longitudinal slope (downhill fire), the initial propagation of smoke is such that it compromises the safety of the blocked user right before the outbreak. In this case the main topic is to determine how to manage the ventilation of the initial phase in order not to compromise the stratification of the smoke layer upstream of the event and at the same time to limit its development and propagation. The characteristic times of the fire detection systems in the tunnel determine a delay in operating the system which is the cause of the first propagation upstream of the fumes. The delayed detection is an aspect of the phenomena of fires and is only partly related to their effectiveness but also to the nature of the fire phenomenon, to its growth time, to the nature of the fuel and to the environmental conditions; although not resettable, it is however limited to fairly modest values essentially linked to the nature / type of installed systems. Some field tests made it possible to determine the average detection times for fire alarms in the presence of outbreaks (critical scenarios) with low thermal release (peak powers <4 MW) and in the presence of moderate ventilation regimes. The summary result of the tests reported in the following table showing the fact that fiber optic linear heat detector, thanks to the ability to discriminate temperature gradients, are by far the most effective systems in the fire detection of tunnel.

Tab. 4 – Tunnel fire detection time (different fire detection systems)

Fire detection systems	Detection method	Characteristic threshold values	Characteristic time detection
Heat sensitive	Temperature threshold	58-70 °C	> 120 s
Heat sensitive FO	Threshold Temperature gradient	60 °C (tipico) 5 °C/min	30 s
TVcc (AID)	Smoke presence	15-100 pixel CCD	30 ÷ 60 s (step function)
CO/OP	Polluting presence (CO)Visibility (Particulate)	300 ppm 15 km^{-1}	> 300 s (distance from the outbreak - installation height)
Smoke detector	Visibility (Particulate)	15 km^{-1}	Like CO/OP

Not all operating tunnels, however, are equipped with fiber optc linear heat sensor systems, and often the detection of fire by means of AID technology (TVcc) is required in order to confirm more basic alarms; because of this, in general, the characteristic time of the fire detection in the tunnel can assume values in order of 60-120 s. The detection delay is such that, in the presence of particular initial environmental conditions, the propagation of the smoke upstream of the outbreak can take on significant values. Preventing this initial propagation would imply the need to impose a continuous (positive) speed regulation in any sanitary ventilation regime and regardless to the actual environmental pollution conditions. To do this it would be necessary to provide an always active safety ventilation regime which translates into exaggerated direct costs and enormous energy consumption and cost, not to mention the jet fans maintenance aspects, which require a continuous working commitment.

FIRE STRATEGY VALIDATION MODEL

All ventilation strategies adopted and implemented on the tunnel IT systems were analysed and studied during a series of CFD simulations performed. In fact, ventilation strategy must be determined by weighting the risks of sustained forced ventilation or controlled ventilation in order to maintain the smoke stratification unchanged and the contact of so-called upper layer with the tunnel ceiling. From here the need to conduct a series in environment CFD simulations in order to analyze the nature of fluid dynamics problem and to test the proposed solutions also verifying the actual effectiveness in terms of Tenability Criteria. The simulations of all

the proposed strategies were performed with the aid of FDS software using a simulation tunnel model 400 m length with all the installation inside. Changing fire characteristic, environmental and boundary conditions, ventilation strategy and fans activation all the proposed fire scenarios have been analyzed. To improve the replicability of the field scenarios modeled in the CFD environment, numerical checks were performed on fire scenarios characterized by pool fire. The knowledge and experience gained in the field thanks to the direct observation of the fire phenomenon in the numerous tests conducted in the tunnel environment has allowed the numerical codification of the reference focus (see Le Strade publication- September 2017 - La Fiaccola) allowing the translation in form of Heat Release Rate. The CFD checks were then performed in the hypothesis of outbreaks for a maximum thermal power in order of 3.5 ÷ 4 MW and typical peak times in order of 270 s.

The simulations were conducted on a known geometry tunnel in the hypothesis of positive and constant longitudinal slope and strongly negative initial velocity. The numerical analysis then saw the development of a finite series of cases that included the variation of the ventilation actuation times and the differentiation of the strategies for the management of the smoke. In particular, various ventilation strategies have been tested, providing controlled activation of jet-fans starting from 90 s from the beginning of the fire event. Further scenarios were analyzed in the hypothesis of increased thermal release fire outbreaks; in this case new verifications were carried out in the case of HRR with peak values of 10 MW at 270 s.

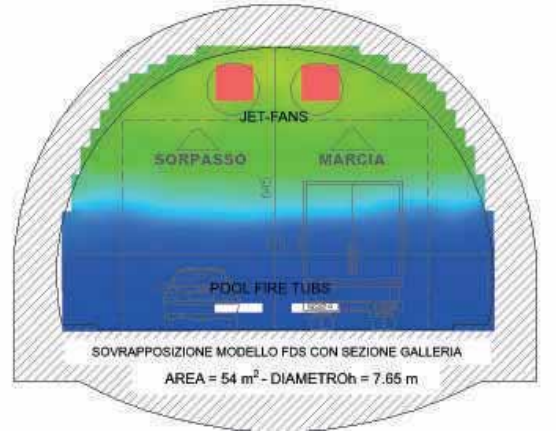


Fig. 6 – CFD modeling

All the analyzed scenarios can, with pretty good approximation, be considered as representative of higher magnitude fires (30-40 MW), certainly more peculiar to road safety design and characterized by typical peak times of 10-15 minutes. Expansion of the CFD analysis to these scenarios gives greater value to the activity carried out, confirming the validity of the results obtained and justifying the choice of the strategies adopted.

RESULTS

The results of the conducted analysis were evaluated by examining the behavior and the height of the free smoke layer on the road platform, the polluting concentrations and the maximum temperatures detected along the pedestrian walkways as well as the visibility of the exodus according to the criteria of acceptability (Tenability Criteria) required by the relevant legislation (NFPA 502).

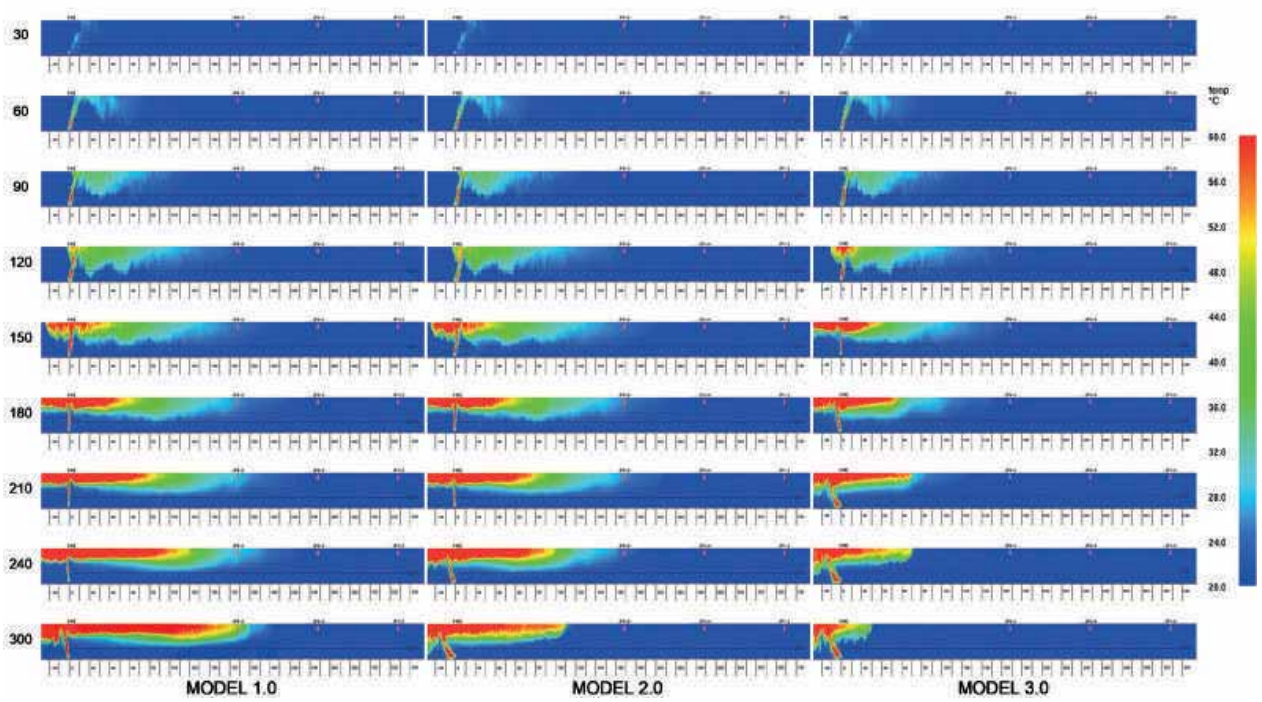


Fig. 7 – Temperature levels over time (tunnel longitudinal section) – different models

In particular, the exposure limits were determined, also on the inclined plane placed at a height of 2 m on the road platform, respectively at a temperature of 60 °C and at a visibility of 10 m. Results are in general shown in graphical form by using smoke distribution on the median longitudinal plane of the tunnel, colored contours of the temperatures and colored contours of visibility (some examples reported in figures).

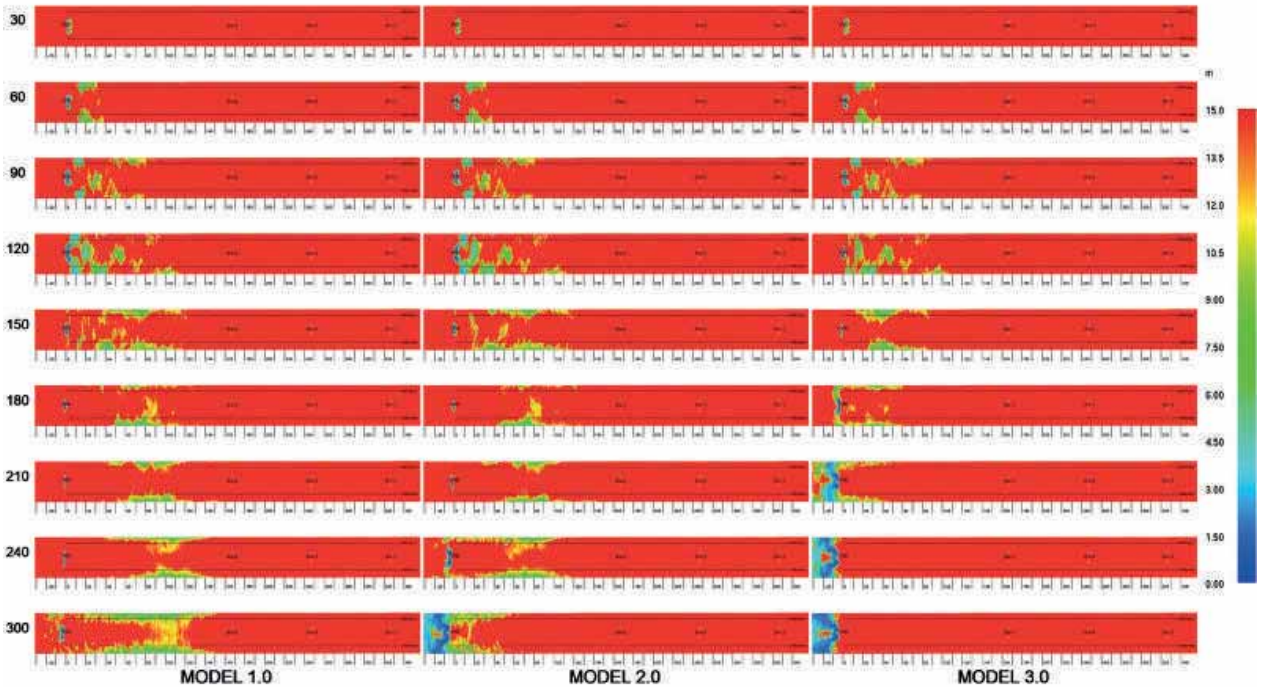


Fig. 8 – Visibility levels over time (tunnel longitudinal horizonatal section 2m height) – different models

CFD model solutions have been evaluated by analyzing smoke behavior and propagation, the presence of backlayering and, among others, also levels of temperature, visibility and noxious concentrations inside tunnel especially over the pedestrian walkways.

FULL SCALE FIRE TESTS

The goal of CFD simulations is, of course, to obtain a high level of confidence in the results obtained, while at the same time ensuring adequate reliability¬ and this can only be achieved by demonstrating tolerable levels of error and uncertainty. Verification and reliability of results is often difficult to argue, partly because in general simulation with computational tools is still affected by an inherent error, caused, for example, by discretization of the computational domain, approximations of boundary conditions, and numerical solution of the equations governing motion and temperature fields. In order to minimize the uncertainty related to the computational results and at the same time validate the verification tool used, a series of full-scale fire tests and trials were set up over time. Comparison of the measurements put in place during the acceptance test with the results of the CFD verification allowed validation of the methodology used in the design stage, thus consolidating the reliability of the results and the design choices adopted. The actual fire tests were organized, set up and analyzed by the dedicated work team composed of DBA and MOVYON personnel who completed the entire programming and testing procedures.

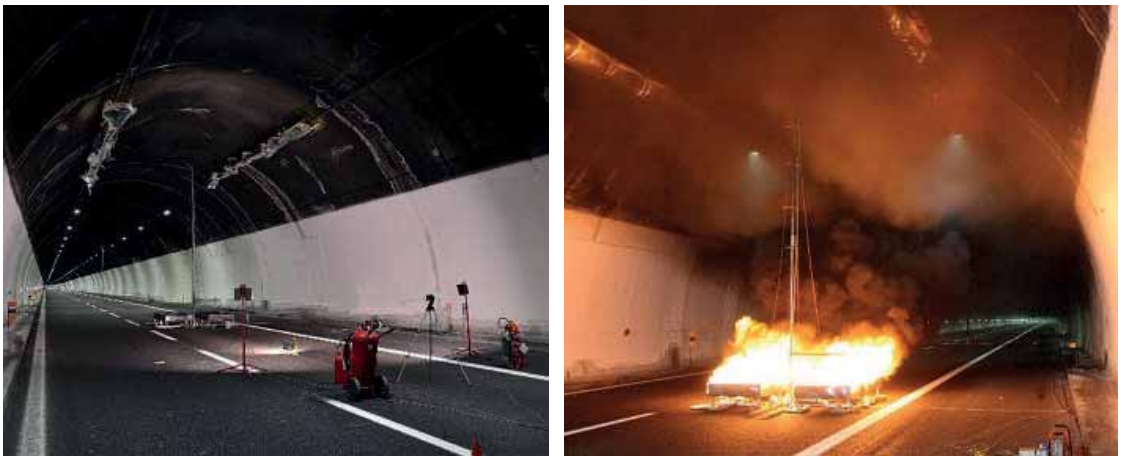


Fig. 9 – Full scale fire test – Site tests and pool fire

The tests were set up with controlled outbreaks of pool fire of a predetermined size, setting up the test site with instrumented poles (anometers and temperature probes), changing the initial test conditions and verifying the expected behavior of the ventilation system and more broadly of the control procedures. The scaling of the outbreak used in the test was carried out to ensure the relevance of the test itself and in particular to verify the actual capacity of the installed systems in coping with the management of a major fire situation. During the actual fire tests, the proper functioning of the emergency management procedures and the proper operation of the Control Room, as required by the ASPI protocol, was also verified.

CONTROL ROOM MANAGEMENT OF A FIRE SCENARIO

The activation of tunnel ventilation takes into account the following inputs (all or a subset of them), in accordance with the tunnel equipment and the design of the ventilation algorithm in the so-called "event tree":

- alarm from digital thermosensitive cable
- fiber-optic thermosensitive cable alarm (fibrolaser);

- smoke detector alarm;
- CO, NOX and Opacity detector alarm;
- alarm from AID software (TVcc);
- manual alarm by Control Room Operator (input of Vehicle on Fire/Fire event on the SIV-Integrated Traffic System).

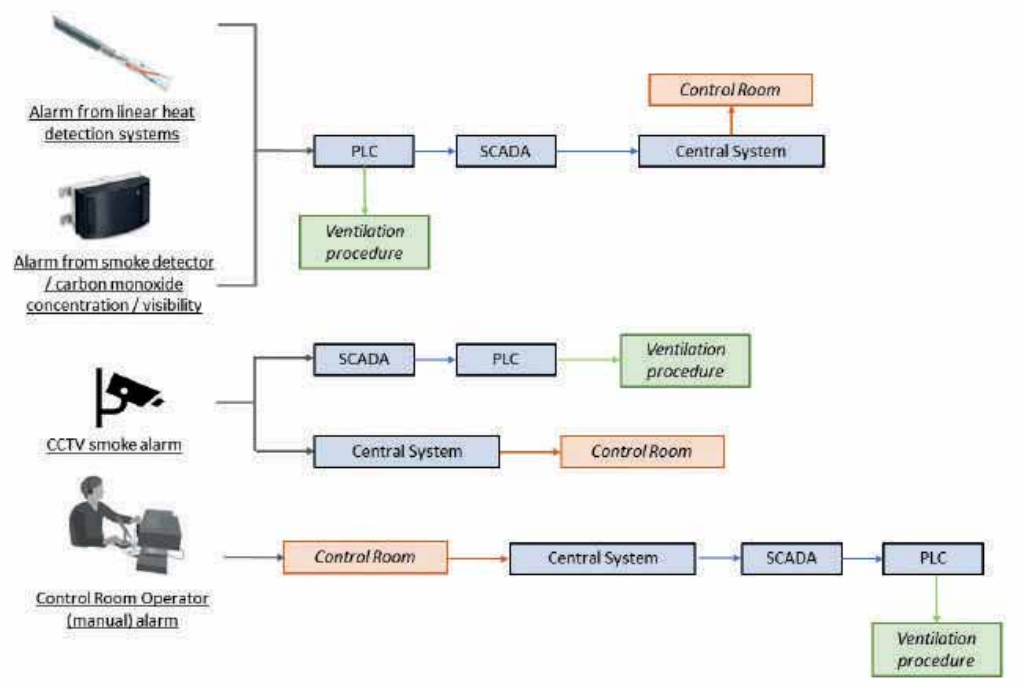


Fig. 10 – Input alarms of fire scenarios

Depending on the type of input, the alarm information follows a different flow. In general, the management of a fire event is carried out by a dual channel: the automatic channel (ventilation algorithm) and the semi-automatic channel (which requires confirmation by the Control Room operator). The first is operated by the PLC and involves the implementation of the commands to turn on the fans, according to the air speed data and the position of the fire, based on the project logics; the second is operated by the Radio Room and foresees the variation of messages on VMS, the closure of lanes, the forwarding to the authorities in charge of managing the event on site(Police, Fire Brigade).

CONCLUSIONS

The activities put in place by DBA and Movyon, and the result of the joint effort of the team dedicated to the analysis and study of tunnels and their safety, led to the definition of a set of emergency management procedures, aimed in particular at governing fire scenarios while maintaining the highest possible level of safety.

In particular, the work carried out in the field, together with the results obtained from the study of fire scenarios and CFD calculation simulations, confirmed the validity of the approach adopted in the design of ventilation control systems under fire. The results obtained with the computational model showed complete agreement with the data collected in the field on controlled and experimental fire scenarios. The validation of the CFD analysis models adopted in the study stage, with the measurements taken on the field in the full-scale tests, made it possible to appreciate the high level of confidence of the results achieved and to determine the

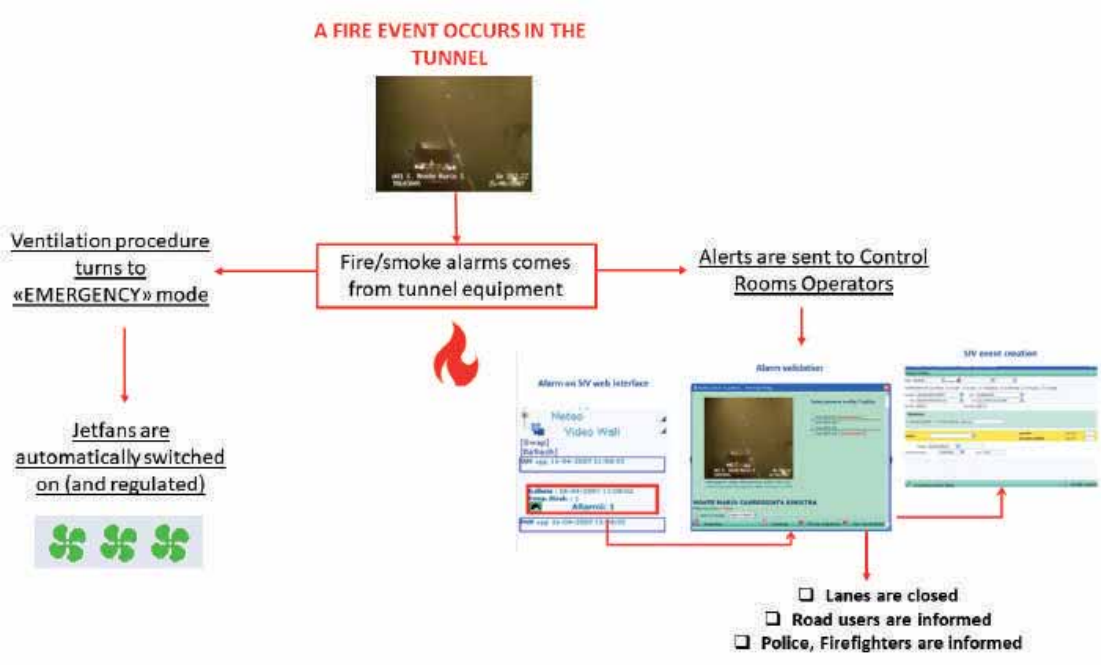


Fig. 11 – Fire scenarios management by Algorithms and Sala Radio Operator

final acceptance of the proposed design solutions in terms of the overall system architecture. Finally, the fire tests confirmed the expected behavior of the actual fire scenarios, thus confirming the correctness of the choices adopted in terms of the control procedures of the tunnel's active and passive safety systems, which, by extension, are valid both for the regulation of the responsiveness of the emergency ventilation process (efficiency) and for the final purpose of managing smoke propagation by preventing the development of the backlayering phenomenon (effectiveness), thereby minimizing the risks arising from fire exposure and preserving, as far as technically possible, the users involved. As an appreciable side effect, the execution of the fire tests also enabled the verification of the functionality of all additional operational procedures for emergency management as well as the effectiveness of ASPI control personnel in charge of emergency management and coordination (exercise in real fire conditions).

PERFORMANCE VERIFICATION OF FIRE DETECTION AND COMPOUND POINT SMOKE EXTRACTION SYSTEM IN GUANYIN TUNNEL OF SUHUA HIGHWAY, TAIWAN

Chi-Ji Lin [a*], Li-Yu Tseng [a], Po-Feng Lin [b], Chung-Hwei Su [c], Tsan-Hui Lin [d]

[a] *Department of Mechanical Engineering, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan, R.O.C.*

[b] *Department of Electrical Engineering, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan, R.O.C.*

[c] *Department of Safety, Health and Environmental Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan*

[d] *Suhua Improvement Engineering Office, Directorate General of Highways, Ministry of Transportation and Communications in Taiwan, ROC*

Mountainous areas account for about 70% of the total area in Taiwan. Due to the limited available area and the growing traffic demand, vehicle tunnels have become an important part of highway construction. When a fire occurs, it is not easy to evacuate people. Coupled with the accumulation of heat and a large amount of smoke, tunnel fires pose a high degree of risk to personnel. The heat absorption and cooling effect are the characteristics of the water spray fixed system, which can prevent the structure from collapsing when a fire occurred in the vehicle tunnel. This type system has gradually been adopted in vehicle tunnel in recent years. The automatic fire extinguishing equipment of the Suhua Highway Improvement (SHHI) Project in eastern Taiwan are is equipped with the water spray fixed system as the fire safety protection devices in the long tunnels. This paper describes the design concept and details of the fire detection and compound point smoke extraction system in the Guanyin Tunnel of the SHHI project. The length of the Guanyin Tunnel is 7.9 kilometers. Tunnel ventilation types can be divided into natural ventilation and mechanical ventilation. The method of finalization must meet the requirements of economic efficiency and tunnel safety. Compound point smoke extraction system is a new trend of vehicle tunnel ventilation system. It is a combination of the longitudinal flow and point smoke extraction system. Excellent exhaust effect and simple operation are the characteristics of this system. The design basis of the ventilation and smoke extraction system are described first. The air flow rate obtained under what conditions has been explained. Second, the characteristics of the fire detection system are described. How to get the information of fire as early as possible is an important design consideration. How to consider the locations of the fan rooms is also an important point. Finally, how the emergency modes of the systems are set have been explained in this paper. Some engineering materials are provided for reference by tunnel engineers.

VERIFICACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE INCENDIOS Y EXTRACCIÓN DE HUMO DE PUNTO COMPUESTO EN EL TÚNEL GUANYIN DE LA AUTOPISTA SUHUA, TAIWÁN

Las áreas montañosas representan alrededor del 70% del área total de Taiwán. Debido al área disponible limitada y la creciente demanda de tráfico, los túneles para vehículos se han convertido en una parte importante de la construcción de carreteras. Cuando ocurre un incendio, no es fácil evacuar a las personas. Junto con la acumulación de calor y una gran cantidad de humo, los incendios en túneles representan un alto grado de riesgo para el personal. La absorción de calor y el efecto de enfriamiento son las características del sistema fijo de rociado de agua, que puede evitar que la estructura se derrumbe cuando se produce un incendio en el túnel del vehículo. Este tipo de sistema se ha ido adoptando paulatinamente en los túneles de vehículos en los últimos años. El equipo automático de extinción de incendios del Proyecto de mejora de la carretera de Suhua (SHHI) en el este de Taiwán está equipado con el sistema fijo de rociado de agua como dispositivos de protección contra incendios en los túneles largos. Este artículo describe el concepto de diseño y los detalles del sistema de detección de incendios y extracción de humo puntual en el Túnel de Guanyin del proyecto SHHI. La longitud del Túnel de Guanyin es de 7,9 kilómetros. Los tipos de ventilación de túnel se pueden dividir en ventilación natural y ventilación mecánica. El método de finalización debe cumplir con los requisitos de eficiencia económica y seguridad del túnel. El sistema de extracción de humo de punto compuesto es una nueva tendencia del sistema de ventilación de túneles de vehículos. Es una combinación del sistema de extracción de humos de flujo longitudinal y puntual. Excelente efecto de escape y operación simple son las características de este sistema. Primero se describen las bases de diseño del sistema de ventilación y extracción de humos. Se ha explicado el caudal de aire obtenido bajo qué condiciones. En segundo lugar, se describen las características del sistema de detección de incendios. Cómo obtener la información del incendio lo antes posible es una consideración de diseño importante. Cómo considerar las ubicaciones de las salas de ventiladores también es un punto importante. Finalmente, en este artículo se ha explicado cómo se configuran los modos de emergencia de los sistemas. Los ingenieros de túneles proporcionan algunos materiales de ingeniería como referencia.

VÉRIFICATION DES PERFORMANCES DU SYSTÈME DE DÉTECTION D'INCENDIE ET D'EXTRACTION DE FUMÉE À POINTS COMPOSÉS DANS LE TUNNEL GUANYIN DE L'AUTOROUTE SUHUA, TAIWAN

Les zones montagneuses représentent environ 70% de la superficie totale de Taiwan. En raison de la surface disponible limitée et de la demande croissante de trafic, les tunnels pour véhicules sont devenus une partie importante de la construction d'autoroutes. Lorsqu'un incendie se déclare, il n'est pas facile d'évacuer les gens. Couplés à l'accumulation de chaleur et à une grande quantité de fumée, les incendies de tunnel présentent un degré de risque élevé pour le personnel. L'absorption de chaleur et l'effet de refroidissement sont les caractéristiques du système fixe de pulvérisation d'eau, qui peut empêcher la structure de s'effondrer lorsqu'un incendie s'est déclaré dans le tunnel du véhicule. Ce type de système a été progressivement adopté dans les tunnels de véhicules ces dernières années. L'équipement d'extinction automatique d'incendie du projet d'amélioration de l'autoroute de Suhua (SHHI) dans l'est de Taïwan est équipé d'un système fixe de pulvérisation d'eau comme dispositif de protection contre l'incendie dans les longs tunnels. Cet article décrit le concept de conception et les détails du système de détection d'incendie et d'extraction de fumée à points composés dans le tunnel de Guanyin du projet SHHI. La longueur du tunnel de Guanyin est de 7,9 kilomètres. Les types de ventilation des tunnels peuvent être divisés en ventilation naturelle et ventilation mécanique. Le mode de finalisation doit répondre aux exigences d'efficacité économique et de sécurité du tunnel. Le système d'extraction de fumée à point composé est une nouvelle tendance du système de ventilation du tunnel du véhicule. C'est une combinaison du flux longitudinal et du système de désenfumage ponctuel. Un excellent effet d'échappement et un fonctionnement simple sont les caractéristiques de ce système. Les bases de conception du système de ventilation et de désenfumage sont décrites en premier. Le débit d'air obtenu dans quelles conditions a été expliqué. Deuxièmement, les caractéristiques du système de détection d'incendie sont décrites. Comment obtenir les informations sur l'incendie le plus tôt possible est une considération de conception importante. Comment considérer les emplacements des salles de ventilateurs est également un point important. Enfin, la façon dont les modes d'urgence des systèmes sont définis a été expliquée dans cet article. Certains matériaux d'ingénierie sont fournis à titre de référence par les ingénieurs de tunnel.

1. INTRODUCTION

The Suhua Highway on Line 9 of Taiwan is the only external highway between the east and the north, and it is also a group of tunnels connected by different lengths of bridges and tunnels. Guanyin Tunnel is the longest tunnel in the Suhua Highway Improvement (SHHI) which has more than 7.9 kilometers. On its south side, a 60-meter-long semi-closed Guyin Bridge is connected to the Gufeng Tunnel with length of more than 4.7 kilometers. It is like a tunnel with a total length of nearly 12.6 kilometers. According to the tunnel for terrain, the tunnel is a special space that is underground and airtight, and its rescue accessibility and timeliness is poor. It may also occur fire scale of more than 100MW (a situation due to the passage of large vehicles). The tunnel is under extremely high temperature, which causes the collapse of the tunnel lining and damages the mechanical and electrical equipment, and a large amount of dense smoke rapidly spreads and accumulates, which will pose a threat to the safety of passers and emergency responders. Especially under the unique environmental requirements of evacuation and disaster relief operations on the Suhua Highway, smoke control strategies in fire emergencies is an important challenge for engineers to seek breakthroughs.

This paper mainly introduces the design basis of the ventilation and smoke exhaust system of Guanyin tunnel. Secondly, the characteristics of the fire detection system are introduced. How to obtain fire information as early as possible is an important design consideration, and it is important to consider the location of the fan room. Finally, this paper explains how to set the emergency mode of the system, and provides some engineering materials for the reference of tunnel engineers.

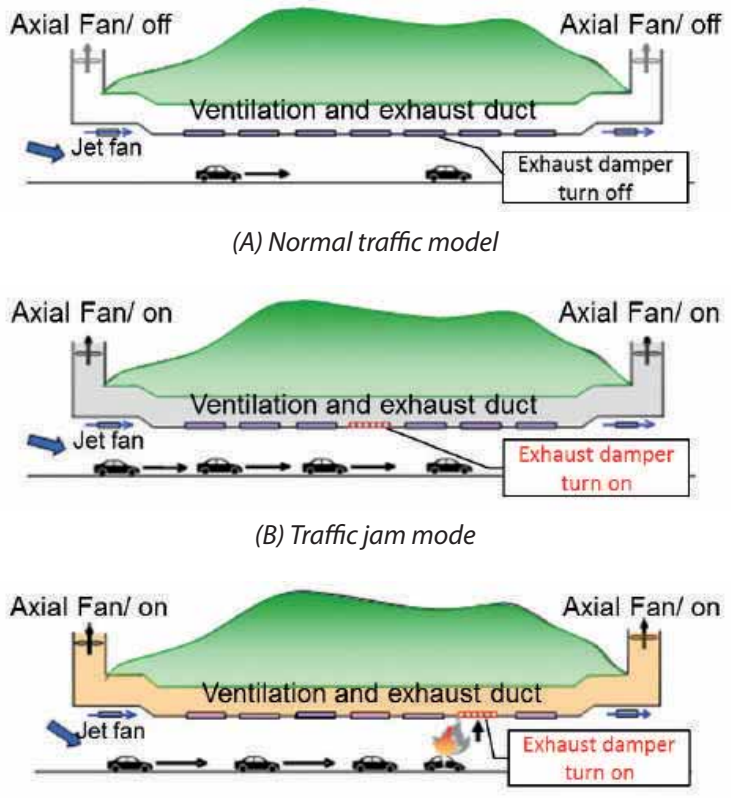
2. DESIGN OF VENTILATION AND SMOKE EXHAUST SYSTEM FOR SUHUA HIGHWAY TUNNEL

Guanyin Gufeng Tunnel is 12.6 kilometers long, and adopts the Single Point Extraction with Jet Fan Longitudinal Ventilation system. It is necessary to use a forced ventilation system in conjunction with the double-hole tunnel. This tunnel section is distributed from north to south through high mountains and ridges, with the Pacific Ocean in the east and the Central Mountains in the west. The scope of the design is to provide the ventilation and smoke exhaust requirements of the tunnel and to cooperate with the relevant tunnel safety management measures, evaluate and analyze three different conditions which are normal, traffic jam and fire situation, and propose an appropriate long tunnel ventilation system.

2.1. The Single Point Extraction with Jet Fan Longitudinal Ventilation system introduction

The Single Point Extraction with Jet Fan Longitudinal Ventilation system, the exhaust pipes are arranged in the space above the tunnel, and a large smoke exhaust port is set in every 350 meter area (A= 24 m2 by 4 groups × @ 6 m2, as shown in Figure 1.) with jet fan to assist the airflow direction and thrust. When the ventilation system is normal, jet fan longitudinal flow ventilation system is adopted to provide a better tunnel air environment due to the influence of the outside air of the tunnel, and the piston effect by cars to save energy. Jet fan longitudinal ventilation system is used to provide a better tunnel air environment during traffic jams. In case of emergency, single point extraction ventilation system is provided to quickly remove the thick smoke, passers can escape through both ends of the tunnel, as shown in Figure 2.

Figure 1 The Single Point Extraction with Jet Fan Longitudinal Ventilation system in Guanyin Tunnel [1]



(A) Normal traffic model

(B) Traffic jam mode

(C) Emergency (smoke) mode

Figure 2 Schematic diagram of the single point extraction with jet fan longitudinal ventilation system [2]

Guanyin Gufeng tunnel smoke exhaust damper spacing is 2.5m/s considering the piston effect in the tunnel and the ambient wind speed. When the fire occurs, the DTS (tmperature detection fiber) detects and starts the axial flow fan to exhaust the smoke at full speed. It takes 140 seconds. It extends to 350m downstream of

the accident point, and the distance between the pedestrian pits is also considered to be 350m. In order to avoid mutual interference between the smoke exhaust flow field environment and the pedestrian pit, and the smoke exhaust damper should have an appropriate distance from the pedestrian pit, so the Guanyin Gufeng tunnel smoke exhaust damper The spacing is set at 350m, as shown in Figure 3.

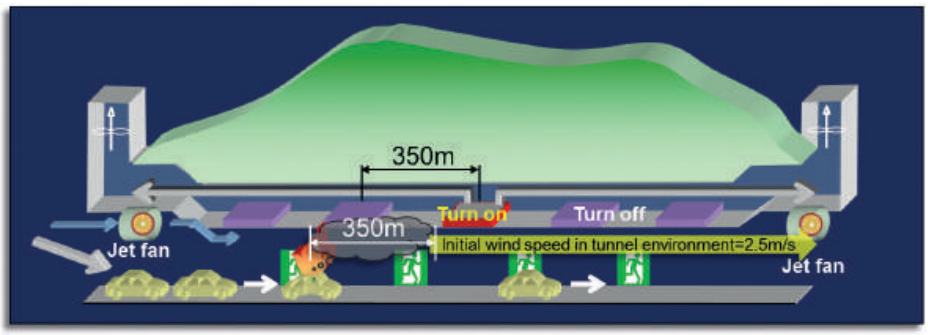
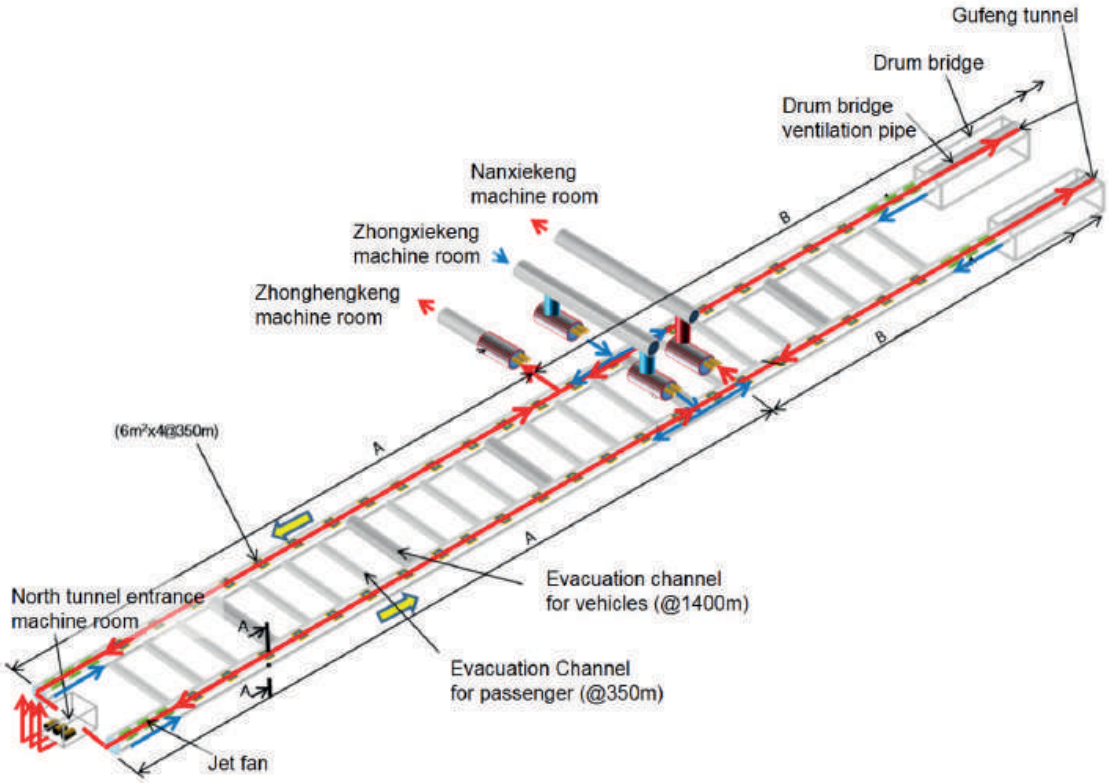


Figure 3 Exhaust damper spacing

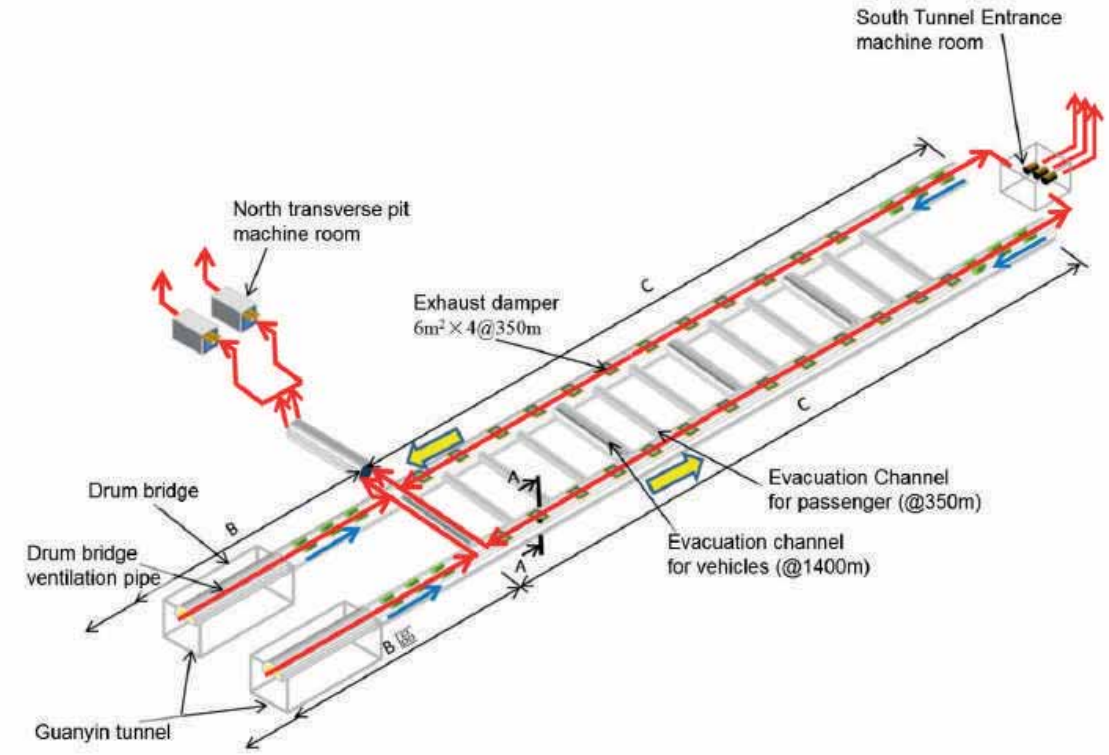
Figure 4 is a perspective view of the ventilation and exhaust system of Guanyin Gufeng tunnel. Guanyin tunnel has 4 machine rooms, Gufeng tunnel has 2 machine rooms, and the configuration of axial fans in the tunnel machine room is shown in Table 1. Guanyin Gufeng tunnel ventilation and smoke exhaust calculation is based on a large truck fire of 100MW as the calculation basis, and the critical wind speed is 3.0 m/s. The ventilation cross-sectional area of the tunnel is 60 m2, and the total amount of smoke exhaust is 360CMS. The area of the exhaust pipe is 18 m2, and the maximum wind speed of the exhaust pipe is about 20 m/s.

Table 1 Layout of machine room and axial flow fan in tunnel

Machine room location	Air supply/ exhaust	Quantity	Air volume m3/s
Guanyin tunnel/North Tunnel Entrance	Exhaust	3 units (1 units spare)	125
Guanyin tunnel / Zhonghengkeng	Exhaust	2 units (for north line use)	110
Guanyin tunnel / Zhongxiekeng	supply	4 units (2 units each for northbound and southbound)	80
Guanyin tunnel / Nanxiekeng	Exhaust	2 units (used by the south line)	110
Gufeng Tunnel / North Transverse Pit	Exhaust	2 groups of 4 units (mutual backup)	120
Gufeng Tunnel/South Tunnel Entrance	Exhaust	3 units (1 units spare)	120



(a) Guanyin tunnel



(b) Gufeng tunnel

Figure 4 Perspective view of ventilation and exhaust system of Guanyin Tunnel [3]

2.2. The Emergency Mode of the Single Point Extraction with Jet Fan Longitudinal Ventilation system

The Single Point Extraction with Jet Fan Longitudinal Ventilation system is the latest ventilation and smoke exhaust design method. The exhaust pipes are arranged above the tunnel, and a 24m2 smoke outlet is set about every 350 meters. It is arranged staggered with the connecting tunnel. The ventilation system is in the exhaust mode in both normal and emergency situations. The tunnel opening is equipped with a jet fan to assist in guiding the airflow. Fan, TVF) start operation to exhaust smoke, the smoke layer is exhausted from the smoke exhaust port downstream of the fire source through the exhaust pipe (N+1 area exhaust), the jet fan at the tunnel opening assists in guiding the air flow, so that the smoke layer is controlled in the fire Between the source and the smoke outlet, keep other areas of the tunnel in a smoke-free environment, and personnel escape in the upstream direction, away from the accident scene.

The Single Point Extraction with Jet Fan Longitudinal Ventilation system should pay special attention. Due to the location of the fire accident, the position of the ventilation and smoke outlet must be adjusted accordingly, so the distance between the ventilation and smoke outlet and the tunnel opening will be different, as shown in Figure 5 in emergency mode A. When there is a fire near the entrance of the tunnel, in addition to opening the downstream ventilation and smoke outlet, the jet fan at the entrance of the tunnel should be turned along, and the jet fan at the outlet should be turned off. In emergency mode B or C in Figure 5, when there is a fire in the middle of the tunnel or near the exit, in addition to opening the downstream ventilation and smoke outlet, the jet fan at the entrance of the tunnel should be turned along, and the outlet jet fan should be turned on to avoid the point exhaust outlet. Inhalation of too much air downstream of the fire, resulting in a reverse flow of the smoke layer or a situation where the critical velocity is too low.

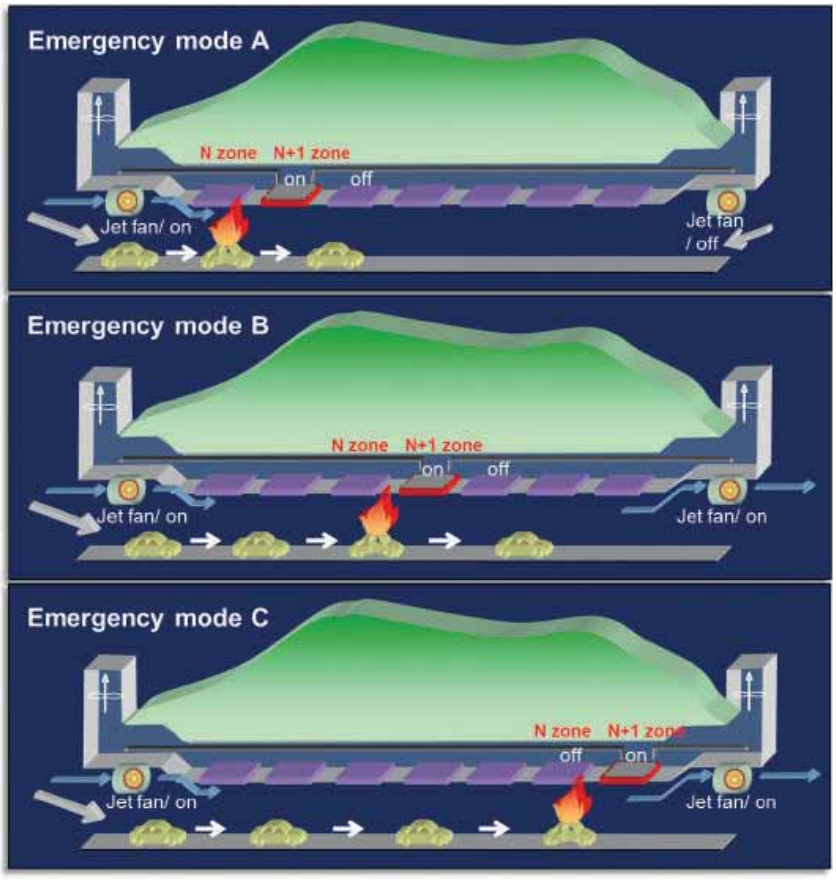


Figure 5 The Emergency Mode of the Single Point Extraction with Jet Fan Longitudinal Ventilation system [4, 5]

3. FIRE DETECTION AND SAFETY PROTECTION SYSTEM FOR GUANYIN TUNNEL OF SUHUA HIGHWAY

The good design of highway tunnel fire alarm and fire protection system not only affects the service quality, but also affects the sustainability of safety prevention and disaster relief and maintenance operations. According to the "Specifications for the Installation of Fire Safety Equipment in Highway Tunnels" issued by the Ministry of Transportation of Taiwan, the Guanyin Gufeng Tunnel is a Class A tunnel and should be equipped with automatic fire extinguishing equipment. The tunnel fire alarm system of this project adopts a fiber optic temperature detection system (DTS) to cooperate with the water mist system equipment and the control strategy of the Single Point Extraction with Jet Fan Longitudinal Ventilation system. The requirements for the immediacy and accuracy of detection are particularly important. Table 2 is the introduction of fire safety equipment for Guanyin Gufeng Tunnel.

The tunnel fire alarm system of this project must detect the location of the fire point within 60 seconds of the fire incident and transfer it to the tunnel monitoring system to deal with the fire incident. Therefore, at the beginning of the design of this project, various tunnel fire alarm systems were reviewed, and after comparison, a fiber-optic temperature detection system was proposed to be used as the tunnel fire alarm system. Except for the main tunnel, the fire alarm system is designed according to the "Standards for the Installation of Fire Safety Equipment in Various Sites", and a smart (R-type) fire alarm trust switchboard is set up in the Guanyin Gufeng Tunnel computer room. The smoke detection sensor signal and the fire hydrant box notification signal in the area such as the road are transferred to the tunnel monitoring system to deal with the fire accident. In this project, a Redundancy electromechanical/safety controller is installed in the tunnel equipment room to monitor and manage the systems in the tunnel including electricity, lighting, ventilation, fire water supply and drainage, and safety. The optical fiber backbone integrates the monitoring and monitoring system of the overall tunnel.

Figure 6 shows the schematic diagram of the integrated operation of the related electromechanical and traffic control systems after the Guanyin Gufeng Tunnel fire accident. When a fire occurs in a one-way tunnel, the fire alarm reception switchboard detects the fire signal of the tunnel fire alarm zone and transfers it to the monitoring system to activate emergency response. Related equipment such as fire pump, water mist system equipment, and smoke exhaust fan damper, etc. to reduce disasters and evacuate people. The fire notification procedure for Guanyin Gufeng Tunnel is planned as follows:

(1) When a fire occurs in a one-way tunnel, after the monitoring system receives the fire alarm signal from the fire alarm switchboard, the ventilation system automatically adopts the emergency smoke exhaust mode, and starts the axial flow fan in the engine room and the smoke exhaust damper near the fire point (other smoke exhausters). The damper is closed) to perform emergency smoke exhaust and start the jet fan at the hole to limit the smoke layer to the scope of the fire accident, so that passersby can evacuate to a safe place.

(2) At the same time, after the fire alarm is detected by the trusted switchboard, the fire information is automatically sent to the traffic control system through the monitoring system to initiate incident handling and response.

(3) After the optical fiber temperature detection system detects the fire event, once the video event detection system also confirms the information, it will automatically activate the water mist automatic valve of the partition to spray water to cool down. The water mist equipment with a total of 100 meters in the two areas will operate in a timely manner, which will effectively limit the fire area and achieve the effect of cooling and temperature control; thus preventing the effect of the blocked vehicles from prolonging the burning, striving for the rescue time that can be effectively carried out, and creating an environment conducive to the safety of passers-by. Operating environment for evacuation and subsequent fire rescue.

Table 2 Guanyin Gufeng Tunnel Fire Safety Equipment

Suhua Highway	**Guanyin Gufeng Tunnel**
Tunnel class / **Facility classification**	**Class A tunnel**
	Tunnel length over 3,000 meters
Fire extinguisher	O
Tunnel Entrance Information Variable Sign	O
Lane Control Signs (LCS)	O
Information Variable Signs in Tunnels	O
Fire Hydrant	O
Emergency call	O
Manual alarm equipment	O
Automatic fire alarm equipment	O
Radio Communication Auxiliary Equipment[B]	O
Emergency broadcast equipment	O
Monitoring equipment [C]	O
Evacuation Communication Channels [D,E]	O
Emergency stop corner [B]	O
Connect the water supply pipe [B]	O
Radio broadcast equipment	O
Emergency power socket [B]	O
Mechanical smoke exhaust equipment [D]	O
Emergency lighting	O
Automatic firefighting equipment	O [F.G.]
Exit sign	O
Evacuation direction indicator	O
Emergency door sign light	O
Evacuation indicator	O

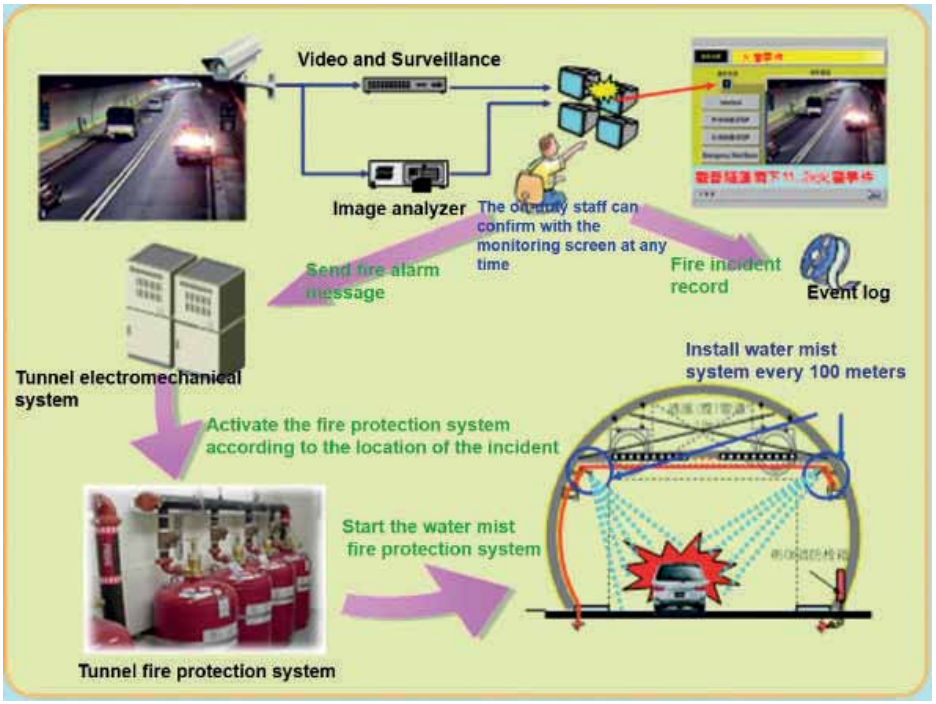


Figure 6 Schematic diagram of the integrated operation of related electromechanical and traffic control systems after the fire accident

4. FIRE FIELD VERIFICATION METHOD FOR 5MW AND LARGE SMOKE VOLUME

Since the fire smoke layer has a particularly important influence on the escape direction of the long tunnel, the outside air conditions, the slope of the tunnel, and the distance between the fire location and the tunnel opening will all affect the smoke exhaust phenomenon of the Single Point Extraction with Jet Fan Longitudinal Ventilation system. The road tunnel fire protection system also uses the water mist system as the cooling medium. If the number of outside air or smoke exhaust vents is configured in the fire, the smoke layer will spread and spread in a large area, and the water mist system will be activated, causing the fire smoke layer settlement in the water mist and water discharge area will be reduced. Not conducive to the evacuation of people. Therefore, when it is necessary to set up smoke exhaust and fire-fighting water mist systems at the same time, the fire smoke layer should be prevented from spreading and spreading to the evacuation path of personnel. The full-scale hot smoke test of this study will use a 5MW gasoline pool with a large-flow smoke generator and the installation of a road tunnel water mist system to verify the Single Point Extraction with Jet Fan Longitudinal Ventilation in a fire scenario of close to 40 to 50MW. Whether the system can meet the requirements of the original design.

Because the fire source is too small and the amount of thick smoke is insufficient, it is impossible to effectively check the distribution of hot gas on site. If the fire source is too large, there will be doubts about damaging the mechanical and electrical equipment on site. Therefore, the largest gasoline pool that is “acceptable” for on-site combustion is an item that must be evaluated before testing. After discussions with on-site personnel, based on experience, the scale of the fire source is based on the size of the largest gasoline pool that can be burned on site, which is 5.0 MW. The size of the gasoline pool is 1.4 × 1.4 m. Figure 7 shows the installation status of the measuring instrument, the large-flow smoke generator, and the 5MW gasoline pool during the tunnel experiment.

(a) CECI engineers calibrate measuring instruments (b) Measuring instrument settings

(c) 5MW gasoline pool

Figure 7 Tunnel experiment process measuring instrument, large flow smoke generator, 5MW gasoline pool instrument status

Burning a 5MW gasoline pool and adding 4 large-flow smoke generators, the tunnel can be filled with 40 to 50 MW of thick smoke. Figure 8 shows the test mode of the large-flow smoke generator, and Figure 9 shows the state of igniting the 5MW gasoline pool, which can be displayed on the lights of the lamps upstream and downstream of the gasoline pool. Figure 10 shows the visibility conditions downstream of the smoke exhaust damper before and 400 seconds after lighting the 5MW gasoline pool. It can be shown that the visibility in the tunnel has changed from clear to invisible, and the flashing lights of the vehicle cannot be identified, which shows that the amount of smoke in the measurement process can reach Huge amount of smoke in the tunnel.

Figure 8 Test release of large flow smoke generator

Figure 9 The state of igniting the 5MW petrol pool

(a) When the 5MW petrol pool was just ignited

(b) 400 seconds after igniting 5MW petrol pool

Figure 10 Visibility conditions downstream of the smoke damper before and 400 seconds after igniting the 5MW petrol pool

5. CONCLUSION

In view of the increasing scale of tunnel projects, each project plan is achieved by the joint efforts of the competent authority, design, construction supervision, contractors, etc. under the unique traffic, economic, environmental, construction and safety conditions. Ventilation and smoke exhaust of long tunnels are not only important issues in the design and construction process, but also tunnel safety is a key issue for future operation and management. The Guanyin Valley Wind Tunnel of Suhua Highway adopts the advanced Single Point Extraction with Jet Fan Longitudinal Ventilation system to effectively control the non-diffusion of smoke layer; adopts the water mist system to control the growth of the fire, creating an environment where fire rescue personnel can enter the fire scene for rescue, and A disaster relief support platform is established, and disaster relief personnel can simultaneously monitor and obtain disaster relief information, effectively cooperating with relevant disaster relief units to carry out rescue.

This fire test verification is based on a 5MW fire source and a smoke volume up to 50MW to verify the Single Point Extraction with Jet Fan Longitudinal Ventilation system. The tunnel was opened to traffic within 30 minutes, reducing traffic impact, proving the effectiveness of "Single Point Extraction with Jet Fan Longitudinal Ventilation".

In the past, tunnel safety was only aimed at ensuring the safe escape of passers-by. However, tunnel safety standards will fluctuate with the time and space of society. Today, society has higher requirements and expectations for tunnel safety, in addition to ensuring the safety of passers-by's life. It can also maintain the complete structure of the tunnel so that the operation is not interrupted and the social and economic losses are minimized. In the event of an emergency or fire in a long tunnel section, the personnel are in panic and panic, and the effectiveness of the operating performance requirements of the tunnel fire safety protection facilities and equipment can ensure the safety of the lives of passers-by.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study is grateful to the Suhua Improvement Engineering Office and Fourth Maintenance Office, Directorate General of Highways, Ministry of Transportation and Communications in Taiwan, ROC for their help and assistance.

REFERENCES

[1] Lin, Chi-ji, Tseng, Li-yu, Lin, Tsan-hui, Analysis to the Safety Facilities of Fire Protection, Ventilation and Smoke Exhaust in the Long Tunnel of Suhua Highway Improvement Project, CECI Engineering Technology No. 130, pp 52-67, April 2011.

[2] Liang Hur Shih, Harley Chiu, Chi Ji Lin, Integrated application of road tunnel smoke exhaust and evacuation system, CECI Engineering Technology No. 91, pp 132-143, 2021.

[3] Horng Cheh Lee, Harley Chiu, Tunnel development in Taiwan and the SMART ventilation system, Fire Protection and Safety in Tunnels Asia 2012, 21-22 February 2012, Singapore.

[4] Fusheng Chen, Jia Songhou, Zhengxun Chen, Harley Chiu, Weiliang Yang, Discussion on Highway Tunnel Safety and Fire Protection Consideration of Lining Structures, CECI Engineering Technology No. 67, July 2005.

[5] Taiwan's Suhua Highway Improvement Project World Wide Web: https://appsuhua.thb.gov.tw/tw/article-detail.aspx?detailid=174

METHOD FOR CONTROLLING DETERIORATION OF VISUAL ENVIRONMENT IN ROAD TUNNELS DUE TO FOG

Yoshiki Akaza
Nippon Expressway Research Institute Company Limited

This paper describes on measures to deal with fog that occurs in long tunnels in winter.

The Tokai-Hokuriku Expressway is a highway that crosses the central part of Japan and connects the Pacific Ocean side and the Sea of Japan side, which are divided by mountainous regions.

The central part of the road has many tunnels and passes through mountainous areas with high elevations. The longest of these is the Hida Tunnel.

In the Hida Tunnel during the winter, we observed a phenomenon where the visual environment in the tunnel deteriorated.

We thought there were two causes. The first was the influx of fog generated outside the tunnel into the tunnel, and the second was the influx of cold air from outside into the warm tunnel, causing fog to form due to the sudden temperature change.

NEXCO has been using its proprietary tunnel ventilation control software to prevent pollution in tunnels caused by automobile emissions and to protect the environment around tunnel exits.

In addition to normal tunnel ventilation control, we have added a control method to reduce the deterioration of the visual environment caused by fog. The new control method detects fog outside the tunnel and prevents it from flowing into the tunnel, and also controls the wind speed at the tunnel exit by predicting the occurrence of fog based on the difference in temperature and humidity inside and outside the tunnel.

The Hida Tunnel is the second example of fog control in a tunnel in a cold region in Japan, but the Hida Tunnel has made its own improvements by further analyzing the mechanism of fog generation in the tunnel in detail.

In this paper, we describe the construction of the control algorithm and the status of on-site tuning.

UN MÉTODO DE CONTROL PARA SUPRIMIR EL DETERIORO DEL ENTORNO VISUAL CAUSADO POR LA NIEBLA EN LOS TÚNELES DE CARRETERA

Este artículo describe las medidas para hacer frente a la niebla que se produce en los túneles largos en invierno.
La autopista Tokai-Hokuriku es una carretera que atraviesa la parte central de Japón y conecta el lado del Océano Pacífico y el lado del Mar de Japón, que están divididos por regiones montañosas.
La parte central de la carretera tiene muchos túneles y atraviesa zonas montañosas de gran altitud. El más largo de ellos es el túnel de Hida.
En el túnel de Hida, durante el invierno, observamos un fenómeno en el que el ambiente visual del túnel se deterioraba.
Pensamos que había dos causas. La primera era la entrada de niebla generada fuera del túnel en el túnel, y la segunda era la entrada de aire frío del exterior en el túnel caliente, lo que provocaba la formación de niebla debido al cambio brusco de temperatura.
NEXCO ha estado utilizando su propio software de control de la ventilación del túnel para evitar la contaminación en los túneles causada por las emisiones de los automóviles y para proteger el medio ambiente alrededor de las salidas del túnel.
Además del control normal de la ventilación de los túneles, hemos añadido un método de control para reducir el deterioro del entorno visual causado por la niebla. El nuevo método de control detecta la niebla en el exterior del túnel y evita que entre en él, y también controla la velocidad del viento en la salida del túnel prediciendo la aparición de niebla en función de la diferencia de temperatura y humedad dentro y fuera del túnel.
El túnel de Hida es el segundo ejemplo de control de la niebla en un túnel en una región fría de Japón, pero el túnel de Hida ha introducido sus propias mejoras al analizar en detalle el mecanismo de generación de niebla en el túnel.
En este documento, describimos la construcción del algoritmo de control y el estado de la puesta a punto in situ.

UNE MÉTHODE DE CONTRÔLE POUR SUPPRIMER LA DÉTÉRIORATION DE L'ENVIRONNEMENT VISUEL CAUSÉE PAR LE BROUILLARD DANS LES TUNNELS ROUTIERS

Cet article décrit les mesures à prendre pour lutter contre le brouillard qui se produit dans les longs tunnels en hiver.
La voie rapide Tokai-Hokuriku est une autoroute qui traverse la partie centrale du Japon et relie le côté océan Pacifique et le côté mer du Japon, qui sont divisés par des régions montagneuses.
La partie centrale de la route comporte de nombreux tunnels et traverse des zones montagneuses à haute altitude. Le plus long d'entre eux est le tunnel de Hida.
Dans le tunnel de Hida, en hiver, nous avons observé un phénomène de détérioration de l'environnement visuel dans le tunnel.
Nous avons pensé qu'il y avait deux causes. La première était l'afflux de brouillard généré à l'extérieur du tunnel dans le tunnel, et la seconde était l'afflux d'air froid de l'extérieur dans le tunnel chaud, provoquant la formation de brouillard en raison du changement soudain de température.
NEXCO a utilisé son logiciel propriétaire de contrôle de la ventilation des tunnels pour prévenir la pollution dans les tunnels causée par les émissions automobiles et pour protéger l'environnement autour des sorties de tunnel.
En plus du contrôle normal de la ventilation des tunnels, nous avons ajouté une méthode de contrôle pour réduire la détérioration de l'environnement visuel causée par le brouillard. La nouvelle méthode de contrôle détecte le brouillard à l'extérieur du tunnel et l'empêche de pénétrer dans le tunnel. Elle contrôle également la vitesse du vent à la sortie du tunnel en prédisant l'apparition du brouillard sur la base de la différence de température et d'humidité à l'intérieur et à l'extérieur du tunnel.
Le tunnel de Hida est le deuxième exemple de contrôle du brouillard dans un tunnel situé dans une région froide du Japon, mais le tunnel de Hida a apporté ses propres améliorations en analysant en détail le mécanisme de génération du brouillard dans le tunnel.
Dans cet article, nous décrivons la construction de l'algorithme de contrôle et l'état d'avancement du réglage sur place.

1. INTRODUCTION

This paper reports on measures against fog that occurs in long tunnels during winter.

The Tokai-Hokuriku Expressway is a key expressway running across central Japan that connects the Pacific Ocean side and the Sea of Japan side of the main island of Japan, which is divided by mountainous areas. The mid-section of the expressway passes through high-altitude mountainous areas and is full of tunnels. The longest of these is the Hida Tunnel.

In winter, a phenomenon is observed in the Hida Tunnel where the visual environment for vehicles passing through deteriorates.

Up to now, NEXCO (Nippon Expressway Company) has been using its own tunnel ventilation control software to combat pollution in tunnels, caused by automobile exhaust gases, and protect the environmental around tunnel portals.

And in addition to the normal tunnel ventilation control measures, methods to suppress deterioration of the visual environment caused by fog were introduced at the Hida Tunnel.

This paper describes the construction of the control algorithms and the status of on-site tuning.

Fig.1: Deterioration of visual environment

2. CHARACTERISTICS OF HIDA TUNNEL AND POOR VISIBILITY COUNTERMEASURES BY ADVANCED VENTILATION CONTROL

As a means of efficiently implementing precise ventilation control of long tunnels to reduce power consumption and protect the environment, NEXCO has introduced, where needed, the model-based predictive ventilation control system (hereinafter referred to as "MPVC"), an advanced ventilation control system which predicts the environmental conditions inside the tunnel based on the traffic volume and controls ventilation by modelling the tunnel. One case of MPVC introduced in the past as a countermeasure for poor visibility in winter was at a tunnel on the Doto Expressway in the northern Japanese island of Hokkaido.

Since problems similar to those of the Doto Expressway tunnel had arisen in the Hida Tunnel on the Tokai-Hokuriku Expressway, solutions to the problems were sought based on the results of the Doto Expressway(1)(2). But to describe the differences of the two tunnels, first, the characteristics of the Hida Tunnel are summarized below.

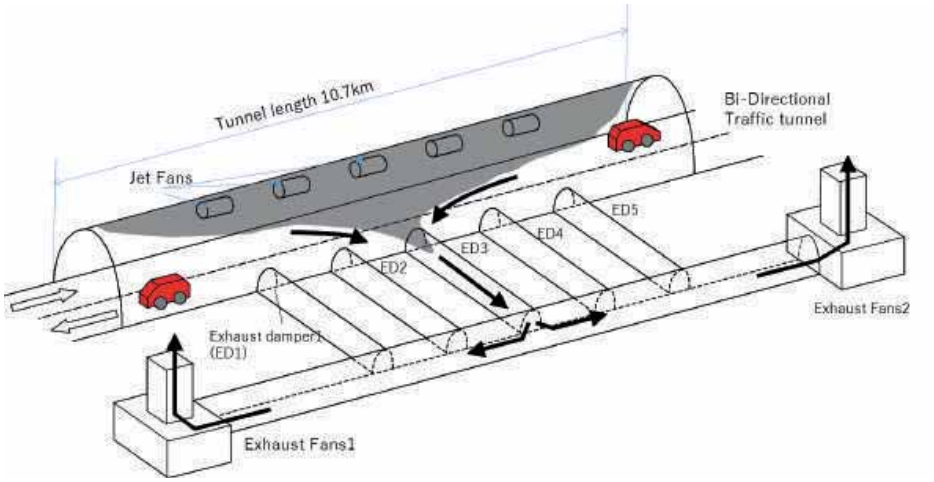


Fig.2 Overview of Hida Tunnel ventilation

(1) Formation of fog outside portal

-> not at Doto Expressway tunnel

(2) The ventilation method adopted is a combination of selective intensive longitudinal ventilation and normal longitudinal ventilation with jet fan (JF).

-> only longitudinal ventilation with jet fans at Doto Expressway tunnel.

(3) Ventilation time differs during selective intensive exhaust ventilation depending on position of selected exhaust duct.

-> Ventilation time is fixed as Doto Expressway tunnel uses only longitudinal ventilation with jet fan

(4) Outside temperature is predicted using the pattern method, but needed temperature data cannot be obtained.

-> Detailed temperature data from preliminary surveys available at Doto Expressway tunnel.

In other words, the arithmetic elements at the Hida Tunnel have increased compared with those of Doto Expressway tunnel due to the wide range of given conditions and control patterns at the Hida Tunnel. And it can be seen that the solution cannot be found just by remodeling the information from the Doto Expressway to the Hida Tunnel.

3. TYPES OF AND COUNTERMEASURES FOR POOR VISIBILITY DUE TO FOG AND CONDENSATION

The following three patterns of poor visibility owing to the previously mentioned two causes were considered.

(1) Condensation on the windshield of moving vehicles

A pattern in which comparatively warm air inside the tunnel is rapidly cooled by touching the vehicle's windshield which had been cooled by outside air, causing water vapor to condense on the glass surface and cloud the outer surface of the windshield.

(2) Condensation of water vapor inside the tunnel caused by outside air flowing into the tunnel and stirring the air in the tunnel

A pattern in which outside cold air sucked into the tunnel by the longitudinal wind flow in the tunnel stirs the air in the tunnel and the vapor unable to maintain its gaseous state, condense and turn into fog.

(3) Inflow of fog from outside the tunnel

A pattern in which fog formed outside the tunnel is sucked inside by the longitudinal air flow in the tunnel.

Of these patterns, fog is formed in (1) and (2) by the same in principle. Since condensation caused by air cooling rapidly in a relatively warm tunnel is the reason, both patterns can be remedied by eliminating the temperature difference that brings about the condensation.

Black curve in Fig. 3 shows the theoretical condensation conditions of vapor. But actually, the air is stirred as time passes after the influx of outside air, so the time allowance was investigated in advance at the Hida Tunnel. The condensation conditions were as follows: the air temperature outside the tunnel is 0°C or lower and 7°C or more lower than the dew-point temperature calculated from the absolute humidity inside the tunnel. It was decided to operate the ventilator and control the tunnel environment in advance to prevent condensation of water vapor in the tunnel when such conditions were predicted.

The reasons why pre-ventilation prevents condensation are as follows.

i) By ventilating the tunnel before the outside air temperature reaches the above-mentioned condensation conditions, it is possible to lower the temperature inside the tunnel without triggering condensation. Therefore, the temperature difference inside and outside the tunnel can be reduced without condensation.

ii) The fact that there is no fog outside the tunnel means that the amount of water vapor is less than or equal to the amount of saturated vapor at that temperature, so the absolute humidity in the tunnel can be lowered in advance by replacing the air.

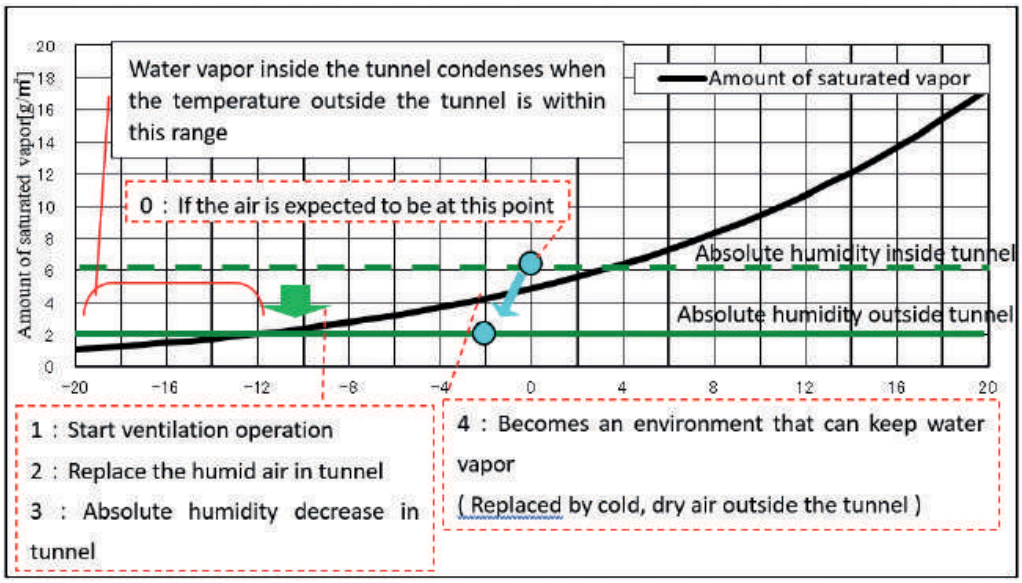


Fig.3 Flow of suppressing deterioration of visual environment

Although it is desirable to use past statistics to predict temperature and humidity, as it is done in normal ventilation, since the temperature and humidity meter had been newly installed at the Hida Tunnel this time and there is no past data, the predictions were made from the latest temperature and humidity transition data available (Fig. 2).

As a method of prediction, temperature changes from 15 minutes to 115 minutes earlier were divided into 6 units of 15 minutes, and weighted so that the most recent value has the greatest influence on the predicted value. This method is also used in traffic pan prediction for normal ventilation, and was adopted because the accuracy of the temperature was also high during the survey period.

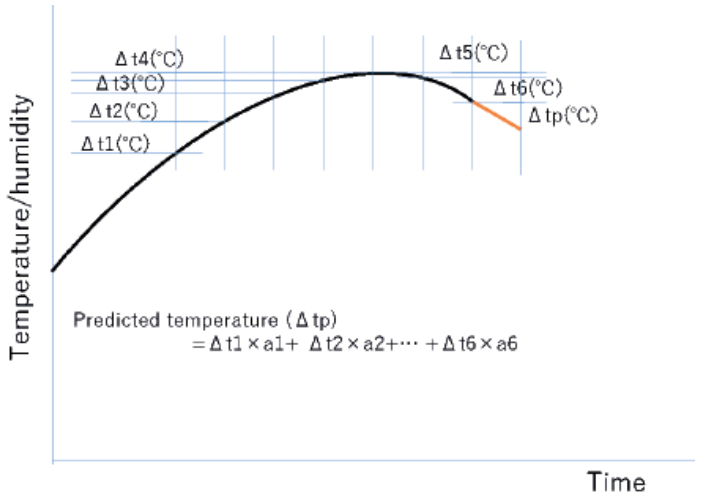


Fig.4 Prediction of temperature/humidity

On the other hand, since the solution for (3), which is a unique phenomenon for this tunnel, is to prevent fog from entering the tunnel, a BS meter was installed near the portal (outside the tunnel) to monitor the presence or absence of fog near the tunnel entrance. And it was decided to control the ventilation to prevent air from entering the tunnel from the side where the fog is present if fog was detected.

Ventilation needs to be controlled so that both of these two aspects are achieved; that is, to calculate the amount of ventilation that can replace the air from the current longitudinal wind speed and prediction if there is no fog at both portals, and if there is fog on one side, to take in air from the portal where fog is absent. If there is fog at both portals, it will be uncontrollable. Under such circumstances, the most efficient pattern is calculated and selected from the combination of jet fan longitudinal ventilation and selective intensive exhaustion. As for the selective intensive exhaust operation, exhaust dampers are installed at five locations, and the time required to replace the air differs depending on which damper is used to ventilate and how the jet fan longitudinal ventilation system is operated. The calculation is made considering these facts.

4. CONTROL PRIORITIES AND PARAMETER SETTINGS

In adding this control measure to the Hida Tunnel, it was necessary to place a priority ranking on the existing control measures, such as that for wind speed, soot and smoke transmittance and carbon monoxide concentration. But since the existing control measures are related to human life in an event of a fire, this control measure for fog was ranked at the lowest level.

This time, the following parameters related to the control measure, determined by preliminary investigations and environmental conditions, were added.

(1) Wind speed target value: 2m/s (From data at introduction of measures on Doto Expressway)

(2) Outside temperature threshold: intersection temperature difference (Difference between condensation point temperature in tunnel) -7°C or more and outside air temperature of 0°C or less (From preliminary survey)

(3) Portal BS value: 10% (Conforms to self-luminous delineator automatic control threshold of nearest rest facility)

(4) Fixed wind direction time: 60 to 90 minutes (Ventilation time is determined from the ventilation method, exhaust damper location, and wind speed of above (1)

(5) Valid/invalid months: Valid from November to following April (This is a measure for the winter season, and the limit is set to meet the control conditions and suppress unnecessary operations.)

5. BENEFITS

As the period in which the temperature and humidity were controlled was limited due to warm winters and failures of equipment, it will be necessary to pay close attention to the effect of the measures in the future.

However, an on-site maintenance staff reported that there was an incident where fog outside the tunnel was sucked in. But since the logged BS meter value was not bad, it might be that the installation position and fog judgment threshold need to be reviewed.

6. CONCLUSION

This is the second case of measures taken to suppress fog generated in winter using MPVC. But control methods differ depending on the ventilation method and environmental conditions at the tunnel, and it is not possible to install the previous control system as it is. However, as in this case, the problem may be solved by constructing the theory necessary for solving the problem and adding measuring instruments. It can be said that by changing the thinking, it may be possible to solve new problems from the tunnel-specific conditions.

In the future, we hope to contribute to providing a safer, more secure and comfortable expressways applying MPVC to solve various issues that arise in tunnels.

LONGITUDINAL VENTILATION SYSTEM FOR A LONG ROAD TUNNEL: OPTIMAL DESIGN WITH BATTERIES OF JET FANS AND CHALLENGES TO OVERCOME EXTREME FOGGY WEATHER CONDITION

Sunit Kanti Dhar
B.Sc. Engineering – Mechanical

An optimal design solution for a long (approximately 9 km) greenfield road tunnel mechanical ventilation system with an application of batteries of jet fans at a location where extreme foggy weather condition prevails for a third of the year. The main purpose is to optimize the design by applying longitudinal ventilation system and keep the vehicular pollution under control and fully functional, even during heavy fog and rainfall. The longitudinal ventilation system designed for normal mode shall also cater to an effective smoke management at any probable locations of the fire scenarios.

The design will be an innovative, yet it will be very practical for application and will harmonize good engineering practices and adopt international codes and guidelines with an objective to achieve safety criteria, particularly during an emergency situation.

The methodology, design aspect and details with in-depth calculations are discussed here in this paper.

SISTEMA DE VENTILACIÓN LONGITUDINAL PARA UN TÚNEL DE CARRETERA LARGO: DISEÑO ÓPTIMO CON BATERÍAS DE VENTILADORES DE CHORRO Y RETOS PARA SUPERAR LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS EXTREMAS DE NIEBLA

Una solución de diseño óptima para un sistema de ventilación mecánica de un túnel de carretera de gran longitud (aproximadamente 9 km) con una aplicación de baterías de ventiladores de chorro en un lugar en el que prevalecen condiciones meteorológicas de niebla extrema durante un tercio del año. El objetivo principal es optimizar el diseño mediante la aplicación de un sistema de ventilación longitudinal y mantener la contaminación vehicular bajo control y en pleno funcionamiento, incluso durante la niebla y las lluvias intensas. El sistema de ventilación longitudinal diseñado para el modo normal también se encargará de una gestión eficaz del humo en cualquier lugar probable de los escenarios de incendio.

El diseño será innovador, pero muy práctico para su aplicación y armonizará las buenas prácticas de ingeniería y adoptará los códigos y directrices internacionales con el objetivo de alcanzar los criterios de seguridad, especialmente durante una situación de emergencia.

La metodología, el aspecto del diseño y los detalles con cálculos en profundidad se discuten aquí en este documento.

.

SYSTÈME DE VENTILATION LONGITUDINALE POUR UN LONG TUNNEL ROUTIER : CONCEPTION OPTIMALE AVEC DES BATTERIES DE VENTILATEURS À JET ET DÉFIS POUR SURMONTER DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMEMENT BRUMEUSES

Une solution de conception optimale pour un système de ventilation mécanique d'un long tunnel routier (environ 9 km) sur un site vierge avec une application de batteries de ventilateurs à réaction à un endroit où des conditions météorologiques extrêmement brumeuses prévalent pendant un tiers de l'année. L'objectif principal est d'optimiser la conception en appliquant un système de ventilation longitudinale et de maintenir la pollution automobile sous contrôle et pleinement fonctionnelle, même en cas de brouillard et de pluies intenses. Le système de ventilation longitudinale conçu pour le mode normal doit également permettre une gestion efficace de la fumée à tout endroit probable des scénarios d'incendie.

La conception sera innovante, mais elle sera très pratique pour l'application et harmonisera les bonnes pratiques d'ingénierie et adoptera les codes et directives internationaux dans le but d'atteindre les critères de sécurité, en particulier dans une situation d'urgence.

La méthodologie, les aspects de la conception et les détails avec des calculs approfondis sont discutés dans cet article.

1. INTRODUCTION

The purpose of this paper is to present the challenges faced to overcome the extreme foggy weather condition prevails during rainy climatic condition for a third of the year in the location of this long road tunnel at a medium altitude hilly terrain.

The longitudinal mechanical ventilation system design philosophy with batteries of jet fans adopted for this approximately 8.67 km long unidirectional rural parallel twin greenfield road tunnels with four traffic lanes each tunnel, because of the terrain and for protection of the wildlife and the forest, particularly in the region where these twin tunnels are passing through.

The main purpose is to make it practically feasible, as well as optimizing the design to keep the vehicular pollutions under control and fully functional to high standard of international design parameters and criterion, even during heavy fog and rainfall, for normal mode ventilation, particularly during congestion and slow-moving traffic, as well as to cater to an effective smoke management at any probable locations of the fire incident.

The design is an innovative for application into such a long road tunnel with heavy traffic profile, and very practical for application and will harmonize with good engineering practices and international codes and guidelines with an objective to achieve highest standards of safety criteria, both during normal and emergency situation.

The design and methodology, including detailed calculations, were discussed herein this technical paper.

2. DESIGN

2.1. Design parameters under consideration for this case study:

2.1.1. Physical design parameters and geometry of a unidirectional rural parallel twin tunnels.

TABLE-1: Physical Parameters and Geometry of the Tunnels

Length of the Tunnels:	8.67	km
Number of Tunnel Bore:	2	tunnels
Number of Lanes per Tunnel:	4	lanes
Maximum Tunnel Altitude above sea level (@ East Portal):	700	m
Tunnel Slope / Gradient:	± 2.0	%
Tunnel Cross-sectional Area:	202	m^2
Tunnel Perimeter:	60	m
Tunnel Height:	9.5	m
Tunnel Width:	23.5	m

2.1.2 Traffic Input Data

TABLE-2: Traffic Profile and Density and Designed Vehicle Speed

Annual Average Daily Traffic (AADT)	65,000	vehicles/day
Peak Hour Traffic Volume @ 10% of AADT	6,500	vehicles/hour
Therefore, Peak Hour Traffic Volume per Tunnel	3,250	vehicles/hour/tunnel
Henceforth, Peak Hour Traffic Volume per Lane	813	vehicles/hour/lane
Maximum Design Speed of the Vehicles	130	Km/hour

TABLE-3: Traffic Composition

Category:	Passenger Cars (PC)		Light Commercial Vehicles (LCV)			Heavy Goods Vehicles (HGV)				
Type:	Car	Taxi	LMV	LCV	Mini Bus	Std. Bus	2 Axle	3 Axle	MAV (4-6 Axle)	MAV (>6 Axle)
Percentage:	39%	15%	5%	10%	2%	5%	5%	4%	10%	5%
Fuel Type Composition:										
Gasoline:	23%		1%			-				
Diesel:	31%		16%			29%				

2.1.3 Traffic Output Profile: Calculated1 for the Peak Hour Traffic with the Data of Table-1, 2 & 3 above.

TABLE-4: Fleet Composition in Both Tunnel at Different Traffic Vehicular Speed. For Down-Hill / Up-Hill Tubes

Velocity (Km/hr)	No. of Vehicles in Tunnels	No. of Cars		No. of LCV		No. of HGV		
		Gasoline	Diesel	Gasoline	Diesel	15t	23t	32t
0	3292	764	1013	22	537	165	296	494
10	1536	357	473	10	251	77	138	230
20	1409	327	434	10	230	70	127	211
30	939	218	289	6	153	47	85	141
40	704	164	217	5	115	35	63	106
50	564	131	173	4	92	28	51	85
60	470	109	145	3	77	23	42	70
70	403	93	124	3	66	20	36	60
80	352	82	108	2	57	18	32	53
90	313	73	96	2	51	16	28	47
100	282	65	87	2	46	14	25	42
110	256	59	79	2	42	13	23	38
120	235	55	72	2	38	12	21	35
130	217	50	67	1	35	11	20	33

2.1.4 Basis of Emission criteria being considered for estimation of the vehicular emission and pollution dilution by standard approach1.

TABLE-5: Design Emission Criteria

Base Year for the Emission Rates:	2018
Technology Standard Group / Class:	C
Design Year:	2030
Corresponding Time Shift Applicable:	10 years
Therefore, Year of Base Emission Rates for Class C:	2020

TABLE-6: Design Threshold Values for Emissions

$CO_{ambient}$	5	ppm	0.005716469	g/m^3
$CO_{admissible}$	70	ppm	0.080030571	g/m^3
$NO_{2\ ambient}$	0.1	ppm	0.000187782	g/m^3
$NO_{2\ admissible}$	1	ppm	0.001877824	g/m^3
Percentage of NO_2 in NO_x	20%	%		
Extinction Coefficient (Admissible), $K_{admissible}$	0.005	m^{-1}		
Extinction Coefficient (Ambient), $K_{ambient}$	0.000	m^{-1}		

2.2. Fresh Air Flow Rate Demand and Visibility Condition During Dense Foggy Weather:

2.2.1 Fresh Air Flow Rate Demand Calculated1 for the Peak Hour Traffic at every 10 km/hr intervals from standstill traffic (0 km/hr) to maximum design vehicular speed of 130 km/hr, for both Down-Hill and Up-Hill Tunnels by adopting standard approach for the emission estimation along with the Data of Table-4, 5 & 6 above.

TABLE-7: Fresh Air Flow Rate Demand for Down-Hill Tunnel

Vehicle Speed	CO	NO_2	Opacity		Max Air Demand
(km/hr)	(m^3/s)	(m^3/s)	(m^3/s)		(m^3/s)
0	29	538	130		538
10	44	1077	257		1077
20	45	1006	295		1006
30	29	680	236		680
40	23	486	210		486
50	20	371	193		371
60	16	312	182		312
70	16	273	177		273
80	15	250	177		250
90	14	250	174		250
100	15	248	177		248
110	17	282	179		282
120	21	327	184		327
130	32	388	190		388
Max FA Demand @ Down-Hill Tunnel:				1077	m^3/s

TABLE-7: Fresh Air Flow Rate Demand for Down-Hill Tunnel

Vehicle Speed	CO	NO_2	Opacity		Max Air Demand
(km/hr)	(m^3/s)	(m^3/s)	(m^3/s)		(m^3/s)
0	29	538	130		538
10	59	1342	311		1342
20	72	1378	359		1378
30	48	1003	302		1003
40	44	871	285		871
50	39	767	271		767
60	38	869	268		869
70	41	950	273		950
80	43	1053	280		1053
90	44	1033	284		1033
100	45	1021	282		1021
110	56	1051	282		1051
120	75	1080	283		1080
130	117	1142	290		1142
Max FA Demand @ Up-Hill Tunnel:				**1378**	m^3/s

2.2.2 Also, to evaluate the visibility situations due to extreme Foggy weather condition during monsoon season, fresh air flow rate demand has been calculated for the same peak hour traffic at various vehicular speed as in sl. no. 2.2.1 above, with improved visibility Extinction Coefficient values – ranging from design value of 0.005 m-1 down to 0.001 m-1. The detail effects on the Fresh Air Demand at various extinction coefficient values has been summarized in the below in Table-9. It has been observed that the maximum fresh air demand requirement in both the down-hill and up-hill tunnels has little or no changes up to extinction coefficient value of 0.002 m^{-1}.

However, at extinction coefficient value of 0.001 m-1 there is a significant change in the maximum fresh air demand requirement in both the down-hill tunnel (increases by 37%) and up-hill tunnel (increases by 30%) than that of with the design extinction coefficient value of 0.005 m^{-1}.

The study of the impact due to this aspect shall be dealt after detailed calculations of the total thrust and jet fan requirement and of course the study on the length of light beam impacts, and the economics of the optimization on the design, later on the subsequent chapters / articles, below.

2.2.3 Comparative study of the Extinction Coefficient with respect to percentage of Intensity of the Light at the Receiver vis-s-vis Intensity of the Light Source, according to extinction coefficient expressed by equation[1],

$$K = - (1/L) \times \ln(I/Io)$$

Where, L = Beam length between source and receiver

Io = Intensity of the Light Source

I = Intensity of the Light at the Receiver

Therefore, the comparative study of Table-10 vis-à-vis Table-9 below reflects that by improving the Extinction Coefficient, resulting considerable improvement of either the Length of Light Beam or the Percentage of Intensity of the Light at the Receiver, the Fresh Air Demand has very little or no changes up to an extinction coefficient value of 0.002 m-1. Therefore, preliminary review and study could be conclusive that during extreme Foggy weather conditions in the region the estimated fresh air demand can meet the visibility parameters comfortably up to an extinction coefficient value of 0.002 m-1 (i.e., having at least 805 m long light beam with 20% intensity of the light at the receiver or safe design light beam length of 322 m with 52.5% intensity of the light at the receiver) without any modification in the normal ventilation design criteria adopted, even though quantum of fresh air requirement increases for pollution dilution due to opacity, by considering improving admissible extinction coefficient and zero ambient extinction coefficient, but the fresh air requirement for dilution of NO2 still governs here in the design criteria of this particular case study.

The study of the impact due to this aspect shall be dealt after detailed calculations of the total thrust and jet fan requirement and of course the study on the length of light beam impacts, and the economics of the optimization on the design, later on the subsequent articles, below.

TABLE-9: Fresh Air Flow Rate Demand Summary for Multiple Extinction Coefficients

Summary of Normal Mode Ventilation Fresh Air Demand for Multiple Extinction Coefficient to Evaluate the Visibility Situations due to Extreme Foggy Weather during Monsoon									
Down-Hill (LHS) Tunnel					**Up-Hill (RHS) Tunnel**				
Vehicle Speed (km/hr)	CO (m^3/s)	NO_2 (m^3/s)	Opacity (m^3/s)	Max Air Demand (m^3/s)	Vehicle Speed (km/hr)	CO (m^3/s)	NO_2 (m^3/s)	Opacity (m^3/s)	Max Air Demand (m^3/s)
FA with Design Extinction Coefficient:				**0.005 m^{-1}**	FA with Design Extinction Coefficient:				**0.005 m^{-1}**
0	29	538	130	538	0	29	538	130	538
10	44	1077	257	1077	10	59	1342	311	1342
20	45	1006	295	1006	20	72	1378	359	1378
30	29	680	236	680	30	48	1003	302	1003
50	20	371	193	371	50	39	767	271	767
70	16	273	177	273	70	41	950	273	950
100	15	248	177	248	100	45	1021	282	1021
130	32	388	190	388	130	117	1142	290	1142
Max FA Demand @ DownHill Tunnel:				**1077 m^3/s**	Max FA Demand @ UpHill Tunnel:				**1378 m^3/s**
FA with Extinction Coefficient:				**0.003 m^{-1}**	FA with Extinction Coefficient:				**0.003 m^{-1}**
0	29	538	217	538	0	29	538	217	538
10	44	1077	428	1077	10	59	1342	518	1342
20	45	1006	492	1006	20	72	1378	598	1378
30	29	680	394	680	30	48	1003	503	1003
50	20	371	322	371	50	39	767	452	767
70	16	273	296	296	70	41	950	454	950
100	15	248	294	294	100	45	1021	470	1021
130	32	388	316	388	130	117	1142	483	1142
Max FA Demand @ DownHill Tunnel:				**1077 m^3/s**	Max FA Demand @ UpHill Tunnel:				**1378 m^3/s**
FA with Extinction Coefficient:				**0.002 m^{-1}**	FA with Extinction Coefficient:				**0.002 m^{-1}**
0	29	538	325	538	0	29	538	325	538
10	44	1077	642	1077	10	59	1342	777	1342
20	45	1006	738	1006	20	72	1378	896	1378
30	29	680	591	680	30	48	1003	755	1003
50	20	371	483	483	50	39	767	678	767
70	16	273	444	444	70	41	950	681	950
100	15	248	442	442	100	45	1021	705	1021
130	32	388	474	474	130	117	1142	725	1142
Max FA Demand @ DownHill Tunnel:				**1077 m^3/s**	Max FA Demand @ UpHill Tunnel:				**1378 m^3/s**
FA with Extinction Coefficient:				**0.001 m^{-1}**	FA with Extinction Coefficient:				**0.001 m^{-1}**
0	29	538	651	651	0	29	538	651	651
10	44	1077	1283	1283	10	59	1342	1553	1553
20	45	1006	1477	1477	20	72	1378	1793	1793
30	29	680	1182	1182	30	48	1003	1509	1509
50	20	371	966	966	50	39	767	1356	1356
70	16	273	887	887	70	41	950	1363	1363
100	15	248	883	883	100	45	1021	1411	1411
130	32	388	949	949	130	117	1142	1450	1450
Max FA Demand @ DownHill Tunnel:				**1477 m^3/s**	FA with Extinction Coefficient:				**1793 m^3/s**

TABLE-10: Comparative of Visibility Condition vis-à-vis Extinction Coefficient

Extinction Coefficient (Admissible)	K_{adm} m^{-1}	**0.005**	0.003		0.002		0.001	
Extinction Coefficient (Ambient)	K_{amb} m^{-1}	**0**	0		0		0	
Extinction Coefficient (Difference)	K m^{-1}	**0.005**	0.003		0.002		0.001	
Percentage of Intensity of the Light at the Reciever (I) w.r.t. Source (I_o)	I/I_o %	**20%**	20%	38.1%	20%	52.5%	20%	72.5%
Length of Light Beam	L m	**322**	536	322	805	322	1609	322
Remarks / Observations		Design Criteria	More Light beam length @ design I/I_o ratio & better I/I_o ratio @ design Light beam length					

2.2.4 Dense Fog Analysis:

2.2.4.1 The mass concentration of $PM_{2.5}$ ($\mu_{PM2.5}$) is ranged from 121–375 µg/m³, and the interaction between fog droplets and fine particles is analysed[2].

2.2.4.2 And with the equation 5[1]: Extinction Coefficient, $K = f_{vis}.\mu_{PM2.5}$

Where, f_{vis} is a conversion factor = 0.0047 m²/mg

$\mu_{PM2.5}$ = 375 µg/m³ = 0.375 µg/m³ + 15% (in excess for more safety) = 0.430 µg/m³

Therefore, Extinction Coefficient due to dense fog at ambient, K_{amb} = 0.002 m^{-1}

TABLE-11: Fog Analysis Visibility Condition vis-à-vis Extinction Coefficient

Extinction Coefficient (Admissible)	K_{adm} m^{-1}	**0.005**	**0.007**	
Extinction Coefficient (Ambient)	K_{amb} m^{-1}	**0.002**	**0.002**	
Extinction Coefficient (Difference)	K m^{-1}	**0.003**	**0.005**	
Percentage of Intensity of the Light at the Reciever (I) w.r.t. Source (I_o)	I/I_o %	20%	38.1%	20%
Length of Light Beam	L m	536	322	322
Remarks / Observations		More Light beam length @ design I/I_o ratio & better I/I_o ratio @ design Light beam length		

2.2.4.3 Henceforth, $K = K_{adm} - K_{adm} = 0.005\ m^{-1} - 0.002\ m^{-1} = 0.003\ m^{-1}$ or

$K = K_{adm} - K_{adm} = 0.007\ m^{-1} - 0.002\ m^{-1} = 0.005\ m^{-1}$,

which shall still be within the acceptable limit of visibility as demonstrated above in article 2.2.3 and Table-11 (i.e., having at least 536 m long light beam with 20% intensity of the light at the receiver or safe design light beam length of 322 m with 38.1% intensity of the light at the receiver or at least 322 m long light beam with 20% intensity of the light at the receiver, even when considering in the design with hazy extinction coefficient of 0.007 m^{-1} prevailing inside the tunnel) without any modification in the normal ventilation design criteria adopted, even though quantum of fresh air requirement increases with decreasing differences of extinction coefficient between admissible and ambient for pollution dilution due to opacity, but the fresh air requirement for dilution of NO_2 still governs here in the design criteria of this particular case study.

2.3. Jet Fan Thrust Calculation Procedure for Longitudinal Ventilation:

2.3.1 To determine the quantities / number of jet fans required for the longitudinal road tunnel ventilation system it depends on the total thrust required to overcome the gross total pressure drops / losses in the tunnel.

The total pressure loss in the tunnel is sum total of the following losses:

- Pressure drops due to tunnel entrance and exit, ΔP_{ent} and ΔP_{exit}
- Pressure drops due to tunnel wall friction, ΔP_{wf}
- Pressure drops due to adverse wind, ΔP_{w}
- Pressure drops / gains due to vehicles / piston effects (Pressure lost or gained depends on whether air is moving faster or slower than the vehicle), ΔP_{veh}
- Pressure drops due to chimney effect / fire buoyancy (pressure is lost for downhill ventilation while pressure is gained in uphill direction), ΔP_{ce}
- Pressure drops caused due to fire blockage (in fire scenario only), ΔP_{fire}
- Pressure drops due to meteorological conditions (barometric pressure difference), ΔP_{met}

Therefore,

Total Pressure drop, $\Delta PTotal = \Delta P_{ent} + \Delta P_{exit} + \Delta P_{wf} + \Delta P_{w} + \Delta P_{veh} + \Delta P_{ce} + \Delta P_{fire} + \Delta P_{met}$

2.3.2 The formulae to compute various pressure losses are provided below:

2.3.2.1 Pressure loss due to tunnel entrance and exit:

$$\Delta_{ent/exit} = 0.5 \times \xi \times \rho \times V^2$$

where,

ρ = air density (kg/m^3)

ξ = pressure loss coefficient, (0.5 for entrance and 1 for exit); these values are standard & are given in IDELCHEK handbook

V = air velocity (m/s)

2.3.2.2 Pressure loss due to wall friction:

$$\Delta P_{wf} = \{0.5 \times \lambda \times \rho \times V^2 \times L\} \div D_h$$

where,

ρ = air density (kg/m3)

λ = friction factor

L = tunnel length considered (m)

V = air velocity (m/s)

D_h = hydraulic diameter of the tunnel (m)

2.3.2.3 Pressure loss due to adverse wind:

$$\Delta P_w = 0.5 \times \rho \times W^2$$

where,

ρ = air density (kg/m^3)

W = wind velocity (m/s)

2.3.2.4 Pressure loss due to vehicles:

$$\Delta P_{veh} = 0.5 \times N \times Cd \times \{\rho \times (V - V_{vehicle}) \times [abs(V - V_{vehicle})]\} \times (A_{vehicle} \div A_{tunnel})$$

where,

ρ = air density (kg/m^3)

N = number of vehicles in tunnel

C_d = drag coefficient for vehicles, (0.4 for car, 0.5 for LCV, 0.8 for HGV)

V = air velocity in tunnel (m/s)

$V_{vehicle}$ = vehicle speed (m/s)

$A_{vehicle}$ = vehicle frontal area (m^2)

A_{tunnel} = tunnel cross section area (m^2)

From the above equation, it is quite evident that if vehicle speed is more than tunnel air speed, pressure is gained because of piston effect. Therefore, for higher vehicle speed, only piston effect can take care of the pollution dilution and in all likelihood no mechanical ventilation will be required, as it will be sufficient to induce fresh air flow.

2.3.2.5 Pressure loss due to chimney effect is given by:

$$\Delta P_{ce} = \gamma \times (\rho_0 - \rho) \times g \times L$$

where,

γ = tunnel slope (positive for uphill and negative for downhill)

ρ_0 = air density of outside air at the same altitude (kg/m^3)

ρ = air density in the tunnel at the fire location (kg/m^3)

g = gravitational acceleration (m/s^2)

L = tunnel length considered for the chimney effect (m)

Because of heat transfer between hot smoke and tunnel wall, temperature decreases along the tunnel downstream of fire location. Therefore, average density of tunnel air should be considered in chimney effect calculation.

2.3.2.6 Pressure loss due to fire blockage:

$$\Delta P_{fire} = (9 \times 10{-}5 \times Q_a) \div (D_h^2 \times V)$$

where,

V = air velocity (m/s)

D_h = hydraulic diameter of the tunnel (m)

Q_a = convective heat transferred from the fire to the air, about 70% of the heat released by the fire (remaining 30% is transferred to the tunnel walls through conduction)

2.3.2.7 Pressure loss due to meteorological conditions:

Meteorological effects caused due to natural stack effects, barometric pressure differences and wind effects. But pressure drop due to wind effects already being considered in article 2.3.2.3, above. Therefore, hereinunder only natural stack effects & barometric pressure differences will be considered for calculations due to meteorological effects.

That is, $\Delta P_{met} = \Delta P_{stack} + \Delta P_{barometric}$

2.3.2.7.1 Pressure loss due to natural stack effects:

A positive temperature difference between tunnel and ambient air will cause a natural stack effect due to the buoyancy of the warmer air inside the tunnel. The pressure difference caused by temperature differences is calculated with the following formula:

$$\Delta P_{stack} = \gamma \times (\rho_{out} - \rho_{in}) \times g \times L_{tunnel}$$

where,

γ = tunnel slope (positive for uphill and negative for downhill)

ρ_{out} = air density of outside air during summer & winter (kg/m^3)

ρ_{in} = average air density inside the tunnel (kg/m^3)

g = gravitational acceleration (m/s^2)

L_{tunnel} = tunnel length considered for the stack effect (m)

Ambient and in-tunnel temperature:

The following average in-tunnel temperature; winter (minimum), summer (maximum) and monsoon ambient air temperatures and its respective relative humidity (RH) are being considered at the tunnel location:

- $T_{in\text{-}average}$ = 25°C
- $T_{out\text{-}winter}$ = 15°C with RH = 40%
- $T_{out\text{-}summer}$ = 40°C with RH = 35%
- $T_{out\text{-}monsoon}$ = 22°C with RH = 100% (densely Foggy)

TABLE-12: Natural Stack Effect in Winter and Summer

Season	T_{in} °C	ρ_{in} kg/m^3	T_{out} °C	ρ_{out} kg/m^3	ΔP_{stack} Pa	
Winter	25	1.093	15	1.128	59.0	Uphill
Summer	25	1.093	40	1.045	82.0	Downhill
Monsoon	25	1.093	22	1.103	17.4	Uphill

In winter, the in-tunnel air is warmer than the ambient air. Therefore, natural buoyancy is expected in up-hill direction.

In summer, the in-tunnel air is colder than the ambient air. Therefore, a natural buoyancy is expected in down-hill direction.

Table-12 shows the expected stack effects with the assumed temperatures.

2.3.2.7.2 Barometric Pressure:

The tunnel under consideration passes through hilly terrain of the Western Ghats which rises approximately 500 m above the tunnel axis. Due to this considerable height of the mountains, a substantial difference meteorological behaviours are expected on both tunnel portals. The differential barometrical pressure on both tunnel portals could be the main driving force causing a longitudinal air flow in the tunnel tubes.

During normal operation, the pressure difference may support the longitudinal ventilation to minimise power consumption. However, for emergency / fire mode, the tunnel ventilation system shall be designed to counteract these external forces and ensure smoke control inside the tunnel.

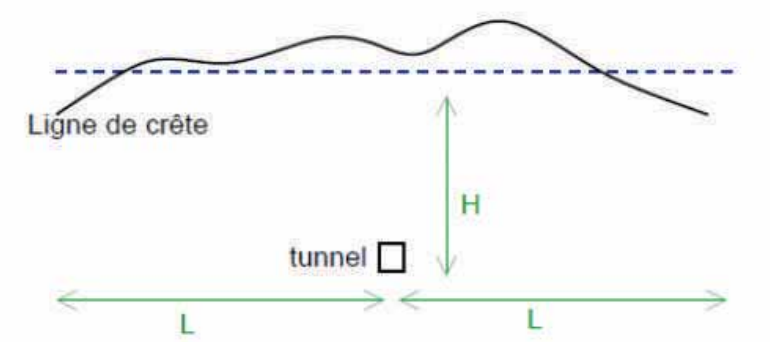


Figure-1: Definition of rock cover height (L = tunnel length)

Meteorological pressure difference may be estimated according to the following formula (The formula, which has been empirically established from experiments conducted on the tunnels of Frejus, Mont Blanc and Lioran and has reference to CETU guideline. This formula may be used in the absence of real-time barometric data):

$\Delta P_{barometric} = 0.4 \times H$

where,

H = rock / mountain cover (in metre) calculated as the average height over twice the tunnel length perpendicular to the tunnel axis (refer Figure-1) and 0.4 is a factor with dimension Pa/metre

In this case study, with L = 8670 m, calculated average H = 270 m

Therefore, $\Delta P_{barometric} = 0.4$ (Pa/m) x 270 m = 108 Pa

Note: The CETU guideline, however suggests for a more accurate estimate should be made with high precision barometers.

Therefore, in the absence of real-time barometric data or measurements, 10% safety factor may be considered in barometric pressure.

Thus, Δ barometric = 108 Pa + 10% = 118.8 Pa (say, ±120 Pa for both directions)

2.3.2.7.3 Pressure loss due to adverse wind (with reference to article 2.1.2.3, above):

$\Delta P_w = 0.5 \times \rho \times W^2$

where,

ρ = air density (kg/m^3) = 1.128 kg/m^3 @ Winter; 1.045 kg/m^3 @ Summer and 1.103 kg/m^3 @ Monsoon

W = wind velocity (m/s) = 7 m/s (approximately 25 km/hour)

Therefore, $\Delta P_w = 0.5 \times 1.128 \times 72 = 27.63$ Pa (say, 28 Pa)

2.3.2.7.4 Summary of Meteorological pressure differences:

TABLE-13: Total expected meteorological pressures between portals

Meteorological effect	Pressure ΔP (Downhill) Pa	Pressure ΔP (Uphill) Pa
Adverse Wind Pressure Loss, ΔP_{wind}	28	28
Natural Stack Effect, ΔP_{stack}	82	59
Barometric Pressure, $\Delta P_{barometric}$	120	120
Total Meteorological Pressure, ΔP_{met}	230	207
without wind effect, ΔP_{met}	**202**	**179**

3. JET FANS CALCULATIONS FOR QUANTITIES

3.1. Jet Fan Calculation Procedure for Longitudinal Ventilation:

3.1.1 Based on the above equations at article 2.3, the total required thrust for each tunnel for longitudinal ventilation system is calculated.

The total required thrust can be calculated by the following formula:

$$T_{Total} = \Delta P_{Total} \times AP_{tunnel}$$

where,

TTotal = Total thrust required (N)

ΔP_{Total} = Total Pressure drop (Pa)

AP_{tunnel} = tunnel free area (m^2)

Total installed thrust shall be more than total thrust needed because of inefficiency associated with jet fans.

Jet fan loses its thrust when it is located near the tunnel walls / crown because jet attaches to walls / crown (Coanda effect) resulting into frictional losses. It also loses its efficiency because of tunnel air velocity.

There is also a derating in thrust produced by jet fans if it handles hot air / smoke.

3.1.2 Number of operating jet fans required = Total installed thrust / Thrust of each Jet fan.

$$N_{Jet\ Fan} = T_{Total} \div T_{Jet\ Fan}$$

where,

T_{Total} = Total thrust required (N)

$T_{Jet\ Fan}$ = Jet Fan thrust (N)

3.1.3 Specifications of the Jet Fan under consideration:

Jet Fan bench Thrust = 2200 N

Jet Fan Diameter = 1500 mm (Internal)

Fan Air Velocity = 32.2 m/s

Jet Fan bench Air Density = 1.2 kg/m^3

Jet Fan Temperature Resistance = 250^{0}C for 2 hours

3.1.4 Further, two sets of additional jet fans shall be considered as redundancy for each tube. It is assumed that one set is out for maintenance while one set is destroyed due to fire.

3.1.5 For estimation of overall efficiency estimation of jet fan following derating factors are to be considered while determining the number of operating jet fans required:

3.1.5.1 Installation efficiency of the jet fan on a conservative side is considered as, $\eta_i = 0.8$ for 100 mm spacing between jet fan outer top edge to soffit of the tunnel crown

3.1.5.2 Derating due to velocity factor

Veloity derating factor, $\eta_v = [1 - (V_{tunnel\ air} \div V_{jet\ fan})]$

where,

$V_{tunnel\ air}$ = tunnel air velocity at respective vehicular speed (m/s)

$V_{jet\ fan}$ = jet fan air velocity for reference jet fan (m/s)

3.1.5.3 Derating due to density factor

Density derating factor, $\eta_\rho = \rho_{avg} \div \rho_{ref}$

where,

ρ_{avg} = average air density in tunnel (kg/m^3)

ρ_{ref} = standard air density for reference jet fan (kg/m^3)

Note: In fire scenario, average density is calculated for the incident tunnel (based on average temperature as described in article 3.2, below.

3.1.6 Total number of actual operating jet fans required after consideration of an overall efficiency,

$N_{TOTAL} = N_{Jet\ Fan} \div \{\eta_i \times \eta_v \times \eta_\rho\}$

TABLE-14: CALCULATIONS FOR JET FANS @ DOWNHILL TUNNEL DURING NORMAL MODE

Calculations of Pressure Losses and No. of Jet Fans for Design Fresh Air Demand at Different Traffic Speed and Extinction Coefficient and Weather Condition																		
Vehicle Speed (Km/hr)	Inlet Losses (Pa)	Exit Losses (Pa)	Wall Friction Losses (Pa)	Losses due to Adverse Wind Effect (Pa)	Car Piston Effect Vehicular Losses (Pa)	LCV Piston Effect Vehicular Losses (Pa)	HGV Piston Effect Vehicular Losses (Pa)	Meteorological Pressure Losses (Pa)	Total Pressure Loss (Pa)	Total Thrust Required (N) or (kg-m/s2)	Average Tunnel Temperature (°C)	Average Air Density in Tunnel (kg/m3)	No. of Jet Fans Reqd. @ Average Air Density	Number of Working Jet Fans (rounded off)	Number of Jet Fans in One Set	Number of Standby Jet Fans	Total Number of Jet Fans	REMARKS
Ventilation of Downhill Tunnel during **Summer** (40°C Ambient Temperature & **Dry** Weather) with Extinction Coefficient, K = **0.005 m^{-1}**																		Negative "Total pressure loss" indicate that piston effect is sufficient to meet the fresh air demand at that vehicular speed
0	2	4	98	26	26	15	98	200	469	94647	40	1	67	68	2	4	72	
10	7	15	390	26	11	7	42	200	698	141058	40	1	110	111	2	4	116	
20	6	13	341	26	-1	0	-2	200	583	117715	40	1	91	91	2	4	96	
30	3	6	156	26	-26	-15	-97	200	252	50832	40	1	37	38	2	4	42	
40	2	3	79	26	-60	-35	-224	200	-10	0	40	1	0	0	2	4	4	
50	1	2	46	26	-91	-54	-344	200	-215	0	40	1	0	0	2	4	4	
70	0	1	25	26	-147	-87	-553	200	-535	0	40	1	0	0	2	4	4	
100	0	1	21	26	-222	-131	-834	200	-939	0	40	1	0	0	2	4	4	
130	1	2	51	26	-283	-167	-1064	200	-1235	0	40	1	0	0	2	4	4	
Ventilation of Downhill Tunnel during **Winter** (15°C Ambient Temperature & **Dry** Weather) with Extinction Coefficient, K = **0.005 m^{-1}**																		
0	2	4	105	28	28	17	106	200	490	98962	15	1	65	66	2	4	70	
10	8	16	422	28	12	7	45	200	738	149062	15	1	108	109	2	4	114	
20	7	14	368	28	-1	0	-2	200	613	123861	15	1	89	89	2	4	94	
30	3	6	168	28	-28	-16	-105	200	256	51660	15	1	35	35	2	4	40	
40	2	3	86	28	-64	-38	-242	200	-26	0	15	1	0	0	2	4	4	
50	1	2	50	28	-99	-58	-371	200	-248	0	15	1	0	0	2	4	4	
70	1	1	27	28	-159	-94	-597	200	-594	0	15	1	0	0	2	4	4	
100	0	1	22	28	-240	-141	-900	200	-1030	0	15	1	0	0	2	4	4	
130	1	2	55	28	-306	-180	-1149	200	-1349	0	15	1	0	0	2	4	4	
Ventilation of Downhill Tunnel during **Monsoon** (22°C Ambient Temperature & **Wet** Weather) with Extinction Coefficient, K = **0.005 m^{-1}**																		
0	2	4	103	27	28	16	104	200	484	97686	22	1	66	66	2	4	70	
10	8	16	412	27	12	7	44	200	726	146695	22	1	109	109	2	4	114	
20	7	14	360	27	-1	0	-2	200	604	122044	22	1	89	90	2	4	94	
30	3	6	164	27	-27	-16	-103	200	255	51415	22	1	35	36	2	4	40	
40	2	3	84	27	-63	-37	-237	200	-21	0	22	1	0	0	2	4	4	
50	1	2	49	27	-97	-57	-363	200	-238	0	22	1	0	0	2	4	4	
70	1	1	27	27	-155	-92	-584	200	-576	0	22	1	0	0	2	4	4	
100	0	1	22	27	-234	-138	-881	200	-1003	0	22	1	0	0	2	4	4	
130	1	2	54	27	-299	-176	-1124	200	-1315	0	22	1	0	0	2	4	4	
Ventilation of Downhill Tunnel during **Monsoon** (22°C Ambient Temperature & **Foggy** Weather) with Extinction Coefficient, K = **0.003 m^{-1}**																		
0	2	4	103	27	28	16	104	200	484	97686	22	1	66	66	2	4	70	
10	8	16	412	27	12	7	44	200	726	146695	22	1	109	109	2	4	114	
20	7	14	360	27	-1	0	-2	200	604	122044	22	1	89	90	2	4	94	
30	3	6	164	27	-27	-16	-103	200	255	51415	22	1	35	36	2	4	40	
40	2	3	84	27	-63	-37	-237	200	-21	0	22	1	0	0	2	4	4	
50	1	2	49	27	-97	-57	-363	200	-238	0	22	1	0	0	2	4	4	
70	1	1	31	27	-154	-91	-577	200	-561	0	22	1	0	0	2	4	4	
100	1	1	31	27	-230	-136	-866	200	-972	0	22	1	0	0	2	4	4	
130	1	2	54	27	-299	-176	-1124	200	-1315	0	22	1	0	0	2	4	4	
Ventilation of Downhill Tunnel during **Monsoon** (22°C Ambient Temp. & **Densely Foggy** Weather) with Extinction Coefficient, K = **0.002 m^{-1}**																		
0	2	4	103	27	28	16	104	200	484	97686	22	1	66	66	2	4	70	
10	8	16	412	27	12	7	44	200	726	146695	22	1	109	109	2	4	114	
20	7	14	360	27	-1	0	-2	200	604	122044	22	1	89	90	2	4	94	
30	3	6	164	27	-27	-16	-103	200	255	51415	22	1	35	36	2	4	40	
40	2	4	98	27	-60	-36	-227	200	8	1553	22	1	1	2	2	4	6	
50	2	3	83	27	-88	-52	-330	200	-156	0	22	1	0	0	2	4	4	
70	1	3	70	27	-141	-83	-531	200	-455	0	22	1	0	0	2	4	4	
100	1	3	69	27	-218	-128	-818	200	-864	0	22	1	0	0	2	4	4	
130	2	3	80	27	-291	-172	-1096	200	-1248	0	22	1	0	0	2	4	4	
Ventilation of Downhill Tunnel during **Monsoon** (22°C Ambient Temp. & **Densely Foggy** Weather) with Extinction Coefficient, K = **0.001 m^{-1}**																		
0	3	6	150	27	40	24	151	200	601	121500	22	1	83	84	3	6	90	
10	11	22	585	27	23	14	87	200	970	195877	22	1	151	151	3	6	156	
20	15	29	775	27	5	3	19	200	1073	216840	22	1	173	174	3	6	180	
30	9	19	497	27	-7	-4	-26	200	715	144514	22	1	109	110	3	6	117	
40	7	15	390	27	-29	-17	-110	200	484	97692	22	1	72	72	3	6	78	
50	6	13	331	27	-55	-33	-207	200	282	57027	22	1	41	42	3	6	48	
70	5	11	280	27	-108	-64	-404	200	-53	0	22	1	0	0	3	6	6	
100	5	11	277	27	-182	-107	-684	200	-454	0	22	1	0	0	3	6	6	
130	6	12	320	27	-252	-149	-949	200	-785	0	22	1	0	0	3	6	6	

TABLE-15: CALCULATIONS FOR JET FANS @ UPHILL TUNNEL DURING NORMAL MODE

Calculations of Pressure Losses and No. of Jet Fans for Design Fresh Air Demand at Different Traffic Speed and Extinction Coefficient and Weather Condition

Vehicle Speed (Km/hr)	Inlet Losses (Pa)	Exit Losses (Pa)	Wall Friction Losses (Pa)	Losses due to Adverse Wind Effect (Pa)	Car Piston Effect Vehicular Losses (Pa)	LCV Piston Effect Vehicular Losses (Pa)	HGV Piston Effect Vehicular Losses (Pa)	Meteorological Pressure Losses (Pa)	Total Pressure Loss (Pa)	Total Thrust Required (N) or (Kg-m/s2)	Average Tunnel Temperature (°C)	Average Air Density in Tunnel (kg/m3)	No. of Jet Fans Reqd. @ Average Air Density	Number of Working Jet Fans (rounded off)	Number of Jet Fans in One Set	Number of Standby Jet Fans	Total Number of Jet Fans	REMARKS
Ventilation of Uphill Tunnel during **Summer** (40°C Ambient Temperature & **Dry** Weather) with Extinction Coefficient, K = **0.005 m^{-1}**																		Negative "Total pressure loss" indicate that piston effect is sufficient to meet the fresh air demand at that vehicular speed
0	2	4	98	26	26	15	98	180	449	90604	40	1	64	65	3	6	72	
10	12	23	605	26	26	15	96	180	983	198507	40	1	163	164	3	6	171	
20	12	24	639	26	3	1	9	180	894	180656	40	1	150	150	3	6	156	
30	6	13	339	26	-12	-7	-45	180	500	100993	40	1	78	78	3	6	84	
40	5	10	255	26	-36	-21	-137	180	381	56681	40	1	43	43	3	6	48	
50	4	8	198	26	-64	-38	-241	180	72	14446	40	1	11	11	3	6	18	
70	6	12	304	26	-98	-58	-367	180	4	761	40	1	1	1	3	6	6	
100	7	13	351	26	-163	-96	-611	180	-293	0	40	1	0	0	3	6	6	
130	8	17	438	26	-225	-133	-844	180	-533	0	40	1	0	0	3	6	6	
Ventilation of Uphill Tunnel during **Winter** (15°C Ambient Temperature & **Dry** Weather) with Extinction Coefficient, K = **0.005 m^{-1}**																		
0	2	4	105	28	28	17	106	180	470	94919	15	1	63	63	3	6	69	
10	12	25	654	28	28	16	104	180	1047	211402	15	1	161	162	3	6	168	
20	13	26	690	28	3	2	10	180	951	192129	15	1	147	148	3	6	153	
30	7	14	366	28	-13	-8	-48	180	525	106131	15	1	76	76	3	6	81	
40	5	10	275	28	-39	-23	-148	180	289	58294	15	1	41	41	3	6	48	
50	4	8	213	28	-69	-41	-260	180	63	12699	15	1	9	9	3	6	15	
70	6	12	328	28	-105	-62	-397	180	-30	0	15	1	0	0	3	6	6	
100	7	14	378	28	-175	-104	-660	180	-331	0	15	1	0	0	3	6	6	
130	9	18	473	28	-243	-143	-912	180	-589	0	15	1	0	0	3	6	6	
Ventilation of Uphill Tunnel during **Monsoon** (22°C Ambient Temperature & **Wet** Weather) with Extinction Coefficient, K = **0.005 m^{-1}**																		
0	2	4	103	27	28	16	104	180	464	93644	22	1	63	64	3	6	69	
10	12	24	639	27	27	16	102	180	1028	207590	22	1	162	162	3	6	168	
20	13	26	675	27	3	2	10	180	934	188737	22	1	148	148	3	6	153	
30	7	14	358	27	-13	-7	-47	180	518	104612	22	1	76	77	3	6	84	
40	5	10	269	27	-38	-23	-144	180	286	57817	22	1	41	42	3	6	48	
50	4	8	209	27	-68	-40	-255	180	65	13216	22	1	9	10	3	6	15	
70	6	12	321	27	-103	-61	-388	180	-6	0	22	1	0	0	3	6	6	
100	7	14	370	27	-172	-101	-645	180	-320	0	22	1	0	0	3	6	6	
130	9	18	463	27	-237	-140	-892	180	-573	0	22	1	0	0	3	6	6	
Ventilation of Uphill Tunnel during **Monsoon** (22°C Ambient Temperature & **Foggy** Weather) with Extinction Coefficient, K = **0.003 m^{-1}**																		
0	2	4	103	27	28	16	104	180	464	93644	22	1	63	64	3	6	69	
10	12	24	639	27	27	16	102	180	1028	207590	22	1	162	162	3	6	168	
20	13	26	675	27	3	2	10	180	934	188737	22	1	148	148	3	6	153	
30	7	14	358	27	-13	-7	-47	180	518	104612	22	1	76	77	3	6	84	
40	5	10	269	27	-38	-23	-144	180	286	57817	22	1	41	42	3	6	48	
50	4	8	209	27	-68	-40	-255	180	65	13216	22	1	9	10	3	6	15	
70	6	12	321	27	-103	-61	-388	180	-6	0	22	1	0	0	3	6	6	
100	7	14	370	27	-172	-101	-645	180	-320	0	22	1	0	0	3	6	6	
130	9	18	463	27	-237	-140	-892	180	-573	0	22	1	0	0	3	6	6	
Ventilation of Uphill Tunnel during **Monsoon** (22°C Ambient Temp. & **Densely Foggy** Weather) with Extinction Coefficient, K = **0.002 m^{-1}**																		
0	2	4	103	27	28	16	104	180	464	93644	22	1	63	64	3	6	69	
10	12	24	639	27	27	16	102	180	1028	207590	22	1	162	162	3	6	168	
20	13	26	675	27	3	2	10	180	934	188737	22	1	148	148	3	6	153	
30	7	14	358	27	-13	-7	-47	180	518	104612	22	1	76	77	3	6	84	
40	5	10	269	27	-38	-23	-144	180	286	57817	22	1	41	42	3	6	48	
50	4	8	209	27	-68	-40	-255	180	65	13216	22	1	9	10	3	6	15	
70	6	12	321	27	-103	-61	-388	180	-6	0	22	1	0	0	3	6	6	
100	7	14	370	27	-172	-101	-645	180	-320	0	22	1	0	0	3	6	6	
130	9	18	463	27	-237	-140	-892	180	-573	0	22	1	0	0	3	6	6	
Ventilation of Uphill Tunnel during **Monsoon** (22°C Ambient Temp. & **Densely Foggy** Weather) with Extinction Coefficient, K = **0.001 m^{-1}**																		
0	3	6	150	27	40	24	151	180	581	117457	22	1	81	81	5	10	90	
10	16	33	857	27	44	26	164	180	1347	272091	22	1	221	221	5	10	230	
20	22	43	1142	27	18	11	69	180	1512	305360	22	1	261	261	5	10	270	
30	15	31	809	27	-1	0	-3	180	1058	213752	22	1	172	173	5	10	185	
40	14	28	723	27	-14	-8	-51	180	899	181598	22	1	144	144	5	10	155	
50	12	25	653	27	-34	-20	-129	180	714	144189	22	1	113	113	5	10	125	
70	13	25	660	27	-77	-45	-288	180	495	99960	22	1	78	79	5	10	90	
100	13	27	707	27	-144	-85	-540	180	185	37445	22	1	30	30	5	10	40	
130	14	28	746	27	-214	-126	-805	180	-149	0	22	1	0	0	5	10	10	

TABLE-16: SUMMARY OF NORMAL MODE VENTILATION SYSTEM @ DIFFERENT CONDITION

Vehicle Speed (Km/hr)	Total Number of Jet Fans during **Summer** @ **40°C** Ambient Temperature & **Dry** Weather at Design value of **0.005 m⁻¹** Extinction Coefficient	Total Number of Jet Fans during **Monsoon** @ **22°C** Ambient Temperature & **Wet** Weather at Design value of **0.005 m⁻¹** Extinction Coefficient	Total Number of Jet Fans during **Monsoon** @ **22°C** Ambient Temperature & **Foggy** Weather at Design value of **0.003 m⁻¹** Extinction Coefficient	Total Number of Jet Fans during **Monsoon** @ **22°C** Ambient Temperature & **Densely Foggy** Weather at Design value of **0.002 m⁻¹** Extinction Coefficient	Total Number of Jet Fans during **Monsoon** @ **22°C** Ambient Temperature & **Densely Foggy** Weather at Design value of **0.001 m⁻¹** Extinction Coefficient	Total Number of Jet Fans during **Winter** @ **15°C** Ambient Temperature & **Dry** Weather at Design value of **0.005 m⁻¹** Extinction Coefficient	**REMARKS** *SELECTED NUMBER OF JET FANS FOR NORMAL MODE VENTILATION*	Maximum Distance Between Each Set of Jet Fans
DownHill (LHS) Tunnel								
0	72	70	70	70	90	70		
10	116	114	114	114	156	114	**116**	**147**
20	96	94	94	94	180	94		
30	42	40	40	40	117	40		With 2 Jet Fans in each set
40	4	4	4	6	78	4		
50	4	4	4	4	48	4		
60	4	4	4	4	21	4		
70	4	4	4	4	6	4		
80	4	4	4	4	6	4		
90	4	4	4	4	6	4		
100	4	4	4	4	6	4		
110	4	4	4	4	6	4		
120	4	4	4	4	6	4		
130	4	4	4	4	6	4		
UpHill (RHS) Tunnel								
0	72	69	69	69	90	69		
10	171	168	168	168	230	168	**171**	**149**
20	156	153	153	153	270	153		
30	84	84	84	84	185	81		With 3 Jet Fans in each set
40	48	48	48	48	155	48		
50	18	15	15	15	125	15		
60	12	12	12	12	100	12		
70	6	6	6	6	90	6		
80	6	6	6	6	80	6		
90	6	6	6	6	65	6		
100	6	6	6	6	40	6		
110	6	6	6	6	20	6		
120	6	6	6	6	10	6		
130	6	6	6	6	10	6		

Therefore, with the study of above Table-14, Table-15 & Table-16 an explanation given in the above articles 2.2.2, 2.2.3 & 2.2.4.3 on the total thrust and jet fan requirement, and the economics of the optimization on the design, it is not economical nor required to consider extinction coefficient of 0.001 m-1 for selecting Jet Fans for both the Downhill and Uphill Tunnels for the normal mode ventilation design.

3.2. Temperature Calculation at Downstream of Fire:

3.2.1 In Emergency mode, the temperature at fire site is very high and the formula for calculating air temperature at each point of the tunnel (downstream of fire) is given below:

$$T = T_o + (T_{max} - T_o) \times e^{-X/Xe} \quad \text{---------- Equation (1)}$$

$$X_e = \{(C_p \times \rho_o \times V_C) \div 4h\} \times D_h \quad \text{---------- Equation (2)}$$

$$T_{max} = \{Q_a \div (A_{tunnel} \times C_p \times \rho_o \times V_C)\} + T_o \quad \text{---------- Equation (3)}$$

where,

T = Air temperature at the distance X from the fire (^{0}K)

T_o = Outside air temperature (^{0}K)

T_{max} = Maximum air temperature (^{0}K)

X = Distance from the fire at the upstream (m)

X_e is the effective distance of the downstream of fire

C_p = Air heat capacity (J/^{0}K/kg)

ρ_o = Air density (kg/m^3)

V_C = Critical air velocity (m/s)

h = Thermal heat transfer coefficient (considered to be 10 W/m^2/^{0}K)

D_h = Hydraulic diameter of the tunnel (m)

Q_a = Heat Release Rate (HRR) from the fire to the air, about 70% is the convective part, which is being considered, and the remaining 30% is radiation part not considered in the calculation

Atunnel = Tunnel cross-section area (m^2)

3.2.2 Also, Critical Velocity, VC (m/s) is the minimum steady-state velocity of the ventilation air moving toward a fire that is necessary to prevent back layering3 – Calculations conducted by the simultaneous equations given in the the NFPA 502 - 20173. With these equations the average Temperature of the Fire site gases, Tf (^{0}K) can also be determined.

3.2.3 Because of heat transfer between hot smoke and tunnel wall, temperature decreases along the tunnel downstream of fire location. This will lead to variation of air density along the tunnel, that has to be taken into account in the jet fans sizing calculation. Also, derating of jet fan because of high temperature should be accounted.

3.2.4 In addition to the buoyancy in the traffic tunnel, the temperature difference has also been applied for the selection of main Jet fans. The buoyancy supports the jet fans in exhaust mode but is opposed to the fans used for fresh air supply.

3.2.5 With the procedure and equations of the above articles 2.3, 3.1, 3.2.1 & 3.2.2 along with the other guidelines the ventilation system required for the fire scenarios has been simulated in the following Table-17 and Table-18.

TABLE-17: 1D SIMULATIONS FOR DOWNHILL TUNNEL DURING FIRE MODE

DownHill Tunnel (LHS) 1D simulation @ every 150 m for Emergency (Fire) Mode Ventilation System for Smoke Management by Jet Fans: Calculations of Pressure Losses and Number of Jet Fans for Fire Scenarios @ Different Locations of the DownHill Tunnel																			
Distance of Fire from Entry Portal (m)	Average Temperature (°C) Downstream of Fire	Average Density of Air (kg/m³) Downstream of Fire	Average Air velocity (m/s) Required in Tunnel	Inlet Losses (Pa)	Exit Losses (Pa)	Tunnel Wall friction Losses (Pa) (Upstream of Fire)	Tunnel Wall friction Losses (Pa) (Downstream of Fire)	Adverse Wind Effect (Pa)	Vehicular Drag Losses (Pa) for Car	Vehicular Drag Losses (Pa) for LCV	Vehicular Drag Losses (Pa) for HGV	Fire Buoyancy Loss (Pa)	Loss due to Fire Blockage (Pa)	Meteorological Pressure (Pa)	Total Pressure Loss (Pa)	Total Thrust Required (N)	Average Temperature Tunnel (°C)	Average Density in Tunnel (kg/m3)	Number of Jet Fans Required @ Average Air Density	Number of Working Jet Fans (rounded off)
0	49.71	1.01	3.09	2.35	4.85	0.00	127.39	25.59	0.00	0.00	0.00	53.42	8.27	200.0	421.9	85218	49.71	1.01	63.2	64
150	49.88	1.01	3.09	2.35	4.85	2.14	125.25	25.59	0.57	0.34	2.15	53.39	8.27	200.0	424.9	85831	49.70	1.01	63.7	64
300	50.05	1.01	3.10	2.35	4.85	4.28	123.11	25.59	1.15	0.68	4.31	53.36	8.27	200.0	427.9	86444	49.70	1.01	64.1	65
450	50.23	1.01	3.10	2.35	4.85	6.41	120.98	25.59	1.72	1.01	6.46	53.32	8.27	200.0	431.0	87057	49.70	1.01	64.6	65
600	50.42	1.01	3.10	2.35	4.86	8.55	118.84	25.59	2.29	1.35	8.61	53.29	8.27	200.0	434.0	87669	49.70	1.01	65.1	66
750	50.62	1.01	3.10	2.35	4.86	10.69	116.70	25.59	2.86	1.69	10.76	53.25	8.27	200.0	437.0	88281	49.70	1.01	65.5	66
900	50.83	1.01	3.10	2.35	4.86	12.83	114.56	25.59	3.44	2.03	12.92	53.21	8.27	200.0	440.1	88893	49.70	1.01	66.0	66
1050	51.04	1.01	3.11	2.35	4.87	14.96	112.42	25.59	4.01	2.37	15.07	53.17	8.27	200.0	443.1	89504	49.70	1.01	66.4	67
1200	51.26	1.01	3.11	2.35	4.87	17.10	110.28	25.59	4.58	2.70	17.22	53.13	8.27	200.0	446.1	90115	49.70	1.01	66.9	67
1350	51.49	1.01	3.11	2.35	4.87	19.24	108.15	25.59	5.15	3.04	19.38	53.09	8.27	200.0	449.1	90725	49.70	1.01	67.3	68
1500	51.73	1.01	3.11	2.35	4.88	21.38	106.01	25.59	5.73	3.38	21.53	53.04	8.27	200.0	452.2	91335	49.70	1.01	67.8	68
1650	51.97	1.01	3.11	2.35	4.88	23.51	103.87	25.59	6.30	3.72	23.68	52.99	8.27	200.0	455.2	91945	49.69	1.01	68.2	69
1800	52.23	1.01	3.12	2.35	4.88	25.65	101.73	25.59	6.87	4.06	25.83	52.94	8.27	200.0	458.2	92553	49.69	1.01	68.7	69
1950	52.50	1.00	3.12	2.35	4.89	27.79	99.59	25.59	7.44	4.39	27.99	52.88	8.27	200.0	461.2	93161	49.69	1.01	69.1	70
2100	52.78	1.00	3.12	2.35	4.89	29.93	97.45	25.59	8.02	4.73	30.14	52.82	8.27	200.0	464.2	93769	49.69	1.01	69.6	70
2250	53.08	1.00	3.13	2.35	4.90	32.07	95.32	25.59	8.59	5.07	32.29	52.76	8.27	200.0	467.2	94375	49.68	1.01	70.0	71
2400	53.39	1.00	3.13	2.35	4.90	34.20	93.18	25.59	9.16	5.41	34.45	52.69	8.27	200.0	470.2	94981	49.68	1.01	70.5	71
2550	53.71	1.00	3.13	2.35	4.91	36.34	91.04	25.59	9.74	5.75	36.60	52.61	8.27	200.0	473.2	95586	49.68	1.01	70.9	71
2700	54.05	1.00	3.13	2.35	4.91	38.48	88.90	25.59	10.31	6.08	38.75	52.53	8.27	200.0	476.2	96189	49.67	1.01	71.4	72
2850	54.40	1.00	3.14	2.35	4.92	40.62	86.76	25.59	10.88	6.42	40.90	52.45	8.27	200.0	479.2	96791	49.67	1.01	71.8	72
3000	54.77	1.00	3.14	2.35	4.92	42.75	84.62	25.59	11.45	6.76	43.06	52.36	8.27	200.0	482.1	97392	49.66	1.01	72.3	73
3150	55.16	1.00	3.15	2.35	4.93	44.89	82.48	25.59	12.03	7.10	45.21	52.26	8.27	200.0	485.1	97991	49.65	1.01	72.7	73
3300	55.57	1.00	3.15	2.35	4.93	47.03	80.34	25.59	12.60	7.44	47.36	52.15	8.27	200.0	488.1	98589	49.65	1.01	73.1	74
3450	56.01	0.99	3.15	2.35	4.94	49.17	78.19	25.59	13.17	7.77	49.52	52.03	8.27	200.0	491.0	99184	49.64	1.01	73.6	74
3600	56.46	0.99	3.16	2.35	4.95	51.30	76.05	25.59	13.74	8.11	51.67	51.90	8.27	200.0	493.9	99777	49.63	1.01	74.0	75
3750	56.94	0.99	3.16	2.35	4.96	53.44	73.91	25.59	14.32	8.45	53.82	51.76	8.27	200.0	496.9	100368	49.61	1.01	74.5	75
3900	57.45	0.99	3.17	2.35	4.96	55.58	71.77	25.59	14.89	8.79	55.97	51.60	8.27	200.0	499.8	100955	49.60	1.01	74.9	75
4050	57.98	0.99	3.17	2.35	4.97	57.72	69.62	25.59	15.46	9.13	58.13	51.43	8.27	200.0	502.7	101540	49.58	1.01	75.3	76
4200	58.55	0.99	3.18	2.35	4.98	59.86	67.48	25.59	16.04	9.47	60.28	51.24	8.27	200.0	505.5	102121	49.56	1.01	75.7	76
4350	59.15	0.98	3.18	2.35	4.99	61.99	65.33	25.59	16.61	9.80	62.43	51.03	8.27	200.0	508.4	102697	49.54	1.01	76.2	77
4500	59.79	0.98	3.19	2.35	5.00	64.13	63.18	25.59	17.18	10.14	64.59	50.80	8.27	200.0	511.2	103269	49.52	1.01	76.6	77
4650	60.46	0.98	3.20	2.35	5.01	66.27	61.03	25.59	17.75	10.48	66.74	50.54	8.27	200.0	514.0	103836	49.49	1.01	77.0	77
4800	61.18	0.98	3.20	2.35	5.02	68.41	58.88	25.59	18.33	10.82	68.89	50.25	8.27	200.0	516.8	104396	49.45	1.01	77.4	78
4950	61.95	0.98	3.21	2.35	5.03	70.54	56.73	25.59	18.90	11.16	71.04	49.94	8.27	200.0	519.6	104950	49.42	1.01	77.8	78
5100	62.76	0.97	3.22	2.35	5.04	72.68	54.58	25.59	19.47	11.49	73.20	49.58	8.27	200.0	522.3	105496	49.37	1.01	78.2	79
5250	63.63	0.97	3.23	2.35	5.06	74.82	52.42	25.59	20.04	11.83	75.35	49.18	8.27	200.0	524.9	106033	49.32	1.01	78.6	79
5400	64.56	0.97	3.24	2.35	5.07	76.96	50.26	25.59	20.62	12.17	77.50	48.74	8.27	200.0	527.5	106561	49.26	1.01	79.0	79
5550	65.55	0.97	3.24	2.35	5.08	79.10	48.09	25.59	21.19	12.51	79.66	48.24	8.27	200.0	530.1	107077	49.19	1.01	79.3	80
5700	66.61	0.96	3.25	2.35	5.10	81.23	45.92	25.59	21.76	12.85	81.81	47.68	8.27	200.0	532.6	107580	49.12	1.02	79.7	80
5850	67.75	0.96	3.27	2.35	5.12	83.37	43.75	25.59	22.33	13.18	83.96	47.06	8.27	200.0	535.0	108068	49.03	1.02	80.0	81
6000	68.98	0.96	3.28	2.35	5.14	85.51	41.57	25.59	22.91	13.52	86.11	46.35	8.27	200.0	537.3	108540	48.92	1.02	80.3	81
6150	70.29	0.95	3.29	2.35	5.16	87.65	39.39	25.59	23.48	13.86	88.27	45.56	8.27	200.0	539.6	108993	48.80	1.02	80.6	81
6300	71.71	0.95	3.30	2.35	5.18	89.78	37.20	25.59	24.05	14.20	90.42	44.66	8.27	200.0	541.7	109425	48.67	1.02	80.9	81
6450	73.23	0.94	3.32	2.35	5.20	91.92	35.00	25.59	24.63	14.54	92.57	43.66	8.27	200.0	543.7	109832	48.51	1.02	81.2	82
6600	74.88	0.94	3.33	2.35	5.22	94.06	32.79	25.59	25.20	14.87	94.73	42.52	8.27	200.0	545.6	110212	48.33	1.02	81.4	82
6750	76.66	0.94	3.35	2.35	5.25	96.20	30.57	25.59	25.77	15.21	96.88	41.24	8.27	200.0	547.3	110561	48.12	1.02	81.6	82
6900	78.58	0.93	3.37	2.35	5.28	98.33	28.33	25.59	26.34	15.55	99.03	39.79	8.27	200.0	548.9	110874	47.88	1.02	81.8	82
7050	80.67	0.92	3.39	2.35	5.31	100.47	26.09	25.59	26.92	15.89	101.18	38.16	8.27	200.0	550.2	111148	47.60	1.02	81.9	82
7200	82.93	0.92	3.41	2.35	5.35	102.61	23.82	25.59	27.49	16.23	103.34	36.32	8.27	200.0	551.4	111376	47.28	1.02	82.0	83
7350	85.38	0.91	3.43	2.35	5.38	104.75	21.54	25.59	28.06	16.56	105.49	34.25	8.27	200.0	552.2	111554	46.91	1.02	82.1	83
7500	88.05	0.91	3.46	2.35	5.42	106.89	19.23	25.59	28.63	16.90	107.64	31.90	8.27	200.0	552.8	111673	46.48	1.02	82.0	83
7650	90.96	0.90	3.49	2.35	5.47	109.02	16.90	25.59	29.21	17.24	109.80	29.26	8.27	200.0	553.1	111728	46.00	1.03	82.0	82
7800	94.13	0.89	3.52	2.35	5.51	111.16	14.54	25.59	29.78	17.58	111.95	26.28	8.27	200.0	553.0	111710	45.43	1.03	81.8	82
7950	97.58	0.88	3.55	2.35	5.57	113.30	12.15	25.59	30.35	17.92	114.10	22.92	8.27	200.0	552.5	111609	44.78	1.03	81.6	82
8100	101.36	0.87	3.59	2.35	5.62	115.44	9.72	25.59	30.92	18.25	116.25	19.14	8.27	200.0	551.6	111416	44.03	1.03	81.2	82
8250	105.50	0.86	3.63	2.35	5.68	117.57	7.24	25.59	31.50	18.59	118.41	14.89	8.27	200.0	550.1	111120	43.17	1.03	80.8	81
8400	110.03	0.85	3.67	2.35	5.75	119.71	4.71	25.59	32.07	18.93	120.56	10.11	8.27	200.0	548.1	110709	42.18	1.04	80.2	81
8550	114.99	0.84	3.72	2.35	5.83	121.85	2.12	25.59	32.64	19.27	122.71	4.75	8.27	200.0	545.4	110168	41.04	1.04	79.6	80
8670	119.31	0.83	3.76	2.35	5.89	123.56	0.00	25.59	33.10	19.54	124.44	0.00	8.27	200.0	542.7	109634	40.00	1.04	78.9	79
															Max:	111728			82.1	83

TABLE-18: 1D SIMULATIONS FOR UPHILL TUNNEL DURING FIRE MODE

UpHill Tunnel (RHS) 1D simulation @ every 150 m for Emergency (Fire) Mode Ventilation System for Smoke Management by Jet Fans: Calculations of Pressure Losses and Number of Jet Fans for Fire Scenarios @ Different Locations of the UpHill Tunnel																				
Distance of Fire from Entry Portal (m)	Average Temperature (°C) Downstream of Fire	Average Density of Air (kg/m³) Downstream of Fire	Average Air velocity (m/s) Required in Tunnel	Inlet Losses (Pa)	Exit Losses (Pa)	Tunnel Wall friction Losses (Pa) (Upstream of Fire)	Tunnel Wall friction Losses (Pa) (Downstream of Fire)	Adverse Wind Effect (Pa)	Vehicular Drag Losses (Pa) for Car	Vehicular Drag Losses (Pa) for LCV	Vehicular Drag Losses (Pa) for HGV	Fire Buoyancy Loss (Pa)	Loss due to Fire Blockage (Pa)	Meteorological Pressure (Pa)	Total Pressure Loss (Pa)	Total Thrust Required (N)	Average Temperature Tunnel (°C)	Average Density in Tunnel (kg/m3)	Number of Jet Fans Required @ Average Air Density	Number of Working Jet Fans (rounded off)
0	49.71	1.01	3.09	2.35	4.85	0.00	127.37	25.59	0.00	0.00	0.00	-66.77	8.27	180.0	281.7	56896	49.71	1.01	42.2	43
150	49.88	1.01	3.09	2.35	4.85	2.14	125.23	25.59	0.57	0.34	2.15	-66.73	8.27	180.0	284.8	57523	49.70	1.01	42.7	43
300	50.05	1.01	3.10	2.35	4.85	4.27	123.10	25.59	1.15	0.68	4.31	-66.70	8.27	180.0	287.9	58150	49.70	1.01	43.1	44
450	50.23	1.01	3.10	2.35	4.85	6.41	120.96	25.59	1.72	1.01	6.46	-66.65	8.27	180.0	291.0	58778	49.70	1.01	43.6	44
600	50.42	1.01	3.10	2.35	4.86	8.55	118.82	25.59	2.29	1.35	8.61	-66.61	8.27	180.0	294.1	59406	49.70	1.01	44.1	45
750	50.62	1.01	3.10	2.35	4.86	10.69	116.68	25.59	2.86	1.69	10.76	-66.56	8.27	180.0	297.2	60034	49.70	1.01	44.5	45
900	50.83	1.01	3.10	2.35	4.86	12.82	114.55	25.59	3.44	2.03	12.92	-66.52	8.27	180.0	300.3	60663	49.70	1.01	45.0	46
1050	51.04	1.01	3.11	2.35	4.87	14.96	112.41	25.59	4.01	2.37	15.07	-66.47	8.27	180.0	303.4	61293	49.70	1.01	45.5	46
1200	51.26	1.01	3.11	2.35	4.87	17.10	110.27	25.59	4.58	2.70	17.22	-66.41	8.27	180.0	306.5	61923	49.70	1.01	45.9	46
1350	51.49	1.01	3.11	2.35	4.87	19.24	108.13	25.59	5.15	3.04	19.38	-66.36	8.27	180.0	309.7	62554	49.70	1.01	46.4	47
1500	51.73	1.01	3.11	2.35	4.88	21.37	105.99	25.59	5.73	3.38	21.53	-66.30	8.27	180.0	312.8	63185	49.70	1.01	46.9	47
1650	51.97	1.01	3.11	2.35	4.88	23.51	103.86	25.59	6.30	3.72	23.68	-66.24	8.27	180.0	315.9	63817	49.69	1.01	47.4	48
1800	52.23	1.01	3.12	2.35	4.88	25.65	101.72	25.59	6.87	4.06	25.83	-66.17	8.27	180.0	319.1	64450	49.69	1.01	47.8	48
1950	52.50	1.00	3.12	2.35	4.89	27.79	99.58	25.59	7.44	4.39	27.99	-66.10	8.27	180.0	322.2	65084	49.69	1.01	48.3	49
2100	52.78	1.00	3.12	2.35	4.89	29.92	97.44	25.59	8.02	4.73	30.14	-66.03	8.27	180.0	325.3	65718	49.69	1.01	48.8	49
2250	53.08	1.00	3.13	2.35	4.90	32.06	95.30	25.59	8.59	5.07	32.29	-65.95	8.27	180.0	328.5	66354	49.68	1.01	49.2	50
2400	53.39	1.00	3.13	2.35	4.90	34.20	93.16	25.59	9.16	5.41	34.45	-65.86	8.27	180.0	331.6	66991	49.68	1.01	49.7	50
2550	53.71	1.00	3.13	2.35	4.91	36.34	91.02	25.59	9.74	5.75	36.60	-65.77	8.27	180.0	334.8	67629	49.68	1.01	50.2	51
2700	54.05	1.00	3.13	2.35	4.91	38.47	88.89	25.59	10.31	6.08	38.75	-65.67	8.27	180.0	338.0	68269	49.67	1.01	50.7	51
2850	54.40	1.00	3.14	2.35	4.92	40.61	86.75	25.59	10.88	6.42	40.90	-65.56	8.27	180.0	341.1	68910	49.67	1.01	51.1	52
3000	54.77	1.00	3.14	2.35	4.92	42.75	84.61	25.59	11.45	6.76	43.06	-65.45	8.27	180.0	344.3	69553	49.66	1.01	51.6	52
3150	55.16	1.00	3.15	2.35	4.93	44.89	82.47	25.59	12.03	7.10	45.21	-65.32	8.27	180.0	347.5	70197	49.65	1.01	52.1	53
3300	55.57	1.00	3.15	2.35	4.93	47.02	80.32	25.59	12.60	7.44	47.36	-65.18	8.27	180.0	350.7	70844	49.65	1.01	52.6	53
3450	56.01	0.99	3.15	2.35	4.94	49.16	78.18	25.59	13.17	7.77	49.52	-65.03	8.27	180.0	353.9	71494	49.64	1.01	53.0	54
3600	56.46	0.99	3.16	2.35	4.95	51.30	76.04	25.59	13.74	8.11	51.67	-64.87	8.27	180.0	357.2	72146	49.63	1.01	53.5	54
3750	56.94	0.99	3.16	2.35	4.96	53.44	73.90	25.59	14.32	8.45	53.82	-64.69	8.27	180.0	360.4	72801	49.61	1.01	54.0	55
3900	57.45	0.99	3.17	2.35	4.96	55.57	71.76	25.59	14.89	8.79	55.97	-64.50	8.27	180.0	363.7	73460	49.60	1.01	54.5	55
4050	57.98	0.99	3.17	2.35	4.97	57.71	69.61	25.59	15.46	9.13	58.13	-64.28	8.27	180.0	366.9	74122	49.58	1.01	55.0	55
4200	58.55	0.99	3.18	2.35	4.98	59.85	67.47	25.59	16.04	9.47	60.28	-64.05	8.27	180.0	370.2	74789	49.56	1.01	55.5	56
4350	59.15	0.98	3.18	2.35	4.99	61.98	65.32	25.59	16.61	9.80	62.43	-63.79	8.27	180.0	373.6	75461	49.54	1.01	56.0	56
4500	59.79	0.98	3.19	2.35	5.00	64.12	63.17	25.59	17.18	10.14	64.59	-63.50	8.27	180.0	376.9	76138	49.52	1.01	56.5	57
4650	60.46	0.98	3.20	2.35	5.01	66.26	61.03	25.59	17.75	10.48	66.74	-63.17	8.27	180.0	380.3	76822	49.49	1.01	57.0	57
4800	61.18	0.98	3.20	2.35	5.02	68.40	58.88	25.59	18.33	10.82	68.89	-62.80	8.27	180.0	383.7	77512	49.45	1.01	57.5	58
4950	61.95	0.98	3.21	2.35	5.03	70.53	56.72	25.59	18.90	11.16	71.04	-62.42	8.27	180.0	387.2	78211	49.42	1.01	58.0	58
5100	62.76	0.97	3.22	2.35	5.04	72.67	54.57	25.59	19.47	11.49	73.20	-61.98	8.27	180.0	390.7	78918	49.37	1.01	58.5	59
5250	63.63	0.97	3.23	2.35	5.06	74.81	52.41	25.59	20.04	11.83	75.35	-61.48	8.27	180.0	394.2	79636	49.32	1.01	59.0	60
5400	64.56	0.97	3.24	2.35	5.07	76.95	50.25	25.59	20.62	12.17	77.50	-60.92	8.27	180.0	397.8	80365	49.26	1.01	59.6	60
5550	65.55	0.97	3.24	2.35	5.08	79.08	48.09	25.59	21.19	12.51	79.66	-60.30	8.27	180.0	401.5	81107	49.19	1.01	60.1	61
5700	66.61	0.96	3.25	2.35	5.10	81.22	45.92	25.59	21.76	12.85	81.81	-59.60	8.27	180.0	405.3	81864	49.12	1.02	60.6	61
5850	67.75	0.96	3.27	2.35	5.12	83.36	43.74	25.59	22.33	13.18	83.96	-58.80	8.27	180.0	409.1	82638	49.03	1.02	61.2	62
6000	68.98	0.96	3.28	2.35	5.14	85.50	41.57	25.59	22.91	13.52	86.11	-57.94	8.27	180.0	413.0	83430	48.92	1.02	61.8	62
6150	70.29	0.95	3.29	2.35	5.16	87.63	39.38	25.59	23.48	13.86	88.27	-56.95	8.27	180.0	417.0	84244	48.80	1.02	62.3	63
6300	71.71	0.95	3.30	2.35	5.18	89.77	37.19	25.59	24.05	14.20	90.42	-55.83	8.27	180.0	421.2	85082	48.67	1.02	62.9	63
6450	73.23	0.94	3.32	2.35	5.20	91.91	34.99	25.59	24.63	14.54	92.57	-54.57	8.27	180.0	425.5	85947	48.51	1.02	63.5	64
6600	74.88	0.94	3.33	2.35	5.22	94.05	32.78	25.59	25.20	14.87	94.73	-53.15	8.27	180.0	429.9	86843	48.33	1.02	64.2	65
6750	76.66	0.94	3.35	2.35	5.25	96.18	30.56	25.59	25.77	15.21	96.88	-51.55	8.27	180.0	434.5	87774	48.12	1.02	64.8	65
6900	78.58	0.93	3.37	2.35	5.28	98.32	28.33	25.59	26.34	15.55	99.03	-49.74	8.27	180.0	439.3	88744	47.88	1.02	65.5	66
7050	80.67	0.92	3.39	2.35	5.31	100.46	26.08	25.59	26.92	15.89	101.18	-47.70	8.27	180.0	444.4	89759	47.60	1.02	66.2	67
7200	82.93	0.92	3.41	2.35	5.35	102.60	23.82	25.59	27.49	16.23	103.34	-45.40	8.27	180.0	449.6	90824	47.28	1.02	66.9	67
7350	85.38	0.91	3.43	2.35	5.38	104.73	21.54	25.59	28.06	16.56	105.49	-42.81	8.27	180.0	455.2	91945	46.91	1.02	67.6	68
7500	88.05	0.91	3.46	2.35	5.42	106.87	19.23	25.59	28.63	16.90	107.64	-39.88	8.27	180.0	461.0	93130	46.48	1.02	68.4	69
7650	90.96	0.90	3.49	2.35	5.47	109.01	16.90	25.59	29.21	17.24	109.80	-36.57	8.27	180.0	467.3	94386	46.00	1.03	69.2	70
7800	94.13	0.89	3.52	2.35	5.51	111.15	14.54	25.59	29.78	17.58	111.95	-32.85	8.27	180.0	473.9	95722	45.43	1.03	70.1	71
7950	97.58	0.88	3.55	2.35	5.57	113.28	12.15	25.59	30.35	17.92	114.10	-28.65	8.27	180.0	480.9	97147	44.78	1.03	71.0	71
8100	101.36	0.87	3.59	2.35	5.62	115.42	9.71	25.59	30.92	18.25	116.25	-23.93	8.27	180.0	488.5	98673	44.03	1.03	71.9	72
8250	105.50	0.86	3.63	2.35	5.68	117.56	7.24	25.59	31.50	18.59	118.41	-18.61	8.27	180.0	496.6	100309	43.17	1.03	72.9	73
8400	110.03	0.85	3.67	2.35	5.75	119.70	4.71	25.59	32.07	18.93	120.56	-12.64	8.27	180.0	505.3	102069	42.18	1.04	74.0	74
8550	114.99	0.84	3.72	2.35	5.83	121.83	2.12	25.59	32.64	19.27	122.71	-5.94	8.27	180.0	514.7	103965	41.04	1.04	75.1	76
8669	119.27	0.83	3.76	2.35	5.89	123.53	0.02	25.59	33.10	19.54	124.42	-0.05	8.27	180.0	522.7	105577	40.01	1.04	76.0	76
															Max:	105577			76.0	76

3.2.6 For a Fire size of 50 MW HRR, by considering 70% of the heat released from the fire as convective heat transfer from the fire to the air, the above 1-D Simulation at Table-17 & Table-18 indicates that the number of Jet Fans batteries of a longitudinal ventilation system requires, for an effective Smoke Management at the probable worst locations of the fire scenarios, shall be approximately 83 nos. in the Downhill Tunnel and 76 nos. in the Uphill Tunnel. However, with reference to Table-16 above, the normal mode ventilation system has more than sufficient number of batteries of Jet Fans in both the Tunnels – 58 sets with 2 Jet Fans in each set (= 116 nos.) at a spacing of approximately 147 m in the Downhill Tunnel and 57 sets with 3 Jet Fans in each set (= 171 nos.) at a spacing of approximately 149 m in the Uphill Tunnel. The spacing of the Jet Fans sets also satisfy the minimum recommended 10 times that hydraulic diameter, Dh of the tunnel (i.e., Dh = 10 x 13.5 = 135 m).

4. CONCLUSIONS

The above detailed study with detailed calculations of the longitudinal mechanical ventilation system designed, with batteries of jet fans mounted at the crown of the tunnels, for normal mode operation reflects that even during extreme foggy weather condition the basic acceptable limit of visibility will be achievable without any modification to the system for the selected normal mode ventilation basic design criterion.

Even though the quantum of fresh air requirement increases with decreasing differences of extinction coefficient between admissible and ambient for pollution dilution due to opacity, the fresh air requirement for dilution of NO2 still governs here in the design because of a very high standard of international design criterion.

Furthermore, the longitudinal mechanical ventilation system for normal mode shall also cater to an effective smoke management at any probable locations of the fire scenarios. An additional feature, which has been evaluated, is that this very system will be capable of smoke management up to fire size of 100 MW HRR, with the selected jet fans specifications and quantities.

It can be concluded that the adopted design is optimized with a very reliable functional requirement achievability for all weather conditions and safety standards.

5. REFERENCES

The following reference documents have been referred for writing this paper:

1. PIARC 2019R02EN – Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation
2. Article: "Fog Droplet Size Distribution and the Interaction between Fog Droplets and Fine Particles during Dense Fog in Tianjin, China" – by Qing Liu, Bingui Wu, Zhaoyu Wang and Tianyi Hao
3. NFPA 502 – 2017: Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways
4. NFPA 92: Standards for Smoke Control Systems
5. PIARC 05.05.B – 1999: Fire and Smoke Control in Road Tunnels
6. PIARC 2017R01EN- Design Fire Characteristics for Road Tunnels
7. PIARC 05.02.B – 1995: Vehicles Emissions Air Demand Environment Longitudinal Ventilation
8. PIARC 05.16.B – 2006: Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels

9. CETU (centre d'Etudes des Tunnels): dossier pilote des tunnels équipement; section 4.1 – Ventilation; novembre 2003 (French Tunnel Ventilation Design Code)
10. ASHRAE CH15: Enclosed Vehicular Facilities
11. IRC:SP:99 – 2013: Manual of Specifications and Standards for Expressways
12. IRC:SP:91 – 2010: Guidelines for Road Tunnels
13. IRC:SP:84 – 2014: Manual of Specifications & Standards for Four Laning of Highways Through Public Private Partnership
14. Handbook of Hydraulic Resistance by I.E. Idel'chik
15. Contract Documents for Technical Specifications and Input Data

DESIGN AND APPLICATIONS OF ROAD TUNNELS VENTILATION ALGORITHMS

Alessandro Focaracci
Prometeoengineering.it S.r.l.

Ventilation algorithms define the activation procedure of the jet fans in road tunnels.

The implementation of the algorithms allows an effective management of the ventilation system, in order to permit people to escape during the emergency and guarantee visibility and air healthiness during normal operations.

For road tunnels equipped with longitudinal ventilation the strategy to adopt depend on traffic conditions.

With regard to blocked/congested and bidirectional traffic, ventilation management is more complex as there are stationary vehicles and escaping people on either side of the fire.

This paper will detail the design and applications of ventilation algorithms for one-way tunnel with predominantly flowing traffic scenario.

DISEÑO Y APLICACIONES DE ALGORITMOS DE VENTILACIÓN DE TÚNELES DE CARRETERA

Los algoritmos de ventilación definen el procedimiento de activación de los ventiladores de chorro en los túneles de carretera.

La aplicación de los algoritmos permite una gestión eficaz del sistema de ventilación, para permitir la salida de las personas durante la emergencia y garantizar la visibilidad y la salubridad del aire durante el funcionamiento normal.

En el caso de los túneles de carretera equipados con ventilación longitudinal, la estrategia a adoptar depende de las condiciones de tráfico.

En cuanto al tráfico bloqueado/congestionado y bidireccional, la gestión de la ventilación es más compleja, ya que hay vehículos parados y personas que escapan a ambos lados del incendio.

Este trabajo detallará el diseño y las aplicaciones de los algoritmos de ventilación para un túnel de un solo sentido con un escenario de tráfico predominantemente fluido.

CONCEPTION ET APPLICATIONS DES ALGORITHMES DE VENTILATION DES TUNNELS ROUTIE

Les algorithmes de ventilation définissent la procédure d'activation des ventilateurs à jet dans les tunnels routiers.

La mise en œuvre des algorithmes permet une gestion efficace du système de ventilation, afin de permettre aux personnes de s'échapper pendant l'urgence et de garantir la visibilité et la salubrité de l'air pendant les opérations normales.

Pour les tunnels routiers équipés d'une ventilation longitudinale, la stratégie à adopter dépend des conditions de circulation.

En ce qui concerne la circulation bloquée/congestionnée et bidirectionnelle, la gestion de la ventilation est plus complexe car il y a des véhicules stationnaires et des personnes en fuite de part et d'autre du feu.

Cet article détaillera la conception et les applications des algorithmes de ventilation pour un tunnel à sens unique avec un scénario de trafic prédominant.

INTRODUCTION - GENERAL CONCEPTS

The optimal operation of the ventilation system is guaranteed by the implementation of appropriate management algorithms, capable of controlling both normal operation (sanitary ventilation) and fire operation (emergency ventilation).

Sanitary ventilation must ensure tunnel occupants comfort during normal operating conditions. In detail, the visibility and air healthiness must be ensured by diluting the exhaust gases. In order to optimize the management of tunnel ventilation, it is also possible to control the transition phase between sanitary and emergency ventilation.

The main purpose of emergency ventilation is to manage fire smokes, allowing users evacuation. In the case of road tunnels equipped with longitudinal ventilation, the strategy to be adopted depends on the traffic conditions and the geometric characteristics of the tunnel.

1. TUNNEL CHARACTERIZATION

The sizing of the mechanical system and the management of the ventilation algorithms must take into account the type of tunnel in question.

The most interesting parameters are:

- Tunnel length;
- Tunnel cross-section;
- Tunnel height;
- Tunnel longitudinal slope.
- Traffic characterization.

Long tunnels with large cross-sections have a high inertia and therefore it will be more difficult to accelerate the air.

Tunnels with large cross-section and height promote smoke stratification, so it's possible to delay the activation of the first jet fan.

The longitudinal slope is a very important parameter as it directly affects the chimney effect, that is the natural tendency of hot smokes to go up the tunnel, due to their lower density.

It's essential to characterize the traffic in the tunnel, in terms of: vehicular flow, percentage of heavy vehicles, number of lanes and speed limit. Indeed, the vehicular flow causes an acceleration of the air in the tunnel, promoting a minimum air speed in the traffic direction (piston effect). This phenomenon could be used as an aid to the jet fan thrust, even if it could be also hind the smoke stratification and promote the growth of the fire in its initial stages.

2. VENTILATION ALGORITHMS AND TRAFFIC CONDITIONS

There are different procedures for managing the ventilation system in road tunnels based on traffic conditions.

Congested – Blocked/bidirectional traffic:

In these traffic conditions the ventilation management is more complex as there are stationary vehicles and escaping people on either side of the fire. In order to obtain the stratification and the dilution of the combustion smokes, a speed control of the feedforward-feedback type is necessary so as to have an air speed of about 1-1,5 m/s. In absence of a correct measurement of the air velocity, no jet fan should be activated.

One-way flowing traffic:

For one-way road tunnels with predominantly flowing traffic, the objective is to push the smokes in the traffic direction with a speed greater than the critical velocity, in order to avoid smoke rising (back layering) and allow users to escape in the opposite direction.

An elementary strategy could be to immediately activate all available jet fans. In this way it is certainly possible to avoid smoke rising, however there is a risk of having a too high air speed that can fuel the fire, especially in its initial phase of development.

Another possible strategy is to try to favor smoke stratification during people evacuation and then activate the ventilation to push smokes in one direction and keep tunnel free from smoke to support the intervention of rescue teams. As said for congested and blocked traffic conditions, in order to obtain the stratification, a speed control of the feedforward-feedback type is necessary so as to have an air speed of about 1,00-1,5 m/s.

Tunnel air speed control is affected by the following parameters:

- Inertia of the tunnel air mass;
- Initial air speed at the time of the emergency;
- Concentrated and distributed tunnel head losses;
- Boundary conditions: wind speed and barometric conditions at the tunnel portals;
- Characteristics of the fire: position and thermal power generated.

Air speed control purposes are:

- Promote smoke stratification, at least in the initial stages of the fire;
- Reduce propagation speed of the smoke;
- Avoid fire spreading due to excessive air intake.

A ventilation strategy of this type can function properly if applied to tunnels with the following characteristics:

- Large cross-section (> 70 m2), in order to favor smokes stratification;
- Close range emergency exits, in order to have a faster evacuation;
- Length greater than about 2000 m, in order to have a lower jet fans density per meter and therefore a lower probability of activating a jet fan affected by smoke.

However, it must be considered that the Italian territory, for example, has a large number of tunnels with a length between 1000 – 2000 m, a cross-section of about 55-60 m2 and the inter distance between emergency exits is around 500 m.

For this type of tunnels, the ventilation strategy described can be difficult to adopted and, therefore, specific algorithms must be defined in order to pursue the following goals:

- Exceeding the critical velocity in the shortest possible time from the start of the fire,
- Reaching a speed that is not excessive to avoid increasing the fire (target air velocity),
- Reliable jet fans activation (even in case of the uncertain measurement of air velocity).

The target air velocity was defined using a mathematical function, able to guarantee the aforementioned performances required by the ventilation system. The target air velocity curve is used as a reference for choosing the optimal activation sequence.

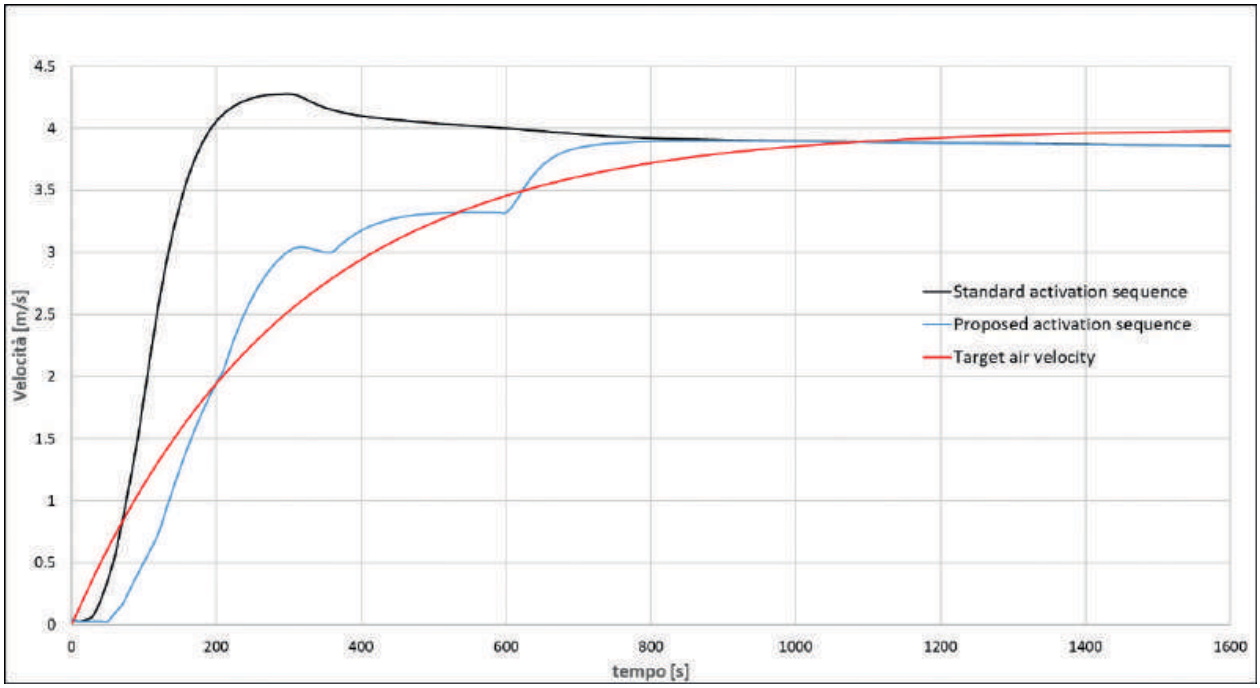


Figure 1 – Comparison between target air velocity and proposed activation sequence

3. DESIGN AND APPLICATION OF PROPOSED VENTILATION ALGORITHM

The design of the proposed ventilation algorithm, applied to two different road tunnels, is presented.

Tunnel characteristics	Tunnel 1	Tunnel 2
Lenght [m]	1850	1060
Cross-section [m2]	53	55
Longitudinal slope [%]	+2,3 %	-1,1 %
Number of jet fan	12	8
Distance between emergency exits [m]	500	500
Traffic conditions	One-way fluid traffic	One-way fluid traffic

The activation logic of the jet fans, for the management of emergency ventilation, is based on the following mathematical sequence:

$$\begin{cases} f(n) = \varphi T_0 & n \in [0;2) \\ f(n) = T_{n-1} + T_{n-2} & n \geq 2 \end{cases}$$

In this way it's possible to have more close activations in the initial phase of the fire that become gradually mor thinned out, in order to overcome the critical velocity to avoid smokes rising, without causing too high air speed with the risk of fueling the fire.

On the basis of the characteristics of each tunnel, different activation sequence parameters are set. To avoid too late activations, the activation sequence is changed after a predetermined time from the start of the fire, after which a jet fan is activated every 15 seconds.

The correct implementation of the proposed algorithm is defined by 1D fluid dynamics simulations. The observation time starts from the beginning of the fire and time delay between critical velocity and first jet fan activation is due to emergency reaction time.

In Figure 2, 3 and 4, the activation sequences and the air speed values are shown with the air target velocity and critical velocity curves (30 MW fire).

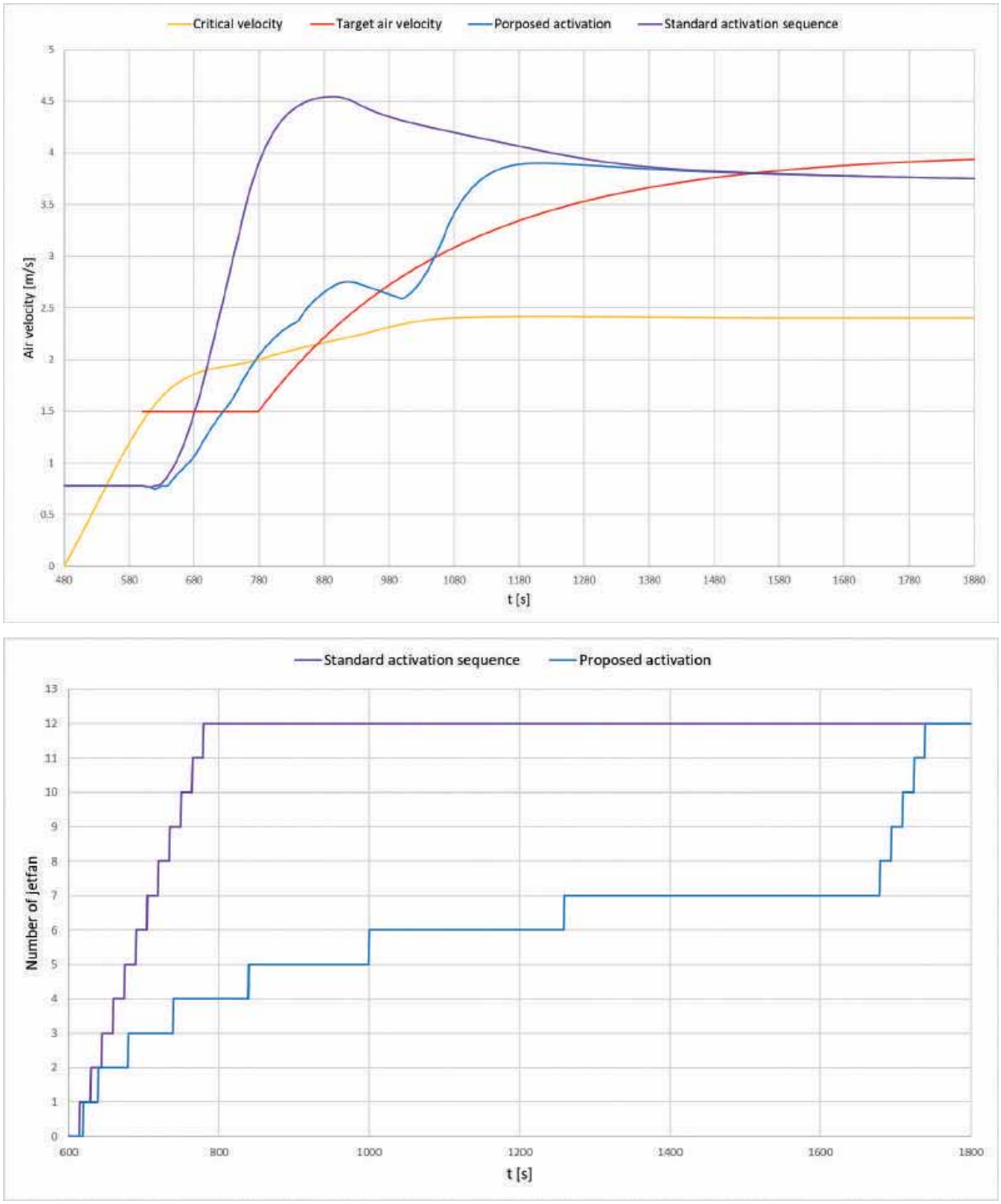


Figure 2 – Tunnel 1: Comparison between standard activation sequence and proposed activation sequence

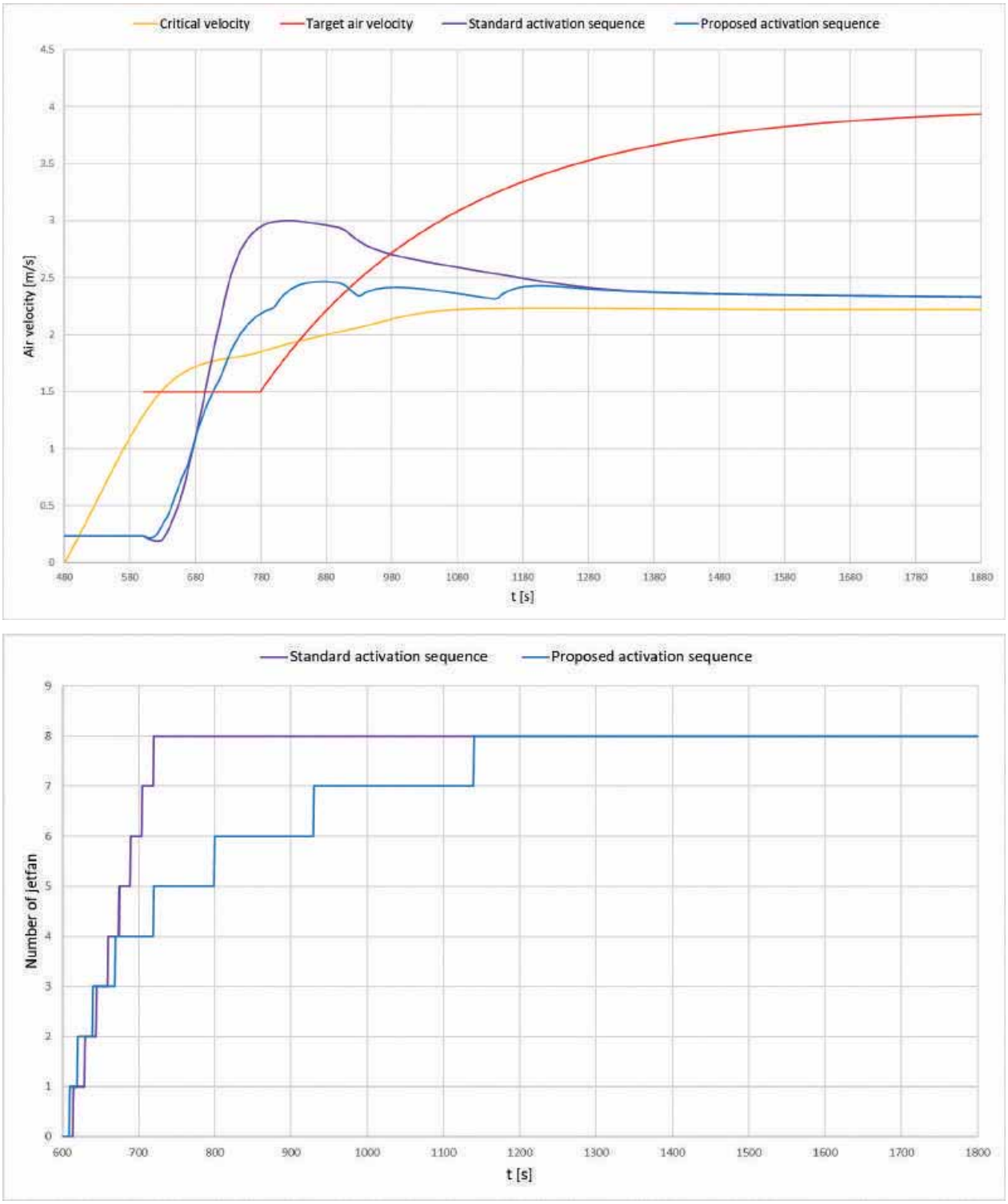


Figure 3 – Tunnel 2: Comparison between standard activation sequence and proposed activation sequence

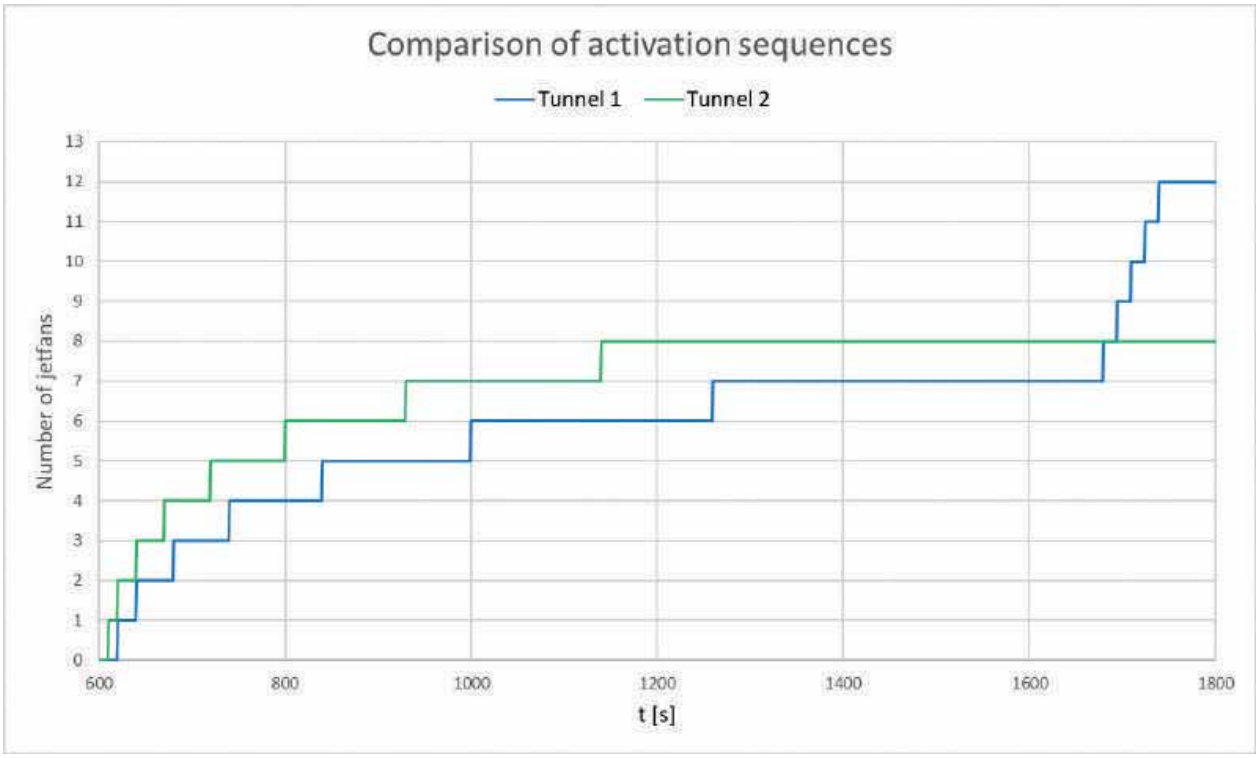


Figure 4 – Comparison activation sequences of tunnel 1 and tunnel 2

Tunnel 1 is the longest of those examined so it requires a sequence with fairly close activation, in order to be able to overcome the inertia of the air mass present in the tunnel. Furthermore, the positive longitudinal slope of the tunnel hinders smoke rising. The solution adopted is a compromise between these two needs, in order to have a rapid growth of the air speed during the initial stages of the fire, without obtaining too high-speed value compared to the critical velocity.

Tunnel 2 requires the fastest activation sequence, although it's the shortest tunnel, due to the negative longitudinal slope, which favors the smoke counterflow due to chimney effect.

It can be seen, especially for the tunnel 1, how the standard activation sequence would lead to a too high air speed in the initial phase of the fire.

In case of initial negative air speed (opposite to traffic direction) given by traffic conditions and barometric conditions at the tunnel portals, the algorithm provides a standard sequence, with jet fan activation every 15 seconds.

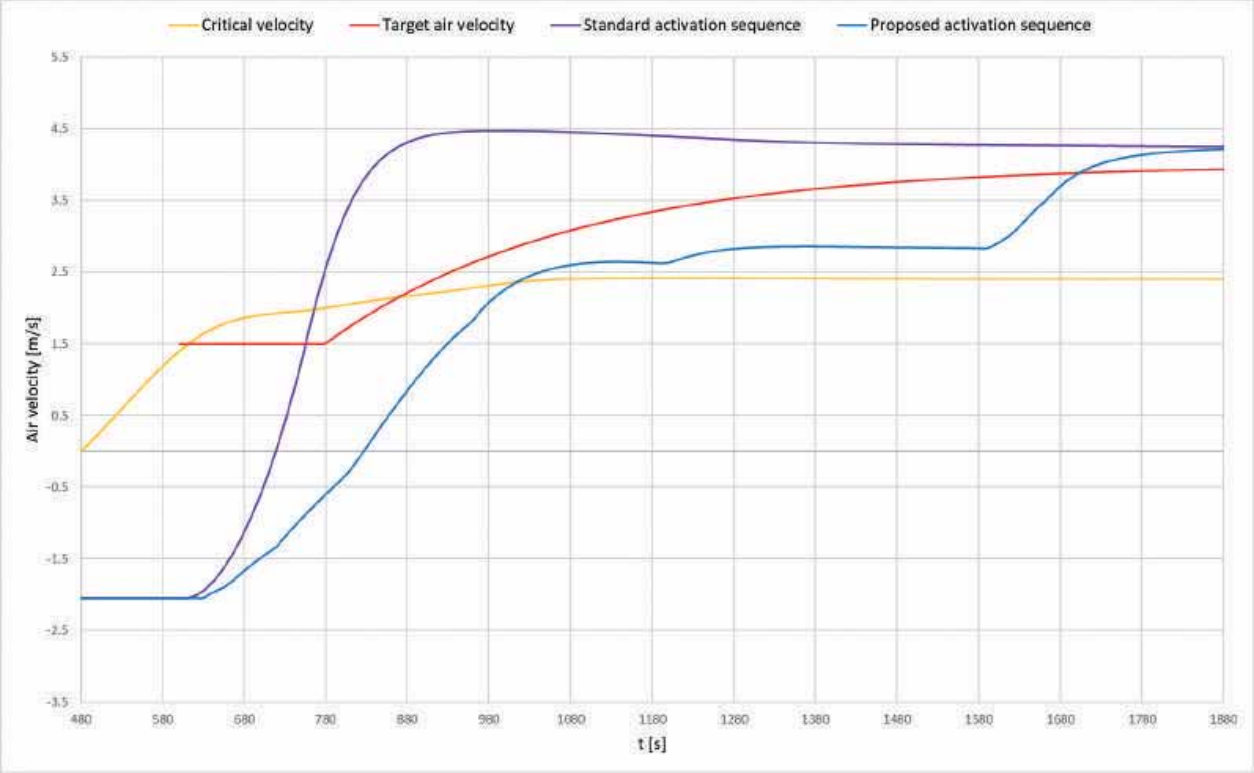


Figure 5 – Comparison between activation sequences in case of initial negative air speed

As shown in Figure 5, the activation sequence 1 (based on target velocity) fails to guarantee the overcoming of the critical velocity during the central phase of the fire. For this reason, in the event of an initial negative air speed, it's necessary to adopt the standard activation sequence.

CONCLUSIONS

Correct management of road tunnels ventilation, using appropriate control algorithms, is essential to ensure the comfort and safety of tunnel's users. In this paper, one-way tunnels with predominantly flowing traffic scenario have been analyzed.

In these conditions the main purpose of emergency ventilation is to ensure that the critical velocity is exceeded in order to avoid smoke rising in the direction of the evacuation, without reaching too high air speed value which could fuel the fire.

As can be seen from the graphs presented, this goal can be achieved using different jet fan activation sequence for each tunnel.

Furthermore, for each case analyzed, a comparison has been presented with a standard activation sequence, that involves the activation of a jet fan every fixed time.

From this analysis it emerges that this type of activation sequence leads to a peak of air speed that is too high. For this reason, it is necessary to establish a mathematical activation function specific to each tunnel, based on the tunnel geometry characteristics.

DISCUSSION ON THE SMOKE PREVENTION STRATEGY OF HIGH-ALTITUDE TUNNEL AND THE EVACUATION CHANNEL SPACING

Zhang Aoyu[1,2], Yang Ge[1,2] , Zhou Yu[1,2] ,Zhang Cancheng[1,2,] Deng Min[1,2*]

[1] China Communication Second Highway Consultant Company

[2] Wuhan China Communication Transportation Engineering Company

In order to determine the smoke prevention strategy of service tunnel and the layout of evacuation passageways of extra-long highway tunnel in high altitude environment, FDS and Pathfinder are used to establish a simulation platform for ventilation and personnel evacuation of main tunnel + service tunnel. The smoke movement law and evacuation process in tunnel under 50MW fire are analyzed, Combining the life safety limit value under fire environment, the available safe evacuation time is assured. Considering the high altitude and low oxygen environment, the evacuation speed is reduced, and the necessary safe evacuation time is further determined. The results show that: the longitudinal wind speed of 1.6 m/s in the service tunnel can ensure smoke-free in the service tunnel within 1200s. Considering the reduction of fire growth coefficient in high altitude areas, the available safe evacuation time is in the shape of "W", and the minimum ASET(available safe evacuation time) is located in 200m downstream. Combined with the analysis of the evacuation time, the pedestrian passage spacing should be set at 200m.

DEBATE SOBRE LA ESTRATEGIA DE PREVENCIÓN DE HUMOS DEL TÚNEL DE GRAN ALTURA Y LA SEPARACIÓN DE LOS CANALES DE EVACUACIÓN

Con el fin de determinar la estrategia de prevención de humo del túnel de servicio y el diseño de los pasillos de evacuación del túnel de carretera extralargo en un entorno de gran altitud, se utilizan FDS y Pathfinder para establecer una plataforma de simulación para la ventilación y evacuación de personal del túnel principal + servicio túnel. Se analizan la ley de movimiento de humo y el proceso de evacuación en un túnel bajo un incendio de 50 MW. Combinando el valor límite de seguridad de la vida en un entorno de incendio, se garantiza el tiempo de evacuación seguro disponible. Teniendo en cuenta la gran altitud y el entorno con poco oxígeno, se reduce la velocidad de evacuación y se determina aún más el tiempo necesario de evacuación segura. Los resultados muestran que: la velocidad del viento longitudinal de 1,6 m/s en el túnel de servicio puede garantizar que no haya humo en el túnel de servicio en 1200 s. Teniendo en cuenta la reducción del coeficiente de crecimiento del fuego en áreas de gran altitud, el tiempo de evacuación segura disponible tiene la forma de "W", y el ASET mínimo (tiempo de evacuación segura disponible) se encuentra en 200 m aguas abajo. Combinado con el análisis del tiempo de evacuación, el espacio de paso de peatones debe establecerse en 200 m.

DISCUSSION SUR LA STRATÉGIE DE PRÉVENTION DES FUMÉES DANS LES TUNNELS DE HAUTE ALTITUDE ET SUR L'ESPACEMENT DES CANAUX D'ÉVACUATION

Afin de déterminer la stratégie de désenfumage du tunnel de service et l'aménagement des couloirs d'évacuation du tunnel autoroutier extra-long en environnement de haute altitude, FDS et Pathfinder sont utilisés pour établir une plate-forme de simulation pour la ventilation et l'évacuation du personnel du tunnel principal + service tunnel. La loi de mouvement des fumées et le processus d'évacuation dans un tunnel sous un feu de 50 MW sont analysés. En combinant la valeur limite de sécurité des personnes dans un environnement d'incendie, le temps d'évacuation en toute sécurité disponible est assuré. Compte tenu de la haute altitude et de l'environnement à faible teneur en oxygène, la vitesse d'évacuation est réduite et le temps d'évacuation en toute sécurité nécessaire est en outre déterminé. Les résultats montrent que : la vitesse longitudinale du vent de 1,6 m/s dans le tunnel de service peut assurer une absence de fumée dans le tunnel de service en 1200 secondes. Compte tenu de la réduction du coefficient de croissance du feu dans les zones de haute altitude, le temps d'évacuation en toute sécurité disponible est en forme de "W", et le minimum ASET (temps d'évacuation en toute sécurité disponible) est situé à 200 m en aval. Combiné à l'analyse du temps d'évacuation, l'espacement des passages piétons doit être fixé à 200m.

INTRODUCTION

In recent years, with the gradual improvement of the national transportation infrastructure network, infrastructure investment has gradually tilted towards remote areas in the west, and more and more high-altitude tunnels have been built in western China, especially in Sichuan, Xinjiang and Tibet. High altitude area has a series of characteristics such as low air pressure, thin oxygen and low temperature. Owing to tunnel fire belongs to the intersection of a series of disciplines such as fluid mechanics, thermodynamics and combustion, it is greatly influenced by environmental factors, so the characteristics of tunnel fire in high altitude areas are obviously different from those in plain areas. First of all, the low oxygen concentration at high altitudes will make the proportion of incomplete combustion in the combustion reaction of tunnel fires larger, which will further affect the heat release rate of fire and the temperature of hot plumes and the initial temperature of the flue gas layer. The hot plume of fire combustion flows superheated convection and heat radiation to the surrounding air, which in turn affects the motion of the flue gas layer, which will make the critical wind speed and backflow length of the key parameters of tunnel fire research change.

At the same time, incomplete combustion produces carbon monoxide and other harmful gases. Low oxygen concentrations can also cause a decrease in a person's reaction time and speed of movement, which poses a significant risk to evacuees[1].

Yang Chao, Wang Zhiwei and so on summed up the ventilation methods and control methods often used in tunnels, and pointed out the growth purpose of comprehensive, network, intelligent and energy-saving for the future development of tunnel ventilation system[2]. Wang Minnian and other 3-5 for the high-altitude railway special tunnel personnel safe evacuation problem and high-altitude coefficient selection of research, for the cross-channel spacing and altitude coefficient of personnel to give relevant recommendations, for China's high-altitude highway tunnel disaster prevention and rescue research laid a foundation[3-5]. Deng Min et al. used numerical simulation to calculate and analyze the evacuation process of the double-decker shield tunnel, and carried out literature research on the evacuation of the double-decker tunnel personnel, and summarized the best time for the safe evacuation of 6 min[6].

Ruggiero Lovreglio et al. [7] combined modern information technology to study the evacuation process in special environments, and proposed an informationized evacuation analysis and evaluation model. Enrico Ronchi et al. [8-9] analyzed the differences in the results of the current mainstream evacuation calculation algorithms, and gave the limitations and applicable conditions of different evacuation model algorithms. At present, there is not much research on the disaster prevention strategy of the service tunnel and the distance between the personnel evacuation passages of the high altitude extra-long highway tunnel. For the extra-long highway tunnel project of the main tunnel + service tunnel in the high altitude area, it is necessary to have a cross-sectional form different from that of a railway tunnel. Carry out pertinent research, hoping to provide reference and reference significance for similar projects in the future.

1. ENGINEERING BACKGROUND

The Tianshan Shengli Tunnel is designed according to expressway standards, with a design speed of 100km/h and four lanes in both directions.

Tianshan Shengli Tunnel is the key control project of this project, and its ventilation and disaster prevention and rescue plan have a significant impact on the safety and economy of later operation management, construction period and construction methods. The left line of the Tianshan Shengli Tunnel is 21995m, and the right line of the tunnel is 21955m. The tunnel adopts the three pilot tunnel scheme, in which the middle pilot tunnel is planned to be constructed by TBM, and the length is about 21977m [10]. The route design of this tunnel is shown in Table 1 below.

Table 1 Route design parameters of Tianshanshengli tunnel

Parameters	Unit	Left line	Right line
Length	m	21995	21955
Altitude	m	2843	2839
Area	m^2	70.8	
Diameter	m	8.48	
Length of middle tunnel	m	21977	
Area of middle tunnel	m^2	35	

2. SIMULATION PARAMETERS

The Tianshan Shengli Tunnel has an altitude of 2837 meters. The disaster prevention and rescue strategy is preliminarily determined as personnel entering the service tunnel from the pedestrian and vehicle tunnels to escape. A three-dimensional numerical simulation analysis model is established based on FDS. The tunnel slope is taken as 1.36% and the fire source length is It is set to 10 meters, and the fire source is at the entrance of the vehicle's horizontal tunnel. People cannot escape through the horizontal tunnel of the vehicle. People escape through the horizontal tunnel and pedestrian tunnel on both sides to calculate the temperature field during the development of the tunnel fire. , Visibility and CO concentration field, combined with the evacuation ability of personnel, comprehensively evaluate the safety of the tunnel under fire conditions, in order to provide a certain reference for the formulation of disaster prevention and rescue strategies [11]. In order to prevent the smoke from spreading to the service tunnel through the cross channel, the service tunnel adopts the anti-smoke control strategy that the jet fan at the upstream of the fire source blows forward and the jet fan at the downstream blows back. According to the preliminary design, one-dimensional calculation is used to determine that the normal wind speed in the service tunnel is 1.6m/s, and the direction is from the upstream of the fire source to the downstream of the fire source.

3. AVAIABLE SAFETY EGRESS TIME

3.1. Calculation Standard For Available Safety Egress Time

According to literature research, current evacuation failures in tunnels are mostly caused by high-temperature smoke burns to the respiratory tract and secondary injuries caused by reduced visibility. Therefore, the numerical model mainly monitors the changes in temperature and visibility during the development of the fire [11]. The criteria for determining the safe evacuation time available for personnel in a fire scene [12] are: (With regard to the height of the human eye feature, considering the average height of the personnel in our country, it is set to 1.7m.)

At the vertical height Z=1.7m, the flue gas temperature is ≤60°C.

At vertical height Z=1.7m, the visibility is ≥10m.

3.2. Model Description

Due to the consideration of the fire situation under vehicle blocking conditions, a vertical wind speed of 0.5m/s for safe evacuation is set in the tunnel (refer to the wind speed requirements for the safe evacuation phase of a single-hole two-way traffic tunnel [12]). The fire scale of the tunnel is selected as 50MW[13-14].

The law of heat release rate changing with time is as follows:

$$Q = \begin{cases} \alpha t^2 & (t \leqslant t_0) \\ Q_{\max} & (t < t_0) \end{cases} \qquad (1)$$

In equation: Q is heat release rate, MW; α is increase rate, kW/s^2, t is time, s; t_0 is critical time, s.

The air pressure in high-altitude areas is lower than that in plain areas, and the rate of fire heat release is proportional to the local atmospheric pressure. According to the meteorological data collected during the construction stage, the annual average air pressure is 71.73 kpa[9], so the heat release rate is reduced to 71%.

When the fire source is set at the vehicle cross aisle and the fire area happens to block the aisle, people can only be evacuated through the vehicle cross holes and pedestrian cross holes on both sides. The evacuation path is the longest, which is the most unfavorable for evacuation.

The calculation grid of the numerical model is set to 0.5m×0.5m×0.5m, and the numerical model is shown in Figure 1.The measuring points are arranged at different positions from the fire source, and the schematic diagram of the measuring point arrangement is shown in Figure 2.

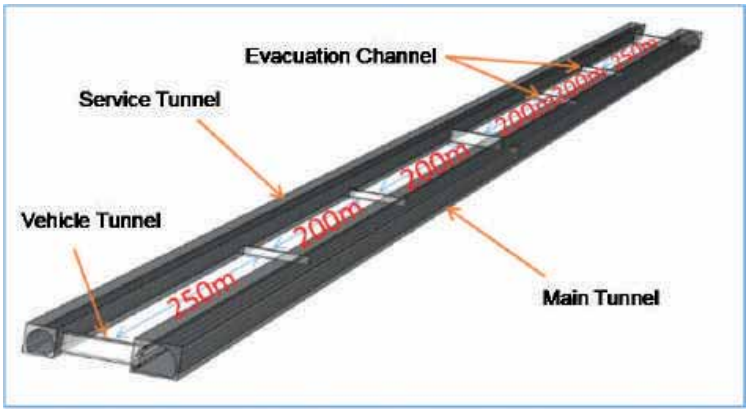


Fig. 1 Schematic diagram of FDS model

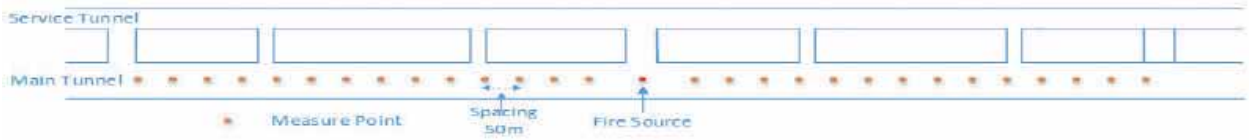


Fig. 2 Vertical measuring point layout

3.3. Results and Discussion

(1) smoke movement

Figure 3 shows the movement and diffusion of smoke in the tunnel when the heat release rate is 50MW. As the fire develops, the generated smoke begins to diffuse upstream and downstream of the fire source. Because of the longitudinal wind speed of 0.5m/s in the tunnel, the smoke diffusion rate downstream of the fire source is greater than that of the upstream. It can be seen from Figure 3 that when the wind speed in the pilot tunnel is 1.6m/s, within the calculation time range (1200s), the smoke layer does not diffuse to the service tunnel through the cross channel, which has no effect on the evacuation of people.

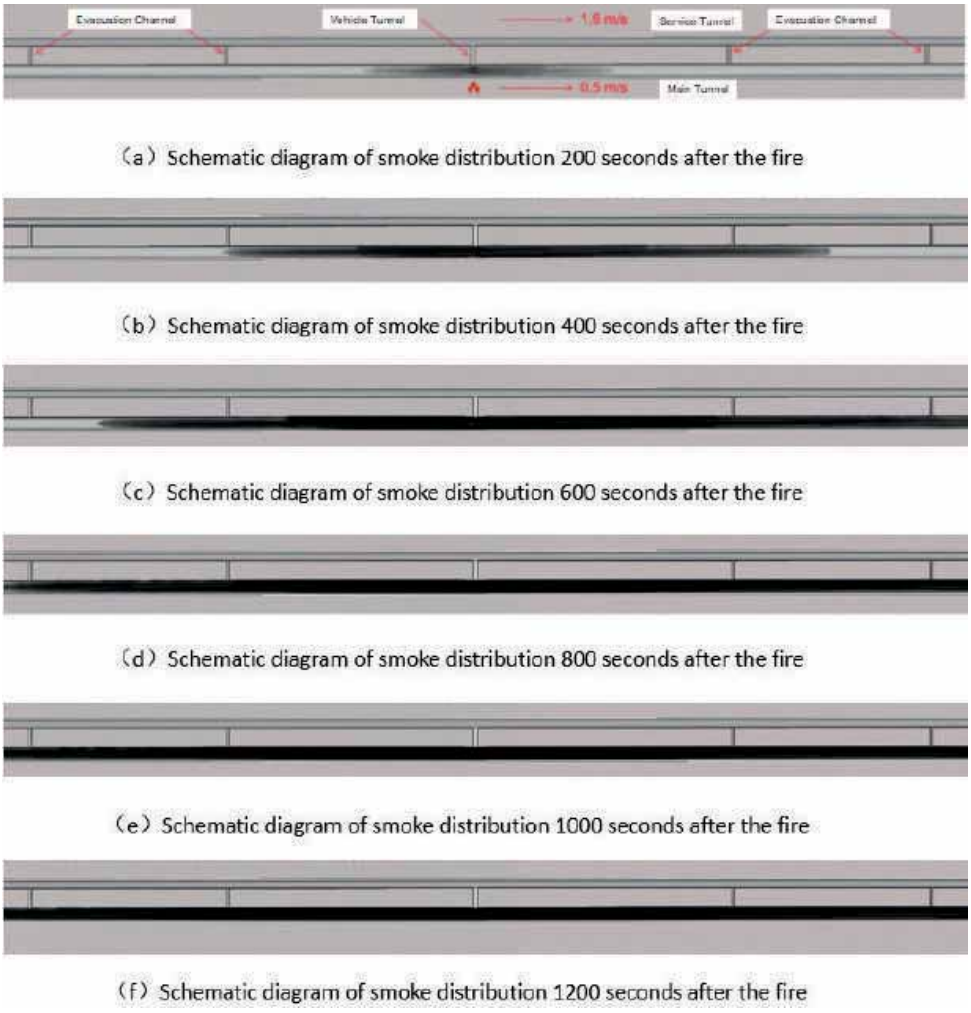


Fig. 3 Plot of smoke distribution over time (main tunnel 0.5m/s, service tunnel 1.6m/s)

(2) Visibility

Figure 4 shows the calculated cloud diagram of the visibility of the human eye feature height in the tunnel over time. In the first 400s when the fire broke out, the movement of smoke was mainly dominated by thermal buoyancy and spread along the vault inside the tunnel. It can be seen from the figure that at 1000s, the visibility at the four pedestrian crossings is reduced to less than 10 meters.

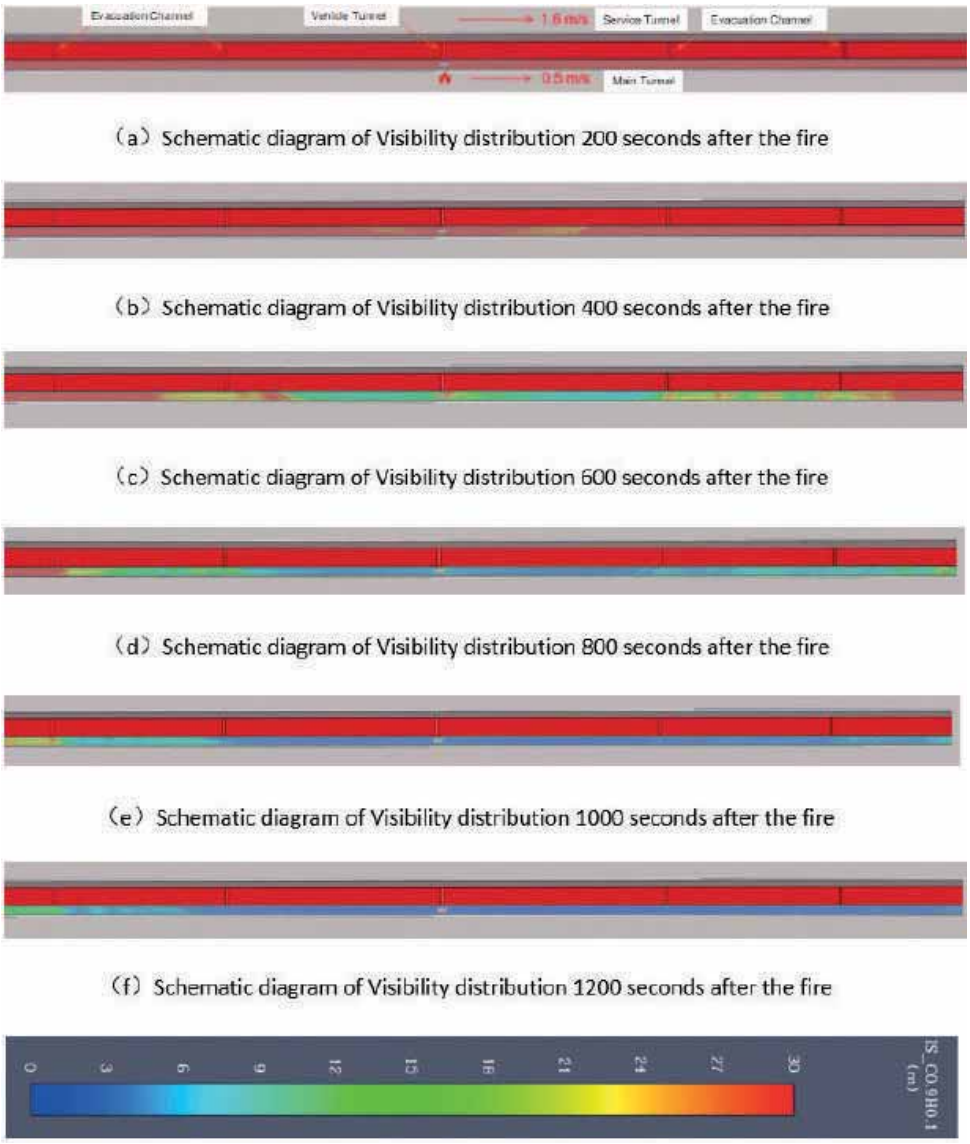


Fig. 4 Visibility distribution graph with time (main line tunnel 0.5m / s, service tunnel 1.6m / s)

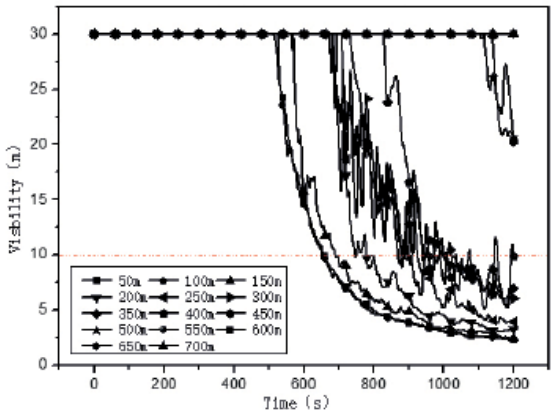


Figure 5 The visibility-time curve of the upstream measuring point

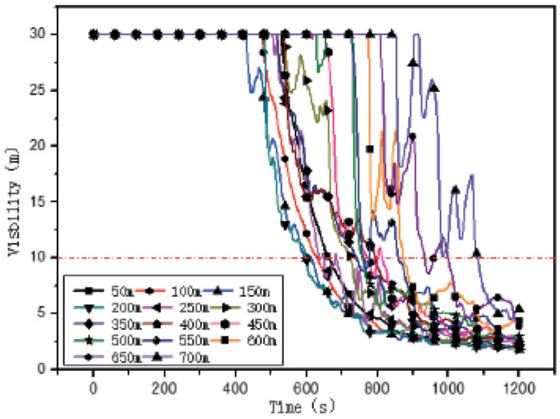


Figure 6 Visibility-time curve of the measuring point downstream of the fire source

At the characteristic height of the human eye, a measuring point is set every 50 meters upstream and downstream of the fire source to collect the related data of visibility and temperature, and the relationship of visibility over time is shown in Figure 5 and Figure 6. At Z=1.7m, 10m is used as the critical visibility threshold for evacuation. Smoke spreads along the longitudinal direction, and each measurement point gradually reaches the critical value.

Table 2 shows the time for each measuring point to reach the critical value.

Table 2 Available safety egress time for personnel at different locations

	Distance from fire (m)	Time to enter a dangerous state (s)		Distance from fire (m)	Time to enter a dangerous state (s)
Downstream	50	662	Upstream	50	657
	100	630		100	655
	150	615		150	690
	200	598		200	744
	250	636		250	884
	300	722		300	885
	350	739		350	896
	400	795		400	944
	450	776		450	-
	500	756		500	-
	550	762		550	-
	600	872		600	-
	650	933		650	-

(3) vertical temperature

The real-time temperature of each longitudinal point has a greater impact on the evacuation safety of people. The model monitors the change of the longitudinal temperature at the central axis of the tunnel over time, and analyzes the effect of the longitudinal temperature on the evacuation of people.

The analysis mode is set in Figure 7, and the place where the temperature exceeds 60 degrees Celsius will be marked in black, which can be more intuitive to observe the spread of the dangerous area. It can be concluded from the figure that the smoke temperature at the height of 1.7m marked by the human eye is 60℃ as the standard. The smoke maintains a good layered structure of smoke at the beginning. As time develops, the temperature area gradually spreads to both sides. By 800s, there was a significant drop in the smoke layer. At the same time, the closer to the fire source, the higher the temperature, and the temperature on both sides of the fire source will gradually decrease.

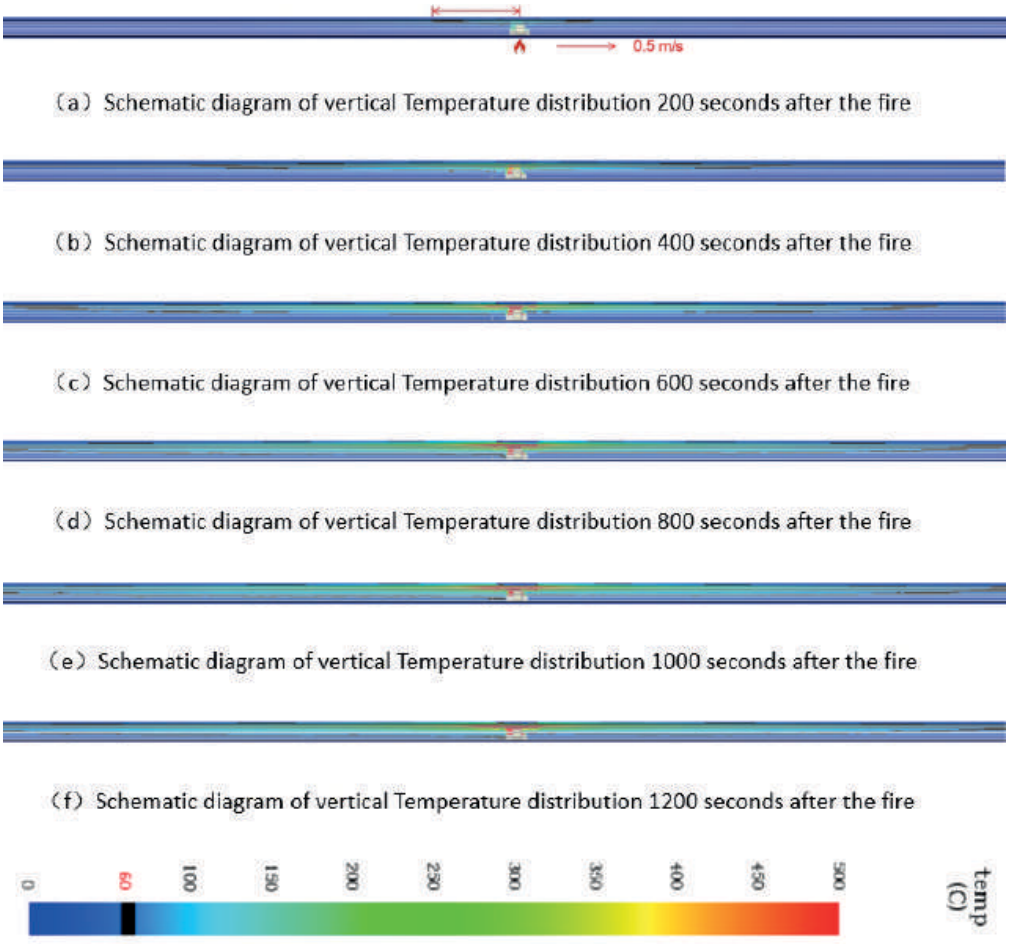


Figure 7 The longitudinal temperature distribution of the main line tunnel with time

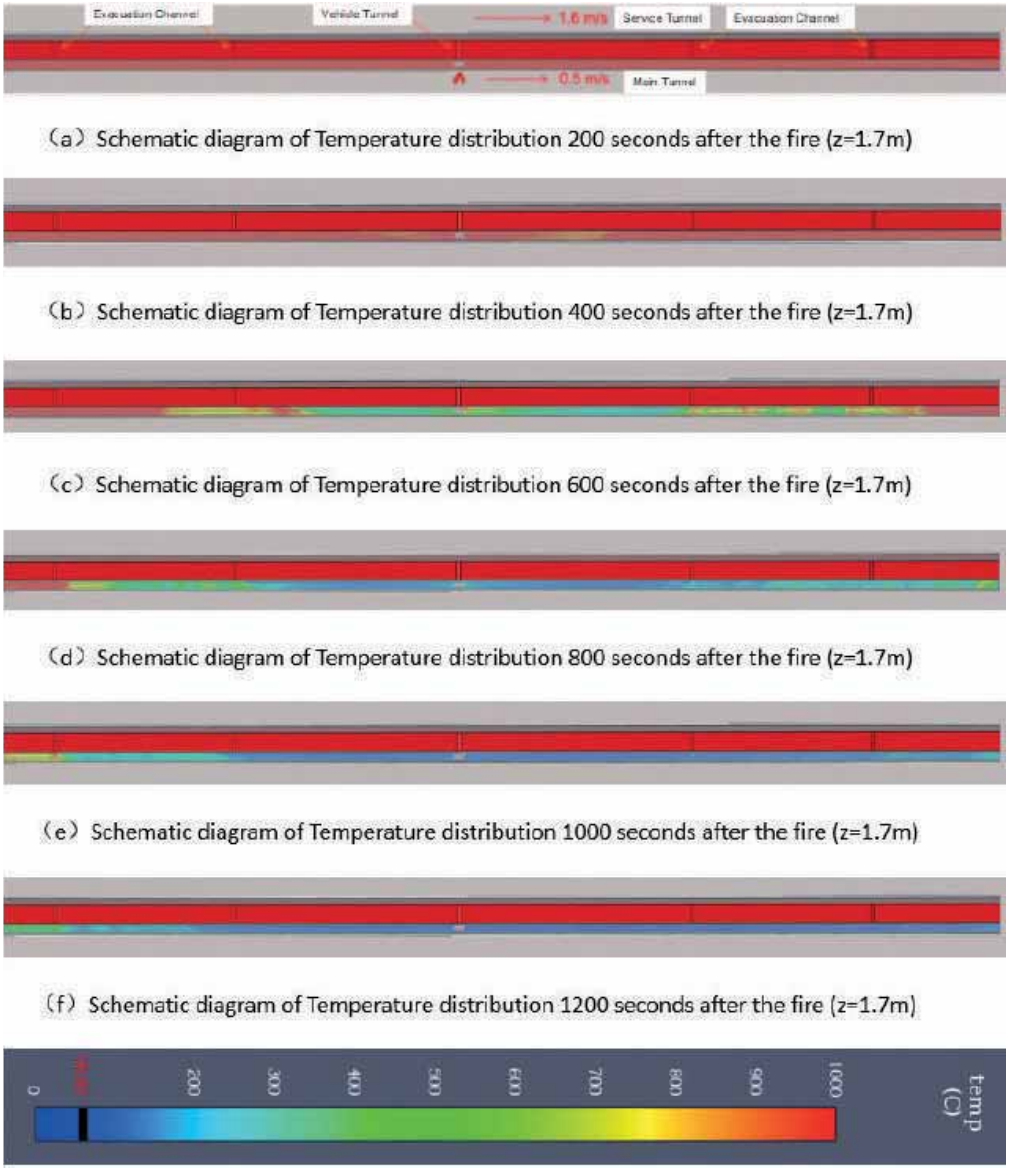


Fig. 8 Temperature distribution at the characteristic height with time

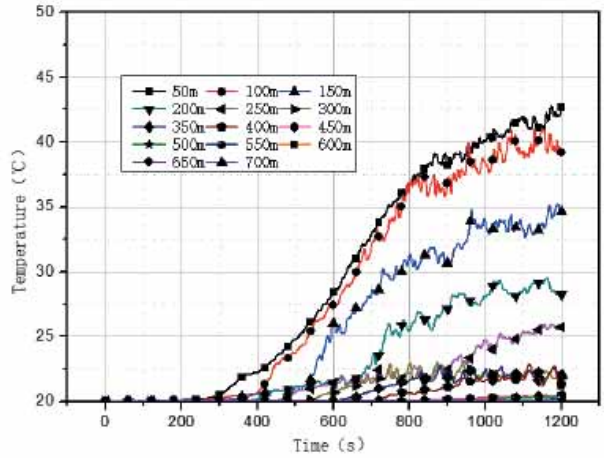


Figure 9 Temperature-time curve of the measuring point upstream of the fire source

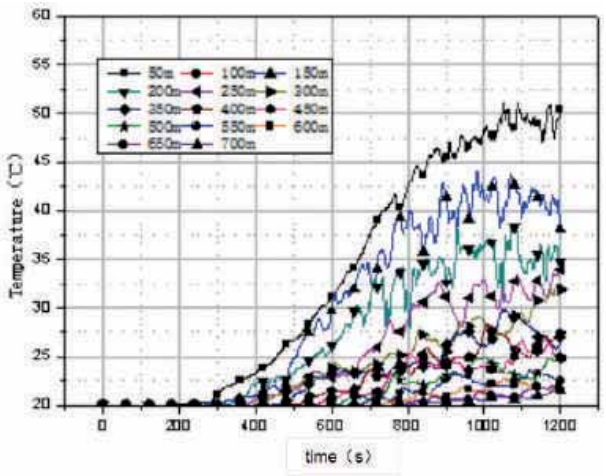


Figure 10 Temperature-time curve of the measuring point downstream of the fire source

Since the model uses a thermocouple to measure the temperature change during the fire development process, there is no case where the temperature value exceeds 60ªC during the fire development process. According to relevant domestic and foreign literature, the Krani formula can be used to calculate the damage value of high temperature to personnel. This calculation method takes into account the characteristics of the increasing damage of high temperature to personnel over time.

Comparing the calculation results of the fire scene comprehensively, the time for each measurement point in the longitudinal direction of the tunnel to reach the critical value is shown in Figure 11. It can be seen from Figure 11 that when a fire occurs, the 200 meters downstream of the fire source is the most dangerous, and the available safe evacuation time for personnel is the least, which is 598 seconds.

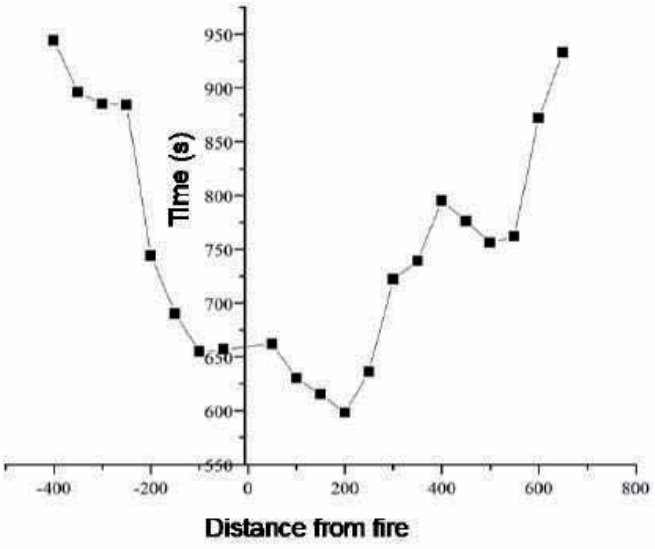


Figure 11 The time when each measuring point upstream and downstream of the fire source enters a dangerous state

4. REQUIRED SAFETY EGRESS TIME

4.1. Model Description

The pathfinder is used to establish the evacuation simulation model of the main tunnel + service tunnel, which mainly considers the evacuation movement time when the evacuation speed is reduced under high altitude conditions and the visibility of the environment in the tunnel affects the evacuation decision.

(1) Evacuation Time

The setting of evacuation speed parameters of tunnel personnel in high altitude areas needs to refer to the research conclusions of Wang Mingnian et al. on human body function at high altitudes. At an altitude of 2800, the human body's exercise capacity is about 65%—70% lower than that in the plain, and the calculation will correspond to it. The speed of personnel type is reduced [3]. The setting of the evacuation speed is shown in Table 3 below.

Table 3 evacuation speeds of different personnel types in simulation calculation (m/s)

People type	Male	Female	Children	Older People
High altitude tunnel without smoke	0.9	0.8	0.6	0.5
High altitude tunnel with smoke	0.49	0.41	0.32	0.3

(2) People Pre-evacuation Time

For conventional tunnel engineering projects, the pre-evacuation time is composed of reaction time, response time and hesitation time. Taking into account the impact of low oxygen environment on the physical functions of personnel, the pre-evacuation time of personnel should be increased to a certain extent than that of conventional tunnel projects. Comprehensive considerations The pre-evacuation time is 130s.

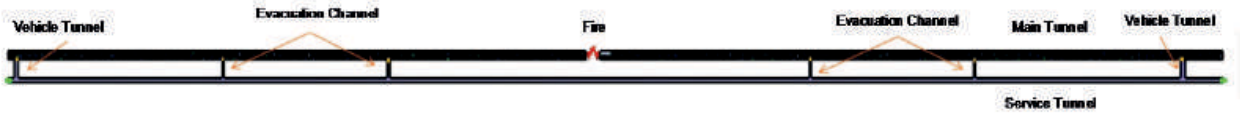


Figure 12 Personnel evacuation model

4.2. Simulation Results Analysis

Figure 13 shows how the number of people trapped in the tunnel changes with the evacuation simulation time. The total evacuation time of the people in the tunnel is 506s. Considering the pre-evacuation time of 130s, the safety evacuation time of the people must be 636s.

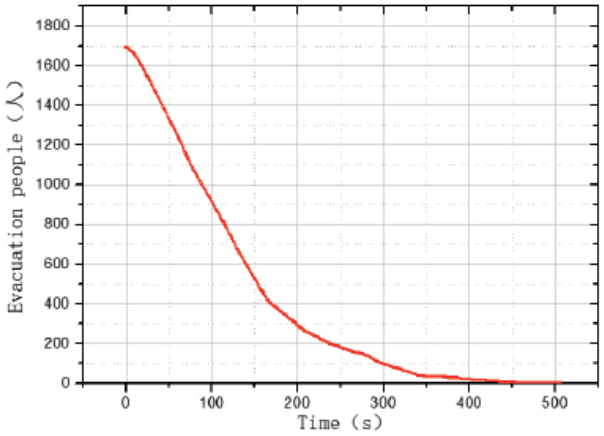


Figure 13 Evacuation simulation time results

5. PEOPLE EVACUATION SAFETY ANALYSIS

According to the concept of performance-based design of fire protection facilities, in the case of a 50MW fire scale, the available safe evacuation time and the necessary safe evacuation time are compared and analyzed.

At 200 meters downstream of the fire source, the available safe evacuation time is the closest to the necessary safe evacuation time. At this time, it can not only meet the evacuation safety requirements of people whose safe evacuation time is less than the available safe evacuation time, but also meet the economic requirements of the project. Therefore, it is recommended that the distance between the pedestrian evacuation channel and the vehicle evacuation channel is 200 meters. At the same time, during the evacuation process, the horizontal hole of the vehicle should be opened to assist personnel to evacuate.

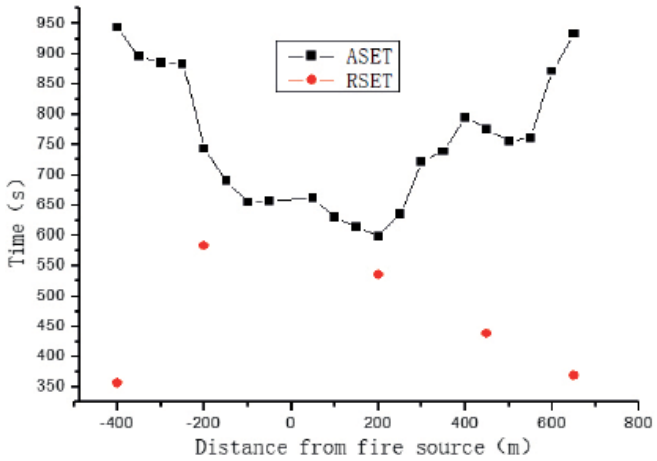


Figure 14 Comparison of the available time and required time of each measuring point in the longitudinal direction of the tunnel

6. CONCLUSION

(1) When the auxiliary tunnel maintains a longitudinal wind speed of 1.6m/s, when the wind speed in the main line tunnel is 0.5m/s during the safe evacuation phase, the smoke in the main line tunnel will not diffuse into the service tunnel within 1200s.

(2) In the case of high altitude, considering the reduction of the fire growth coefficient, analyze the available time for evacuation of people at different longitudinal positions in the tunnel in the case of a 50MW fire. The entire longitudinal available time is distributed in a W shape, and the time is 200 meters downstream of the fire source. The broken line appears obvious sinking, and the available safe evacuation time is the smallest at this time, indicating that the smoke at this location has an obvious layer drop, which will pose a greater threat to the escape safety of personnel.

(3) The impact of high-altitude environment on the evacuation of people is mainly considered by appropriately increasing the pre-evacuation time (compared to the general situation by 10s) and reducing the evacuation speed to an appropriate extent (the evacuation speed is reduced by 65%), and then simulate Calculate the evacuation process to obtain the time it takes for all the evacuation of the people at different evacuation openings. Comparing ASET and RSET (the position where the broken line is closest to the marked point in the figure) shows that the distance between the pedestrian passages is appropriately set to 200 meters.

REFERENCES

[1] Yan, Zhi-guo, et al."Full-Scale Experiments on Fire Characteristics of Road Tunnel at High Altitude."Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 66, no. 66, 2017, pp. 134–146.

[2] Yang Chao,Wang Zhiwei. Present situation and development trend of highway tunnel ventilation technology[J].Journal of Underground Space and Engineering, ,2011,7(04):819-824.(in Chinese)

[3] Wang Mingnian, Li Qi, Yu Li et al. Development of ventilation, oxygen supply, disaster prevention and energy-saving technologies for high-altitudetunnels[J] Tunnel Construction, 2017, DOI:10.3973/j.issn.1672-741X.2017.10.002.[2].(in Chinese)

[4] Yan Tao, Wang Xiannian, Shu Dongli, Zhang Zihan, Liu Xiang. Study on the spacing setting of single tunnel + service tunnel at high altitude [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12 (06): 1608-1615 .(in Chinese)

[5] Yan Tao, Wang Xiannian, Guo Chun, Chao Feng, Chen Hanbo. Altitude coefficient considering CO and smog in high-altitude tunnels [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2014, 45 (11): 4012 -4017.(in Chinese)

[6] Deng Min, Duan Ping, Hu Yanjie, etc. Analysis of personnel evacuation of a single-hole double-layer shield tunnel under fire conditions [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17 (3): 1038-1042.(in Chinese)

[7] Ronchi E, Nilsson D, Kojić S, et al. A Virtual Reality Experiment on Flashing Lights at Emergency Exit Portals for Road Tunnel Evacuation[J]. Fire Technology, 2016, 52(3):623-647.

[8] Ronchi E, Colonna P, Capote J A, et al. The evaluation of different evacuation models for assessing road tunnel safety analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 30(1): 74-84.

[9] Lovreglio R, Ronchi E, Borri D. The validation of evacuation simulation models through the analysis of behavioural uncertainty[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 131(3):166-174.

[10] Technical design of operation ventilation and disaster prevention and rescue system of Tianshan Shengli Tunnel [R] China Communications Second Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., 2019.(in Chinese)

[11] Thunderhead Engineering, Pathfinder 2018 User Manual [EB/OL]. https://support.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/2020-5/user-manual, 2020.

[12] Bisby L. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition[M]. New York: Springer Press, 2016.

[13] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Design Fires in Road Tunnels[M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2011.

[14] China Merchants Chongqing Communications Research and Design Institute Co., Ltd .. Highway Tunnel Ventilation Design Rules [S]. People's Communications Press Co., Ltd., 2014.(in Chinese)

[15] China Communications Second Highway Survey and Design Institute Co., Ltd. Design Specification for Highway Underwater Tunnel (Trial Draft) [S]. People's Communications Press Co., Ltd., 2014.(in Chinese)

PIARC
2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROAD TUNNEL OPERATIONS AND SAFETY
&
VIII SPANISH TUNNELS SYMPOSIUM

SEVENTH SESSION:

Current situation of tunnels in relation to Standards

DISEÑO DE LOS CUARTOS TÉCNICOS DE LOS TÚNELES URBANOS

Eva Mª Montero Yéboles
TYPSA, Técnica y Proyectos, S.A.
Jefe de la Sección Mecánica del departamento de Ingeniería Industrial y Telecomunicaciones

El diseño de los cuartos técnicos para un túnel urbano que deban cumplir con la normativa internacional no es tarea fácil. Es importante contar con un equipo de diseño multidisciplinar formado por los diferentes ingenieros de disciplina, el ingeniero integrador, el arquitecto y el responsable de seguridad frente a incendio del proyecto. Solo con el trabajo coordinado y colaborativo entre todos ellos se podrá alcanzar una solución que sea adecuada y cumpla a la vez con los requisitos del cliente, los requisitos funcionales y la normativa aplicable.

En esta ponencia se presenta un ejemplo real de cómo se fue desarrollando el diseño de los cuartos técnicos para un túnel, explicando las dificultades que se fueron encontrando, muchas de ellas debidas a las restricciones impuestas en la urbanización y otras debidas al cumplimiento exhaustivo de la normativa propia de edificación.

Se explicará con detalle los requerimientos indicados en las normativas aplicables a cuartos técnicos: la NFPA 101 para los requisitos de seguridad según la clasificación, la NFPA 110 para las salas de grupos electrógenos, la NFPA 1 para las salas de UPS, la NFPA 20 para las salas de bombas contra incendios, la IBC (International Building code) para la clasificación de edificios y la IFC (International Fire Code) para las vías de evacuación.

También se irán dando ejemplos de la resolución de algunos cuartos técnicos en proyectos realizados en España para comparar con la solución que se requiere en proyectos internacionales.

El objetivo final de esta ponencia es que sirva de orientación para otros compañeros que deban enfrentarse a proyectos similares, presentando una metodología de diseño de cuartos técnicos y un listado de la normativa internacional aplicable.

DESIGN OF TECHNICAL ROOMS FOR URBAN TUNNELS

The design of technical rooms for an urban tunnel that must comply with international standards is not an easy task. It is important to have a multidisciplinary design team formed by the different discipline engineers, the integrating engineer, the architect and the fire engineer of the project. Only through coordinated and collaborative work between all of them can a solution be achieved that is both appropriate and complies with customer requirements, functional requirements and applicable regulations

This presentation will show a real example of how the design of the technical rooms for a tunnel was developed, explaining the difficulties that were encountered, many of them due to the restrictions imposed on the urban area, and others due to the exhaustive compliance with the building regulations.

The requirements indicated in the standards applicable to technical rooms will be explained in detail: NFPA 101 for safety requirements according to classification, NFPA 110 for generator rooms, NFPA 1 for UPS rooms, NFPA 20 for fire pump rooms, IBC (International Building Code) for building classification and IFC (International Fire Code) for escape routes.

Examples will also be given of the resolution of some technical rooms in projects carried out in Spain to compare with the solution required in international projects.

The final objective of this presentation is to serve as guidance for other colleagues who must face similar projects, presenting a methodology for the design of technical rooms and a list of the applicable international standards.

CONCEPTION DE LOCAUX TECHNIQUES POUR LES TUNNELS URBAINS

La conception des locaux techniques d'un tunnel urbain qui doit être conforme aux normes internationales n'est pas une tâche facile. Il est important de disposer d'une équipe de conception multidisciplinaire composée des ingénieurs des différentes disciplines, de l'ingénieur intégrateur, de l'architecte et du responsable de la sécurité incendie du projet. Ce n'est que par un travail coordonné et collaboratif entre tous ces acteurs que l'on peut obtenir une solution à la fois appropriée et conforme aux exigences du client, aux exigences fonctionnelles et aux réglementations applicables

Dans cette présentation, un exemple concret de l'élaboration de la conception des locaux techniques d'un tunnel sera présenté, en expliquant les difficultés rencontrées, dont beaucoup sont dues aux restrictions imposées à l'urbanisation, et d'autres au respect exhaustif des règles de construction.

Les exigences indiquées dans les normes applicables aux locaux techniques seront expliquées en détail : NFPA 101 pour les exigences de sécurité en fonction de la classification, NFPA 110 pour les salles de générateurs, NFPA 1 pour les salles UPS, NFPA 20 pour les salles de pompes à incendie, IBC (International Building Code) pour la classification des bâtiments et IFC (International Fire Code) pour les itinéraires d'évacuation.

Des exemples seront également donnés de la résolution de certaines pièces techniques dans des projets réalisés en Espagne afin de les comparer avec la solution requise dans des projets internationaux.

L'objectif final de cette présentation est de servir de guide à d'autres collègues qui doivent faire face à des projets similaires, en présentant une méthodologie de conception des locaux techniques et une liste des réglementations internationales applicables.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la realización del proyecto de un túnel de carretera, hay multitud de disciplinas que trabajan en la concepción del mismo: los ingenieros de trazado, que conciben el perfil longitudinal y transversal más idóneo, los geólogos que estudian las condiciones del suelo, los ingenieros estructuristas, que deciden el método constructivo, los ingenieros hidráulicos que analizan los posibles impactos del agua en el túnel y por supuesto los ingenieros electromecánicos, que diseñan las instalaciones del túnel necesarias para su futura explotación. Dentro de estos últimos hay también una gran variedad de subdisciplinas ya que cada ingeniero se especializa en un tema en concreto, como puede ser el análisis de riesgos, el proyecto de ventilación, el proyecto de protección contra incendios, el proyecto eléctrico o el proyecto de instalaciones de seguridad y gestión del túnel.

Cada uno de los sistemas citados necesita de equipos para su correcto funcionamiento, que deberán estar ubicados en ciertos cuartos técnicos, siendo bastante habitual que cada ingeniero especialista indique sus necesidades de manera independiente al resto de sus colegas.

Este sistema puede funcionar bien en el caso de túneles interurbanos, donde por lo general la ubicación de los cuartos técnicos suele disponerse en las bocas de los túneles, siendo el ingeniero civil quién los incorpora en el exterior uno al lado del otro.

Ahora bien, la ubicación de los cuartos técnicos se complica bastante más cuando se trata de túneles urbanos, donde se precisa tener en cuenta otros requisitos, como son la disponibilidad de espacio en la urbanización, la integración arquitectónica de los recintos y la resolución de las interfaces con otras instalaciones ya existentes.

Es en estos momentos cuando se necesita incorporar al equipo de arquitectura dentro del equipo multidisciplinar de diseño, pues son los que más experiencia pueden aportar para realizar la integración de los cuartos dentro del espacio urbano. Sin embargo, mi experiencia personal, es que no se resuelve el problema solo con la figura del arquitecto.

El diseño de los cuartos técnicos no es tarea fácil ya que hay que tener en cuenta muchos aspectos, no solo relacionados con su dimensionamiento, sino también con su ubicación más adecuada considerando su interrelación con otros sistemas o el cumplimiento de normativa. A esto hay que añadir que los cuartos además requieren de sistemas auxiliares para su correcto funcionamiento (tales como ventilación o protección contra incendios), lo que a su vez conlleva la necesidad de crear nuevos cuartos técnicos.

El arquitecto necesita apoyo para resolver todas estas interrelaciones, por lo que se hace precisa la figura del ingeniero integrador, con experiencia básica y general en todas las disciplinas electromecánicas, y que será quien coordine con los ingenieros especialistas sus necesidades y trabajará en contacto estrecho con el arquitecto para resolver el diseño de los cuartos técnicos. El trabajo del ingeniero integrador es todo un reto, pues debe coordinar que se cumpla con todos los requerimientos técnicos que aseguren la correcta explotación futura de las instalaciones, con el cumplimiento de la normativa y también con los requisitos urbanísticos y estéticos que el arquitecto le va indicando para la correcta integración del edificio técnico en el entorno donde se ubique.

En esta ponencia se va a mostrar un ejemplo práctico de cómo se resolvió el diseño de los cuartos técnicos en un túnel urbano de unos 220 m de longitud, ubicado en un país donde aplican normativas internacionales, entre ellas la NFPA, realizando una comparación al mismo tiempo con los diseños que suelen realizarse en España.

2. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE LOS CUARTOS TÉCNICOS EN TÚNELES URBANOS

Para el diseño de los cuartos técnicos de túnel, se recomienda seguir la siguiente metodología:

1) Conocimiento de la normativa aplicable
2) Programa preliminar de necesidades.
3) Condicionantes arquitectónicos.
4) Condicionantes funcionales
5) Implantación preliminar de los cuartos técnicos
6) Análisis detallado de los condicionantes debidos al cumplimiento de la normativa de seguridad
7) Coordinación entre disciplinas y resolución de conflictos
8) Solución definitiva para la implantación de los cuartos técnicos

A continuación, se irá explicando con detalle cómo se desarrolla cada una de las fases indicadas.

2.1. Normativa aplicable.

Los ingenieros de disciplina son los responsables de diseñar el túnel conforme a la normativa de túneles vigente en el país donde se ubique el túnel. Se indica a continuación la más usual, según se trate de un país ubicado en Europa o fuera de ella:

- Directiva 2004/54/CE del parlamento europeo sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras, así como sus respectivas transposiciones en cada uno de los países miembros.
- NFPA 502, Standard for Road Tunnels, Bridges and other limited Access Highways.

En dichas normativas se indican los requisitos mínimos y las instalaciones que deben implementarse en los túneles en función de ciertas características del túnel como por ejemplo si se trata de un túnel urbano o interurbano, su longitud y su intensidad media diaria de tráfico.

Sin embargo, en las normativas propias de túneles no se indica ningún requisito sobre los cuartos técnicos y por tanto hay que aplicar la normativa propia de edificación. A continuación, se indica la normativa más usual que debe tenerse en cuenta en proyectos internacionales para el diseño de dichos cuartos:

NFPA

- NFPA 1: Fire Code, donde se indican los requerimientos mínimos para la protección contra incendios.
- NFPA 20: Standard for the installation of stationary pumps for fire protection, donde se indican los requisitos mínimos de las bombas de protección contra incendios.
- NFPA 70: National Electrical Code, donde se indican los requisitos mínimos de las distribuciones de los sistemas eléctricos.
- NFPA 101: Life Safety Code, donde se indican los requisitos mínimos se seguridad para cada una de las clasificaciones de los edificios.
- NFPA 110: Standard for Emergency and Standby Power Systems, donde se indican los requisitos mínimos de los sistemas de energía de emergencia.

- NFPA 220: Standards on Types of Building Construction, donde se indican las diferentes tipologías de construcción.
- NFPA 5000: Building Construction and Safety Code, similar a la Norma anterior.

INTERNATIONAL CODE

- IFC- International Fire Code
- IBC- International Building Code

OTROS

- Normativas locales del propio país.
- Requerimientos de las Autoridades Locales de Protección Civil, también conocido como Civil Defense Regulations

2.2. Programa preliminar de necesidades

El primer paso es que los ingenieros de disciplina comuniquen al ingeniero integrador las necesidades de cuartos técnicos que precisan, indicando sus dimensiones aproximadas en largo y ancho que sean adecuadas para la instalación de todos sus equipos.

En el ejemplo que estamos presentando, se elaboró un listado preliminar con toda la información recibida, que se muestra en la Figura 1.

Nº	Cuarto técnico Technical room	Superficie (m2) Surface	Largo (m) Lenght	Ancho (m) Width
1	Depósito agua contra incendios (Fire Water Tank)	50	12	4,2
2	Equipo bombas contra incendios (Fire Fighting Pump)	108	12	9
3	Subestación eléctrica (Electrical Substation)	30	6	5
4	Grupo electrógeno (Diesel Generator Set)	72	13	5,5
5	Sala de cuadros eléctricos (Power Room)	96	16	6
6	Cuarto de comunicaciones y central de detección incendios (Communications room and fire detection panel)	40	10	4

Figura 1: Listado preliminar de cuartos técnicos para el Túnel de carretera

Como puede comprobarse, se solicitaron 6 cuartos con una superficie total de 396 m^2.

2.3. Condicionantes arquitectónicos

A continuación, viene la fase de coordinación entre el ingeniero integrador y el arquitecto para revisar los condicionantes arquitectónicos a considerar en el diseño.

Al tratarse de un espacio urbano, uno de los problemas más habituales que se presentan en estos casos es que no hay superficie suficiente en el exterior para la ubicación de los recintos técnicos. En otras ocasiones sí que podrían encontrarse zonas apropiadas, pero son los clientes los que exigen que los cuartos técnicos no sean visibles en la urbanización por razones de impacto visual.

En el proyecto que estamos presentando el arquitecto informó que era un requisito del cliente que todos los cuartos técnicos sin excepción estuvieran bajo rasante.

Aun así, era necesario coordinar muchos temas ya que, aunque los cuartos sean subterráneos, siempre es preciso ubicar una serie de elementos que sí van a tener visibilidad en el espacio urbano, como son las rejillas de toma de aire fresco, las de salida de aire de ventilación o las escaleras de acceso y evacuación.

En cuanto a la localización más adecuada se intentó desde un principio que los cuartos técnicos estuvieran centrados con respecto al longitudinal del túnel pues era la solución más eficiente desde un punto de vista de instalaciones pues se minimizaban los dimensionamientos de las redes eléctricas.

El arquitecto también recibió información por parte del departamento de estructuras sobre el método constructivo, que era el de excavación entre pantallas (cut&cover) tanto para el túnel como para los cuartos técnicos.

Con toda esta información, el Arquitecto encontró finalmente una solución para ubicar los cuartos, con una huella de dimensión aproximada de 28 * 15 m, siendo la longitud menor la que estaría en contacto directo con el hastial del túnel.

El diseño consistía en la construcción de un Edificio Técnico de dos niveles, aprovechando el método constructivo de ejecución. La planta -2 sería la planta situada anexa al túnel en el camino de rodadura a una profundidad aproximada de 15m y la planta -1 la inmediatamente superior.

2.4. Condicionantes funcionales

El siguiente paso dentro de la metodología de diseño de cuartos técnicos es la definición de los condicionantes funcionales.

Se explican a continuación los principales asuntos que se tuvieron en cuenta en el diseño preliminar:

2.4.1. Acceso a los cuartos técnicos

En un principio, se había considerado que el acceso a los cuartos técnicos se realizaría a través del túnel por el nivel de rodadura. Ahora bien, por el hecho de disponer de un edificio de 2 niveles, se necesitaba considerar también una escalera de acceso al nivel superior. Además, esta escalera debía tener comunicación con el exterior porque se requería como medio de evacuación del edificio.

Debido a las restricciones de espacio en superficie, se optó por el diseño de una única escalera de evacuación, lo cual sí era admisible por la normativa por tratarse de un edificio de baja ocupación (menor a 50 personas).

2.4.2. Ubicación de aljibes y sala de bombas de incendios

Los ingenieros de estructuras solicitaron que los aljibes de agua contraincendios se ubicaran en la planta inferior que estaba en contacto con la solera por ser esta la solución más adecuada desde un punto de vista estructural. Por tanto, el cuarto de bombas de incendios se ubicó también en esa planta.

Es importante advertir que las salas de bombas de incendios según normativa NFPA 20 requieren de un espacio mayor al que estamos habituados en España. Esta normativa exige ciertas distancias mínimas entre las tomas de aspiración, las válvulas y los codos con la propia bomba, por lo que la longitud del cuarto es bastante mayor. También es importante conocer los requisitos que van a solicitar los departamentos de Seguridad y Protección en el país donde se ubique el túnel, también llamado “Civil Defense”. En nuestro caso particular exigían la instalación de dos bombas principales, aunque esto no sea un requisito de la norma NFPA 20, así como espacio suficiente alrededor de los equipos para su correcto mantenimiento.

El diseño de la sala de incendios es un primer ejemplo donde se refleja la diferencia entre los proyectos en España y los proyectos internacionales que cumplan la NFPA. Véase las Figuras 2 y 3 donde se compara una sala de bombas típica de un túnel en España frente al diseño de una sala de bombas que cumple con la normativa NFPA.

Figura 2: Sala bombas de un túnel de carretera en España.

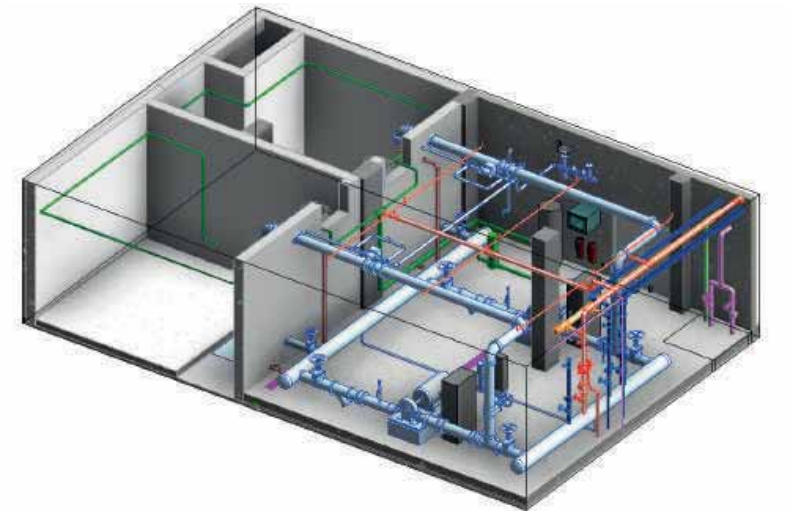


Figura 1: Listado preliminar de cuartos técnicos para el Túnel de carretera

2.4.3. Ubicación de la subestación eléctrica y el grupo electrógeno

Los centros de transformación y el grupo electrógeno son equipos con un peso considerable, por lo que lo más habitual es ubicarlos en cuartos que dispongan de fácil acceso para su descarga desde una grúa. Por tanto, es bastante usual diseñar estos cuartos en el mismo nivel que el camino de rodadura del túnel, con acceso directo al túnel, siendo además lo que prefieren los ingenieros de estructuras, para disponer los equipos de más peso directamente sobre la solera.

En España es bastante habitual diseñar los Centros de Transformación (CT) y Grupo Electrógeno (GE) en el nivel de rodadura. A continuación, se ilustra la solución que existe en el túnel de carretera de Caldearenas, donde todos los cuartos técnicos están en contacto directo con una galería de evacuación paralela al túnel principal. Esta solución, además, presenta beneficios en el diseño de la ventilación de los cuartos, pues se aprovecha la corriente de aire de los ventiladores jet fans de la propia galería. Véase Figuras 4, 5 y 6.

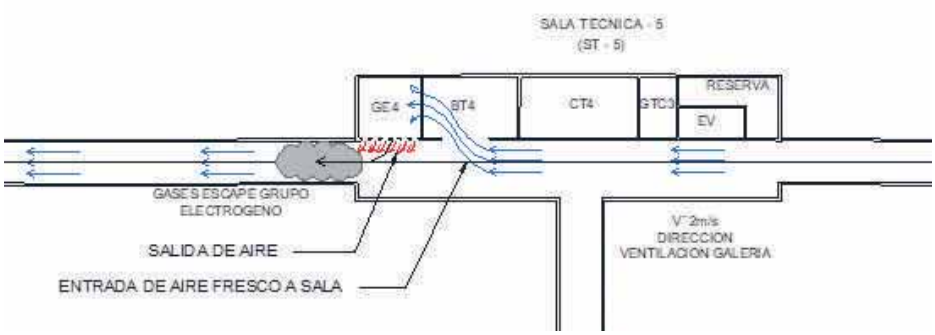


Figura 4: Planta cuartos técnicos del túnel de Caldearenas en España.

Figura 5: Alzado cuartos técnicos túnel de carretera Caldearenas en España.

Figura 6: Foto cuartos técnicos túnel de carretera Caldearenas en España

En base a estas experiencias previas, en el proyecto que estamos presentando también se optó por disponer las salas del Grupo Electrógeno y del Centro de transformación en el nivel -2, en el nivel de rodadura.

2.4.4. Ubicación de las salas eléctricas y de comunicaciones

No hay un criterio funcional que defina cuál es la mejor ubicación de estas salas. Lo que sí es obvio es que las bandejas eléctricas que salen de estos cuartos y van hacia el túnel deberían salir por el punto más elevado del hastial del túnel para discurrir por la zona alta que es donde se ubican los elementos de suministro: luminarias, ventiladores jet fans, etc.

En nuestro caso particular que se disponía de 2 niveles, se decidió ubicar todos estos cuartos en el nivel -1.

Sin embargo, el uso del nivel -1 para la implantación de equipos presentaba un inconveniente en relación con la definición del camino para el traslado de los equipos, lo que en inglés se llama "delivery route" ya que, al estar los cuartos en un nivel superior al de rodadura, no se podía realizar la descarga de los equipos de una manera directa desde el túnel. Se precisaba buscar una ruta alternativa que fuera válida tanto para la etapa de montaje como para la etapa futura de mantenimiento.

La solución fue diseñar una apertura en el techo de la planta -1 de dimensión 4*2 m, con conexión directa a la superficie exterior. El arquitecto buscó la posición más adecuada en la urbanización para que dicho acceso de equipos estuviera cerca de una zona que permitiera el estacionamiento de una grúa y así poder realizar la descarga de los equipos al nivel inferior.

2.4.5. Ubicación UPS

En España, el Reglamento de Baja Tensión RBT 2022 indica que los locales que deban disponer de baterías de acumuladores con posibilidades de desprendimiento de gases deberán estar provistos de una ventilación natural o forzada para garantizar la renovación rápida del aire.

Como esta norma no indica los requerimientos de cálculo para la ventilación, es bastante usual utilizar las recomendaciones de la norma europea siguiente:

- UNE-EN IEC 62485-2: Safety requirements for secondary batteries and battery installations.

En esta norma se explica cómo dimensionar tanto la ventilación natural como la ventilación forzada. En este último caso, se recomiendan fórmulas para el cálculo del caudal en función de una serie de parámetros y datos propios de las baterías y que deben ser suministrados por los fabricantes.

Sin embargo, los requisitos de la norma NFPA para los cuartos donde se ubican UPS son diferentes.

En primer lugar, no se acepta la solución con ventilación natural, siendo necesario diseñar siempre una ventilación forzada. En segundo lugar, los requerimientos de caudal vienen definidos en función de la superficie del recinto.

En la norma NFPA 1, capítulo 52.3.2 stationary battery systems, se indica que los equipos UPS deben disponerse en un cuarto provisto de una ventilación con un caudal de 5.1 l/s/m2, que debe activarse cuando el detector de gas situado en la sala indique que el nivel de gas supera el 25% de límite permitido.

Dado que el requerimiento de ventilación se calcula en función del tamaño de la sala, lo más eficiente era diseñar un nuevo cuarto para ubicar los equipos UPS, de menor tamaño, para conseguir que los caudales de ventilación fueran lo más reducidos posibles.

Por tanto, se decidió dividir la sala eléctrica inicialmente prevista en dos salas, una para los cuadros eléctricos y otra para la UPS.

Por otra parte, con el fin de garantizar la vida útil de las baterías, era preciso dotar al cuarto de un sistema de aire acondicionado.

2.4.6. Sistema climatización

El ingeniero de climatización vio la necesidad de diseñar un sistema de aire acondicionado para un mayor número de recintos técnicos, no sólo para el de la UPS. También se precisaba para el cuarto de comunicaciones, el centro de transformación y la sala de cuadros eléctricos.

Se optó por un sistema Multi-Split, con unidades interiores ubicadas en los recintos y una unidad exterior condensada por aire que debía estar en contacto con el exterior.

Pero recordemos que el requisito del cliente era no disponer de ningún elemento sobre la superficie, lo que presentaba un reto para la localización de los equipos exteriores de climatización.

La decisión final fue la de crear un patio inglés, con un cuarto en la planta -1, abierto en el techo con una reja tipo trámex, donde se ubicarían las unidades exteriores.

2.4.7. Sistema protección contra incendios

El ingeniero de protección contra incendios comunicó que el edificio iba a ser protegido por un sistema de rociadores en todos los cuartos excepto algunos de ellos que estarían provistos de un sistema de extinción automático por gas. Dichos cuartos eran: el cuarto de comunicaciones, el centro de transformación, las salas de cuadros eléctricos y la UPS.

En Europa los requisitos de diseño, instalación y mantenimiento para los sistemas de extinción por gas pueden verse en la norma UNE-EN 15004-1. En el apartado 6.2.3.3 se indica que las botellas de gas estarán instaladas cerca de sala a proteger y preferiblemente en el exterior, pero también se admiten dentro de la sala si se minimiza el riesgo de exposición al fuego.

En la norma NFPA 2001, Standard on clean Agent Fire Extinguishing system, en su capítulo 4.1.3.2 se indica que es posible la ubicación de las botellas tanto dentro como fuera del local a proteger.

Sin embargo, recomendamos revisar las normativas locales de cada país y especialmente las reglas que "Civil Defense" disponga sobre este tema, ya que en algunos casos son muy restrictivas.

En nuestro caso particular se consideraron dos opciones: el diseño de armarios fuera de cada uno de los cuartos a proteger para ubicar sus botellas de extinción o el diseño de una sala de extinción general donde ubicar todas las botellas de extinción de todos los cuartos, siendo ambas válidas por Civil Defense.

2.5. Implantación preliminar de cuartos técnicos

Pues bien, con todos los datos obtenidos en las fases anteriores, ya era posible pasar al siguiente paso de la metodología y realizar los primeros esbozos arquitectónicos con la posible solución de implantación de los cuartos técnicos. Tal y como se ha explicado en los apartados anteriores, la localización de los cuartos se realizó según el siguiente plan:

Planta -1: Sala de cuadros eléctricos, UPS, sala de climatización y sala de comunicaciones

Planta -2: Aljibes y grupo de presión de incendios, Centro de transformación y Grupo electrógeno.

Véase las Figuras 7 y 8 con la implantación preliminar de cuartos técnicos.

Planta nivel -2

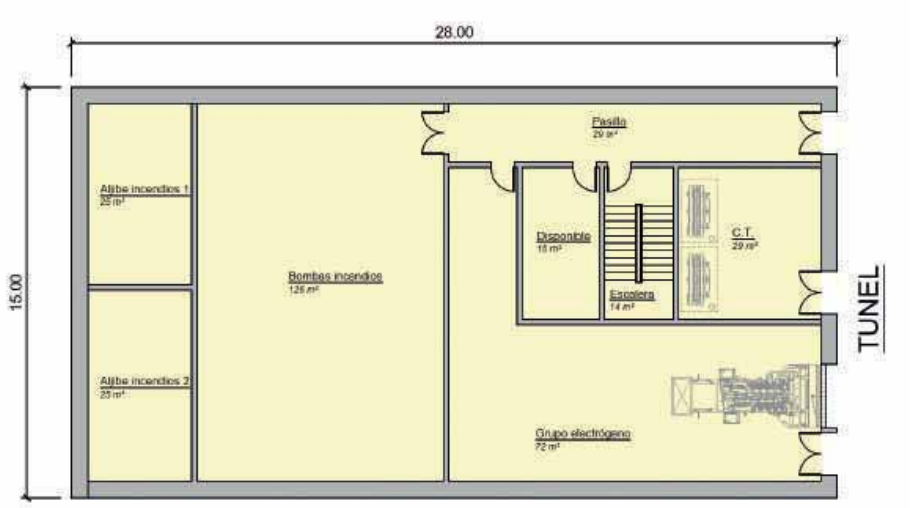


Figura 7: Solución preliminar para la planta -2, nivel de rodadura

Planta nivel -1

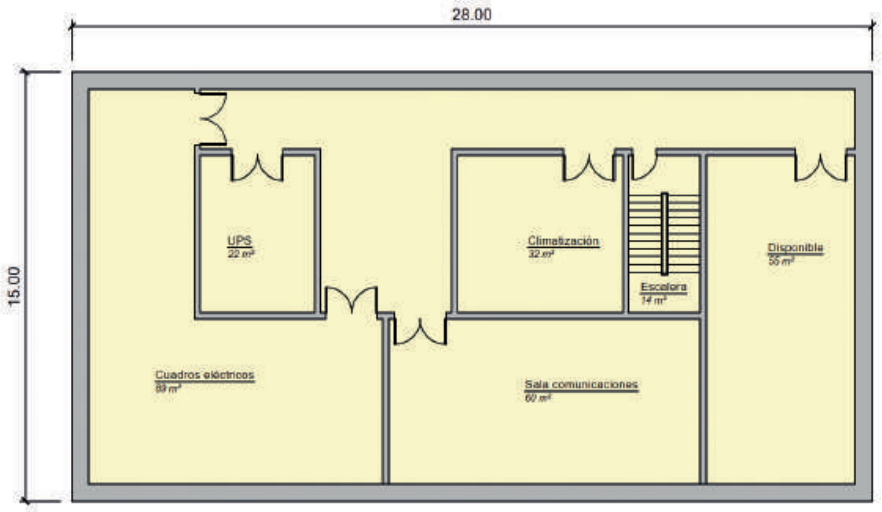


Figura 8: Solución preliminar para la planta -1

2.6. Análisis de los condicionantes debidos al cumplimiento de la normativa de Seguridad

El siguiente paso que debe abordar el ingeniero integrador es revisar que la solución propuesta cumple con los requisitos de Seguridad frente a incendio (Life & Safety en terminología inglesa). En estos casos es fundamental la figura de un Responsable de Seguridad frente a incendio con conocimiento exhaustivo de la normativa de Seguridad, que además es responsable de presentar el proyecto a las Autoridades del país y conseguir su Aprobación formal.

En el caso particular del proyecto que estamos tomando como ejemplo, lo que es además muy habitual en muchos países, se contó con la participación de un consultor local de incendios, con amplia experiencia en la coordinación con las Autoridades locales (Civil Defense, servicios de emergencia, etc.). Entre las responsabili-

dades del Asesor estaba la revisión del diseño de los cuartos técnicos durante el proyecto conceptual para informar de los aspectos normativos locales que fuera necesario considerar.

La experiencia fue realmente positiva, ya que tanto el Asesor como el Responsable de Seguridad del proyecto trabajaron conjuntamente y detectaron puntos críticos que obligaban a realizar modificaciones en el diseño preliminar planteado.

Es importante señalar la importancia de esta etapa del proceso de diseño, ya que siempre es preferible realizar los cambios en las etapas iniciales del proyecto, cuando las consecuencias no son importantes.

A continuación, se muestran todos los temas que se detectaron como consecuencia del cumplimiento de la normativa internacional, que tal y como ya hemos adelantado, difiere bastante de la normativa española.

2.6.1. Clasificación del edificio

La clasificación del edificio es un punto fundamental puesto que la normativa prescribe requisitos distintos para cada tipo. También es importante tener claro el número de ocupantes que va a tener el edificio a la hora de clasificarlo. En nuestro caso particular, el edificio es de ocupación nula, ya que solo se prevé el acceso esporádico por parte del personal de mantenimiento.

Es mencionable que la NFPA 101 no contempla una clasificación clara para el caso de edificios técnicos. Lo más usual es que el Responsable de Seguridad frente incendios busque una que se asemeje lo más posible a nuestro caso, siendo una posible solución la consideración de almacén ("Store") con una carga de fuego de muy bajo nivel de riesgo.

Sin embargo, en el ejemplo que estamos presentando, la clasificación se realizaba según la norma IBC, International Building Code, y en este caso sí que existe un tipo específico para nuestro caso que es el grupo U dedicado para "UTILITY AND MISCELLANEOUS".

Conforme a la IBC, sección 312, se utilizará esta clasificación para cualquier tipo de edificio o estructura de carácter accesorio que no pueda ser clasificado bajo las ocupaciones indicadas en otros capítulos.

Para el caso particular de la sala de comunicaciones, el Asesor indicó que, en base a su experiencia con Civil Defense, debía ser clasificada como ocupación BUSINESS.

Según la IBC, sección 304, la ocupación tipo Business se dedica a servicios profesionales incluyendo el almacenaje de históricos y cuentas. Posiblemente el Asesor tomó esta decisión debido a que en la sala de comunicaciones se disponía de los servidores de control del edificio y los archivos con datos del túnel.

2.6.2. Sectorización de incendios

Uno de los principales temas que se detectaron en esta etapa era que el edificio técnico tenía una clasificación distinta a la del túnel y esto tenía una consecuencia directa en la definición de la sectorización de incendios.

Según NFPA 1, capítulo 6.1.14.4.1 y NFPA 101 capítulo 6.1.14.4:

"Where separated occupancies are provided, each part of the building comprising a distinct occupancy (…) shall be completely separated from other occupancies by fire-barriers"

Es decir, el edificio técnico debía considerarse un sector de incendios diferenciado del túnel y por tanto no podía realizarse ningún tipo de apertura entre los cuartos y el túnel, siendo precisa su sectorización con paredes de resistencia al fuego mínima de 2 horas.

La sala más afectada era la del grupo electrógeno, ya que se había previsto su ventilación directamente al túnel, pero ahora debía diseñarse su ventilación con un sistema independiente.

Para ello se diseñaron dos patinillos dentro de la sala del grupo electrógeno que conectaban de manera directa con la superficie. Uno era para la entrada de aire limpio y otro para la extracción del aire caliente, al cual se conectaba el grupo.

También se diseñó otro patinillo para la salida de la chimenea del grupo electrógeno, que debía sobresalir 2.5m desde el nivel de superficie. El arquitecto consiguió integrar muy bien este patinillo en la urbanización para que el impacto visual fuera lo menor posible.

En la Figura 9 se muestra la conexión del grupo electrógeno al patinillo de extracción de aire.

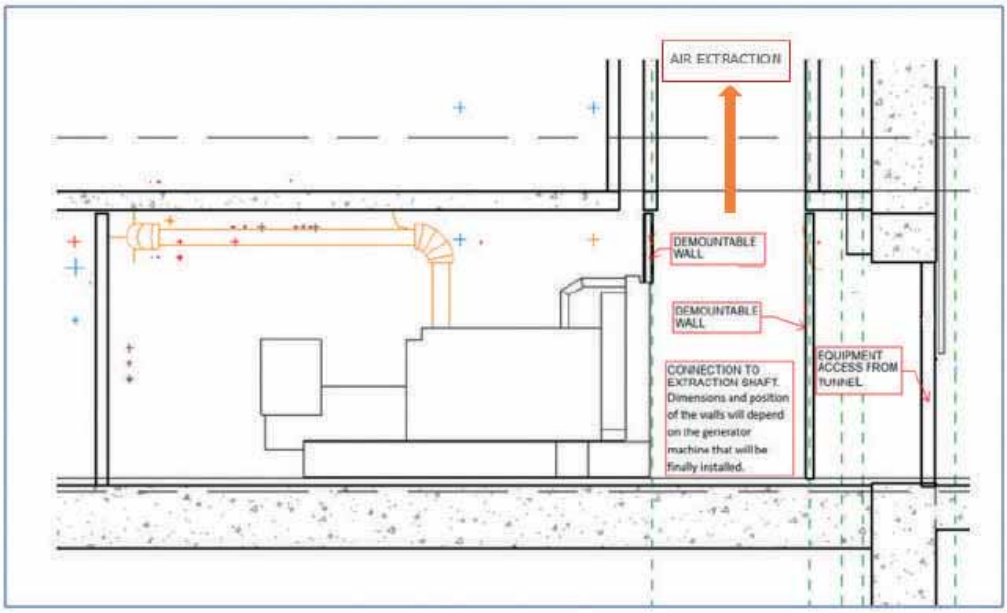


Figura 9: Ventilación del grupo electrógeno

2.6.3. Cumplimiento de la normativa NFPA 110

La norma NFPA 110, Standard for Emergency and standby Power Systems, aplica directamente al diseño de los sistemas de emergencia y es de obligado cumplimiento al estar citada de manera expresa en la NFPA 502, que es la norma que deben cumplir los túneles.

Hay varios capítulos de esta norma que afectan de manera significativa al diseño de la sala del grupo electrógeno, por lo que me parece muy interesante citarlos de manera detallada.

Capítulo 4.4 Level

En este capítulo se clasifica el nivel del sistema de emergencia. En nuestro caso se trata de un "Level 1" por tratarse de un sistema instalado en un lugar donde el fallo del equipo podría resultar en pérdidas de vidas humanas o heridos graves.

Capítulo 7.2 Location

En este capítulo se especifican los requerimientos de la sala del grupo electrógeno:

- 7.2.1: La sala donde se ubica el grupo electrógeno debe ser exclusiva. Estará sectorizada con respecto al resto del edificio por paredes de 2h de resistencia al fuego. Se permite la instalación en esa misma sala de todo el equipamiento de emergencia.

- 7.2.3: Los equipos del sistema de emergencia Level 1 no pueden estar instalados en la misma sala que los equipos de suministro normal cuando el equipamiento tiene una clasificación de 150 voltios a tierra y sea igual o superior a 1000 amperios.
- 7.2.4: La localización de la sala del equipamiento de emergencia debe estar en lugar protegido de las inundaciones.

Es interesante tener en cuenta el apartado 7.2.3, pues la norma define como sistema de emergencia no sólo al grupo electrógeno, sino a todo el equipamiento de emergencia, incluyendo también los interruptores de protección de sobrecarga y los interruptores de transferencia. Por tanto, estos equipos no pueden disponerse en la misma sala eléctrica donde están los cuadros de suministro normal. Se precisa localizarlos en sala independiente o en la propia sala de grupo, tal y como se describe en el apartado 7.2.1.

De todos estos requisitos indicados, creo que el más crítico es el último en referencia a la protección contra las inundaciones. El Asesor fue muy claro en este aspecto: le preocupaba mucho el hecho de que la sala del grupo estuviera localizada en el nivel de rodadura del túnel urbano, a una profundidad de 15 m con respecto al nivel del suelo, siendo éste un punto bajo.

Sin embargo, en nuestro caso este tema estaba bien resuelto porque por otros motivos hidráulicos ya se había considerado el diseño de un tanque de tormentas en el túnel para la recogida de las aguas de lluvia de la superficie.

Aun así, es importante recalcar la importancia de este punto de la norma: si se necesita disponer el grupo electrógeno en un punto bajo es imprescindible justificar que esa localización está protegida contra las inundaciones.

Capítulo 7.7 Heating, cooling and ventilating

En este capítulo se especifican los requerimientos de ventilación de la sala del grupo electrógeno.

- 7.7.2: Indica los requerimientos del aire de combustión. La entrada y salida de aire se realizará de manera directa desde el exterior del edificio, bien con una apertura directa, bien con un patinillo de 2h de resistencia al fuego.
- 7.7.3: Indica los requerimientos del aire de ventilación que coinciden con los requisitos del aire de combustión citados antes.
- 7.7.4.1: el sistema de ventilación diseñado para el suministro de aire y descarga desde el radiador tendrá una restricción estática máxima de 125 Pa en el conducto de descarga a la salida del radiador

En relación con la ubicación de las tomas de aire de entrada y salida, ya se ha explicado en el apartado anterior cómo se realizó el diseño de los patinillos, cumpliendo con este apartado de la norma. Es interesante comentar que una de las dificultades que tuvo que resolver el arquitecto fue que la ubicación de las rejillas de entrada y salida en superficie debían situarse asegurando que la distancia entre ellas fuera como mínimo de 3m para cumplir con la normativa local. Se recomienda revisar las normativas locales en cada país sobre este asunto.

Sin embargo, de todos los requisitos indicados, el que más afectaba al diseño de ingeniería era la restricción de los 125 Pa máximo en la descarga.

Se trata de un valor muy limitado, superado enseguida debido a la profundidad a la que se encontraba el grupo y a la disposición de rejillas. Hay que tener también en cuenta que en ciertos países es preciso instalar rejillas atrapa-arenas en todas las entradas de aire en el edificio y esto ocasiona una pérdida de carga adicional bastante considerable.

Tras el cálculo de la pérdida de carga, se vio la necesidad de diseñar un sistema de ventilación forzada para la entrada de aire al grupo.

El nuevo sistema de ventilación forzada, incluyendo sus patinillos de entrada y salida, ocupaban espacio, por lo que debía ampliarse la sala del grupo. Se decidió utilizar el espacio previamente diseñado para el centro de transformación y ubicar éste en la planta superior.

Por tanto, la solución final de la sala del grupo electrógeno fue la siguiente:

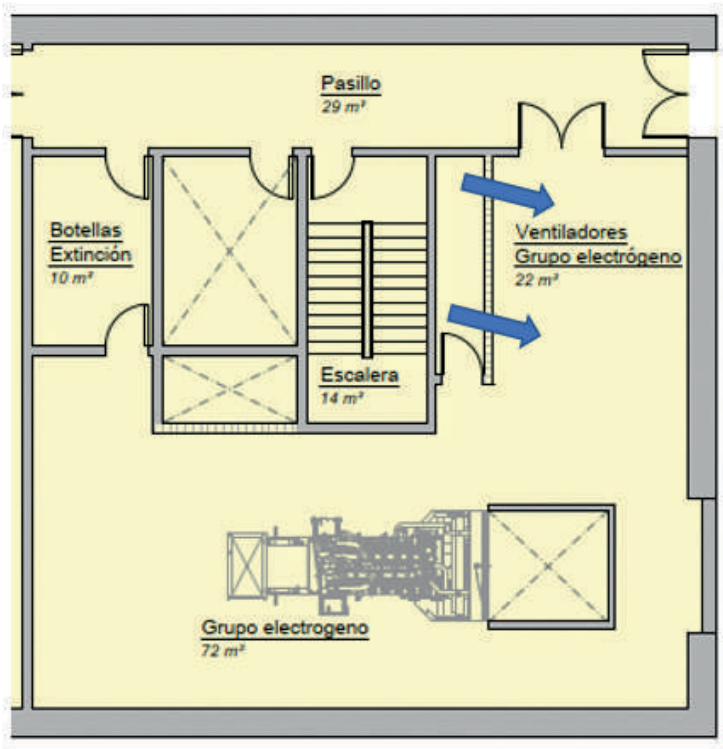


Figura 10: Nueva sala de ventiladores para el grupo electrógeno

2.6.4. Análisis de los recorridos de evacuación

El siguiente punto que analizó el ingeniero de fuego fue la verificación de las rutas de evacuación en cada una de las plantas. En este caso, la norma que aplica es la IFC, International Fire Code, en su capítulo 10, means of Egress.

Recordemos que se había tomado ya la decisión de disponer solo de una salida de emergencia para evitar impactos mayores sobre la superficie. Aplica por tanto la tabla 1006.2.1 donde se indica que el recorrido máximo permitido para Ocupaciones tipo U (Utilities) en las que solo hay una salida de emergencia será de 75 feet para edificios dotados con rociadores, es decir, 23 m.

Realizada la comprobación de los recorridos de evacuación se detectó que en la planta -1 no se cumplía esta distancia.

Lo primero que se revisó fue la posibilidad de reubicar la escalera de emergencia para que la distancia fuera de 23 m, o incluso la posibilidad de diseñar dos escaleras de emergencia, pero de nuevo los condicionantes exteriores de la urbanización no permitían el desarrollo de estas ideas.

Se continuó por tanto con la estrategia de una única salida de emergencia, pero no había más remedio que clasificar los pasillos de la planta -1 como "exit passageway" (pasillos de evacuación). Con esta solución, se podía extender la seguridad de la escalera de evacuación hacia la zona del pasillo y podía medirse el recorrido de evacuación desde cualquier punto interior de un cuarto técnico hasta la llegada a dicho pasillo.

Sin embargo, esta decisión tuvo consecuencias importantes para las instalaciones. A continuación, se explican con más detalle los requisitos que deben cumplirse para estos casos.

2.6.5. Requerimientos de un "EXIT PASSAGEWAY"

La existencia de pasillos con clasificación "exit passageway" tiene implicaciones importantes sobre el diseño. Veamos lo que indica la normativa al respecto:

- NFPA 101, capítulos 7.1 y 7.2.6.

  El exit passageway debe estar completamente compartimentado del resto del edificio dotando a todos los elementos que lo envuelven (techo, paredes y suelo) de una resistencia al fuego de 2 horas.

- IFC 1024.1, General.

  El exit passageway no debe ser usado para ningún otro propósito que no sea la evacuación

- IFC 1024.6, Penetrations.

  Está totalmente prohibida la entrada de cualquier instalación dentro del exit passageway a no ser que sean los sistemas propios de seguridad tales como sistema de presurización, sistema de incendio o sistema de comunicaciones para bomberos.

- IFC 1024.7, Ventilation

  El sistema de ventilación del exit passageway será independiente de cualquier otro sistema de ventilación. El equipamiento y sus conductos deberán estar separados de cualquier otro sistema de ventilación del edificio.

Como resumen, el pasillo de la planta -1 solo podía considerarse para uso de evacuación y por tanto no podía utilizarse para llevar ningún tipo de instalación desde los cuartos técnicos hasta el túnel.

Esta limitación fue comunicada a todos los ingenieros del proyecto. La disciplina más perjudicada fue la eléctrica porque recordemos que justo en la planta -1 se habían dispuesto todos los cuartos eléctricos para facilitar su entrada a la parte superior del hastial del túnel. Tuvieron que rediseñarse las rutas de las bandejas eléctricas para evitar el paso por el pasillo protegido.

La disciplina de ventilación también quedaba afectada porque los conductos de ventilación de los recintos técnicos iban instalados en ese pasillo. En este caso no había manera de encontrar una ruta alternativa, por lo que la decisión final que se coordinó con los arquitectos fue instalar los conductos por la parte superior del pasillo y realizar a posteriori un techo resistente al fuego por debajo a ellos, que diera la protección de 2 horas al pasillo de evacuación.

2.6.6. Acceso al cuarto de bombas de incendios

La norma NFPA 20 especifica cómo debe realizarse el acceso a la sala de bombas de incendios situada en planta inferior:

- NFPA 20, artículo 4.14.2.1.1

  El acceso debe realizarse de manera directa desde el exterior, y si no es así, entonces se realizará a través de una escalera y pasillo resistentes al fuego. Además, el camino de acceso no será afectado por el fuego que está protegiendo el equipo de bombeo.

El Asesor de incendios explicó que uno de los temas que más importaba a Civil Defense era la protección de los Servicios de Emergencia durante su acceso a la sala de bombas.

En nuestro caso particular, se daba además la circunstancia de que la sala estaba en el punto más bajo del edificio técnico, en la planta -2 a unos 15m de profundidad. Así que el Asesor solicitó medidas extras de seguridad para asegurar la protección de los Servicios de Emergencia.

Por tanto, la decisión final por parte de los Responsables de Seguridad frente incendios del edificio fue que la escalera de evacuación y el pasillo de acceso hasta la sala de bombas de incendios en planta -2 se considerara como "smokeproof", es decir, espacio protegido contra el humo.

Asímismo, el Responsable de Seguridad también decidió que el pasillo de la planta -1 fuera considerado "smokeproof" y se protegiera también frente a la entrada del humo.

2.6.7. Requerimientos de un "SMOKEPROOF"

Los condicionantes del smokeproof vienen indicados en esta norma:

- IFC 909.20 smokeproof enclosures

  El pasillo requiere una ventilación independiente, bien por sistema natural, sistema mecánico o sistema de presurización.

En nuestro caso particular, se optó por la opción de presurización ya que era la que menos impacto tenía sobre la urbanización, pues solo precisaba la ubicación de un patinillo de entrada de aire en lugar de los dos necesarios en el caso de la ventilación natural. Recordemos las dificultades que había en el proyecto para ubicar elementos en el exterior y más con el condicionante de que las rejillas de toma de aire y de expulsión deben estar a una distancia de 3m como mínimo entre sí.

Por tanto, el proyecto precisaba de un sistema de presurización para:

- La escalera de evacuación, para proteger el acceso al servicio de Bomberos.
- El pasillo de planta -2, que se había considerado como "exit passageway smokeproof" para proteger el acceso a los bomberos hasta la sala de bombas.
- El pasillo de planta -1, que se había considerado también como "exit passageway smokeproof" para extender la seguridad de la escalera de evacuación hacia la zona del pasillo.

Fue preciso diseñar un nuevo cuarto en la planta -1 para el sistema de presurización dotado de una entrada de aire directa desde el exterior y exclusiva para este sistema, cumpliendo así con la normativa. Véase Figura 11 con la solución.

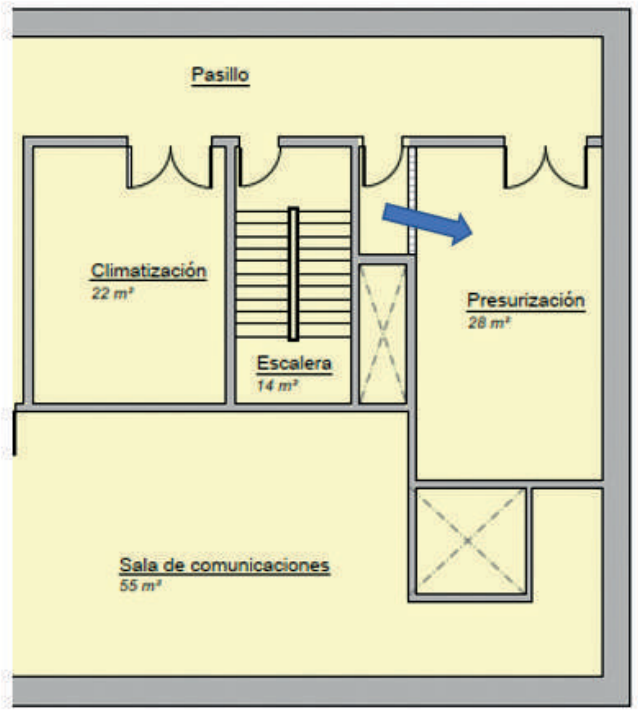


Figura 11: Nueva sala de presurización para los cuartos técnicos

2.6.8. Requerimientos del depósito de gasóleo

Otro tema que se consultó con el Responsable de Seguridad era si había algún requerimiento especial para la ubicación del depósito de gasóleo que iba al lado del grupo electrógeno.

Revisada la normativa local al respecto, se comprobó que sólo se permitía disponer en el interior de los edificios de un volumen almacenado máximo de gasóleo de 2.498 L.

Este condicionante fue comunicado a los ingenieros eléctricos que tuvieron que revisar los cálculos eléctricos para comprobar que con ese volumen de combustible se podía garantizar el suministro de todos los servicios críticos del túnel en el tiempo establecido de 8 horas.

2.7. Coordinación entre disciplinas y resolución de conflictos

La siguiente fase en la metodología de diseño de cuartos técnicos es realizar la coordinación con otras disciplinas y especialmente con el departamento de estructuras ya que sus diseños también pueden condicionar mucho la solución final.

Se citan a continuación algunos temas que fueron coordinados con ellos:

- Definición preliminar del tamaño de los pilares y su disposición en planta, para ver si afectaban en algún modo al tamaño de los cuartos y a la ubicación de los equipos
- Posición más idónea de los patinillos y huecos en losa. Más de una vez los compañeros de estructuras asesoraron sobre la reubicación de huecos para que estuvieran en zonas más adecuadas desde un punto de vista estructural.
- Coordinación del sistema de saneamiento enterrado, buscando soluciones que faciliten modificaciones futuras y sean compatibles con la cimentación del edificio.

2.8. Solución definitiva para la implantación de los cuartos técnicos

Ha llegado la fase última de la metodología de diseño de los cuartos técnicos. Una vez que ya se ha terminado de analizar todos los condicionantes funcionales y normativos y se ha coordinado con otras disciplinas, podemos dar por buena la implantación de cuartos técnicos planteada.

En el caso que estamos explicando, habrá podido observarse que el número de cuartos técnicos que finalmente se necesitaba fue bastante superior al inicialmente planteado. En la Figura 12 se muestra la lista definitiva de cuartos, que finalmente fueron 12 en lugar de los 6 originales, con una superficie total de 527 m^2.

Nº	Cuarto técnico Technical room	Superficie (m2) Surface	Largo (m) Lenght	Ancho (m) Width
1	Depósito agua contra incendios (Fire Water Tank)	50	14	3,5
2	Equipo bombas contra incendios (Fire Fighting Pump)	126	14	9
3	Subestación eléctrica (Electrical Substation)	40	8	5
4	Grupo electrógeno (Diesel Generator Set)	72	13	5,5
5	Sala de cuadros eléctricos (Power Room)	66	12	5,5
6	Cuarto de comunicaciones y central de detección incendios (Communications room and fire detection panel)	55	10	5,5
7	Escalera de evacuación	14	5,5	2,5
8	Ventilación grupo electrógeno (Ventilation Diesel generator)	22	5,5	4
9	Cuarto para UPS (UPS Room)	22	5,5	4
10	Cuarto Presurización escalera y pasillos (Presurization Room)	28	7	4
11	Cuarto Climatización (AC room)	22	5,5	4
12	Botellas extinción gas (Fire Fighting Gas extinguisher)	10	4	2,5

Figura 12: Listado definitivo de cuartos técnicos para el Túnel

Además, en las Figuras 13 y 14 se presenta la solución definitiva de cuartos técnicos para cada una de las plantas.

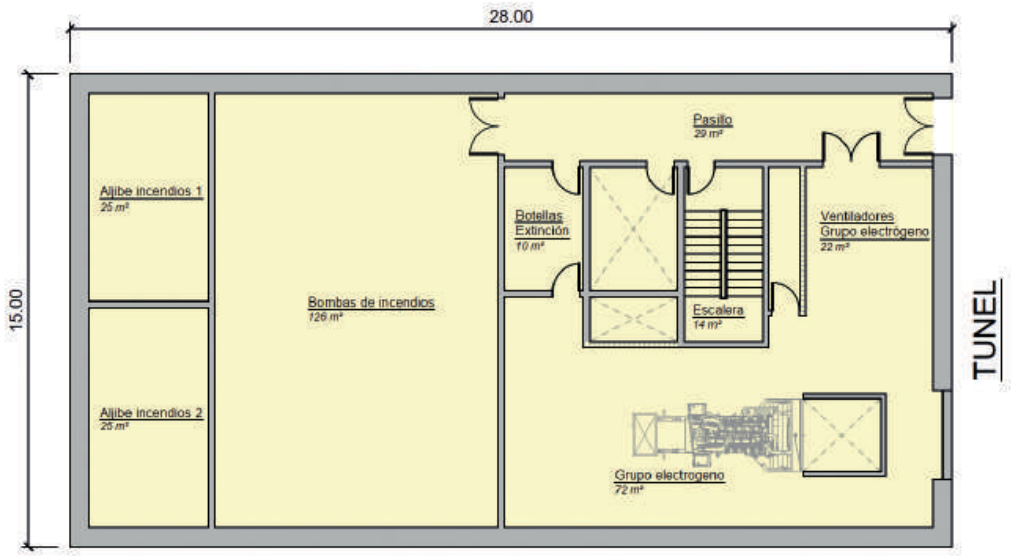


Figura 13: Solución arquitectónica para planta -2

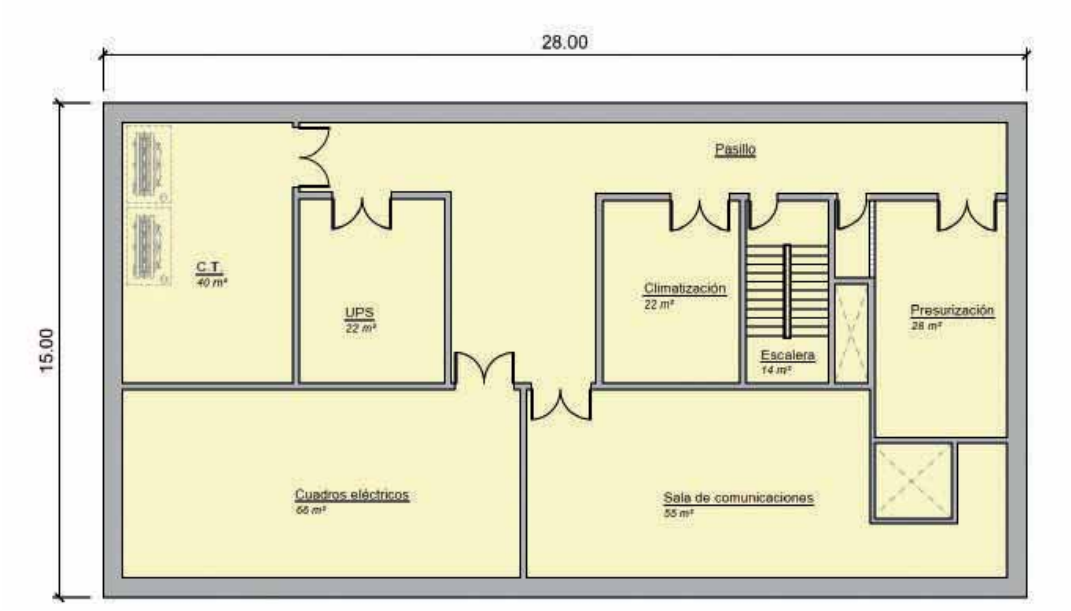


Figura 14: Solución arquitectónica para planta -1

3. CONCLUSION

Una vez terminada esta presentación, llega el momento de concluir con algunas recomendaciones que puedan servir para los futuros diseños de cuartos técnicos de un túnel urbano:

1) El requisito inicial que hubo en este proyecto de no disponer de ningún elemento en la superficie fue demasiado condicionante y obligó a desarrollar soluciones que impactaron mucho en el diseño posterior de las instalaciones. Es aconsejable buscar propuestas más equilibradas, de modo que el cliente pueda aceptar la ubicación de ciertos elementos en el exterior, aunque tengan un impacto visual, pero que darán lugar a soluciones de ingeniería más eficientes.

2) Es importante analizar con antelación si la ubicación de una sola escalera de evacuación puede dar lugar a restricciones en los pasillos técnicos y tratar de evitarlo buscando soluciones alternativas.

3) Verificar que la sala del Grupo Electrógeno esté localizada en un punto sin riesgo de inundaciones.

4) Contar desde un principio con la colaboración de Asesores locales que conozcan los requisitos "no escritos" que van a solicitar los Departamentos de Seguridad (llamados Civil Defense) del país donde se encuentra el túnel.

5) Incluir dentro del equipo multidisciplinar de diseño, y siempre en las primeras etapas del desarrollo del proyecto, al equipo de arquitectura, al ingeniero integrador y al responsable de seguridad frente a incendio, con experiencia y conocimiento suficiente de la normativa internacional.

ADAPTACIÓN DE LOS TÚNELES DE BELATE Y ALMANDOZ
LA DIRECTIVA EUROPEA 2004/54

Benjamín Celada Tamames
Gerente General
GEOCONTROL, S.A.
Ignacio Sainz de los Terreros Goñi
Administrador
SERTECNA, S.A.

Los Túneles de Belate y Almandoz, que forman parte de la carretera N-121-A entre Pamplona y Behobia, entraron en servicio en noviembre de 1997.

En los 25 años transcurridos desde su inauguración no se ha producido en ellos ninguna víctima mortal; debido, en buena parte, a los trabajos realizados por el Gobierno de Navarra para mantener la funcionalidad de estos túneles con un nivel razonable de seguridad, a pesar de que la intensidad de circulación actual se ha triplicado desde su puesta en servicio.

En 2020 se inició el proyecto para desdoblar estos túneles, con objeto de adaptarlos a lo dispuesto en la Directiva Comunitaria 2004/54/CE.

Está previsto que las obras para desdoblar estos túneles, con un presupuesto de 175,8 M€, se inicien en 2023.

ADAPTATION OF THE BELATE AND ALMANDOZ TUNNELS. THE EUROPEAN DIRECTIVE 2004/54

The Belate and Almandoz tunnels, which form part of the N-121-A road between Pamplona and Behobia, came into service in November 1997.

In the 25 years since their inauguration, no fatalities have occurred in these tunnels, largely due to the work carried out by the Government of Navarre to maintain the functionality of these tunnels with a reasonable level of safety, despite the fact that the current traffic intensity has tripled since their entry into service.

In 2020, work began on the project to twin these tunnels in order to adapt them to the provisions of Community Directive 2004/54/EC.

The work to twin these tunnels, with a budget of €175.8 million, is scheduled to start in 2023.

ADAPTATION DES TUNNELS DE BELATE ET D'ALMANDOZ. LA DIRECTIVE EUROPÉENNE 2004/54

Les Tunnels de Belate et d'Almandoz, qui font partie de la route N-121-A entre Pamplona et Behobia, ont été mis en service en novembre 1997.

Au cours des 25 années qui ont suivi leur inauguration, aucun décès n'est survenu dans ces tunnels, en grande partie grâce aux travaux réalisés par le Gouvernement de Navarre pour maintenir la fonctionnalité de ces tunnels avec un niveau de sécurité raisonnable, malgré le fait que l'intensité du trafic actuel ait triplé depuis leur mise en service.

En 2020, les travaux ont commencé sur le projet de doublement de ces tunnels afin de les adapter aux dispositions de la Directive Communautaire 2004/54/CE.

Les travaux de doublement de ces tunnels, dotés d'un budget de 175,8 millions d'euros, devraient commencer en 2023.

1. INTRODUCCIÓN

Los túneles de Belate y Almandoz forman parte de la N-121-A, que une Pamplona con Behobia. El primero tiene una longitud de 2.960 m y la del segundo es de 1.220 m; ambos disponen de dos carriles para circulación bidireccional.

Estos túneles fueron inaugurados el 29 de noviembre de 1997, tras cuatro años de obras; por lo cual, en la actualidad, tienen una antigüedad de 25 años.

En la Fotografía 1.a se muestra una vista del interior del Túnel de Belate.

Fotografía 1.a. Túnel de Belate.

Ambos túneles disponen de dos carriles de circulación, con un gálibo vertical de 4,7 m y una mediana central de 1 m; tal como se muestra en la Figura 1.b.

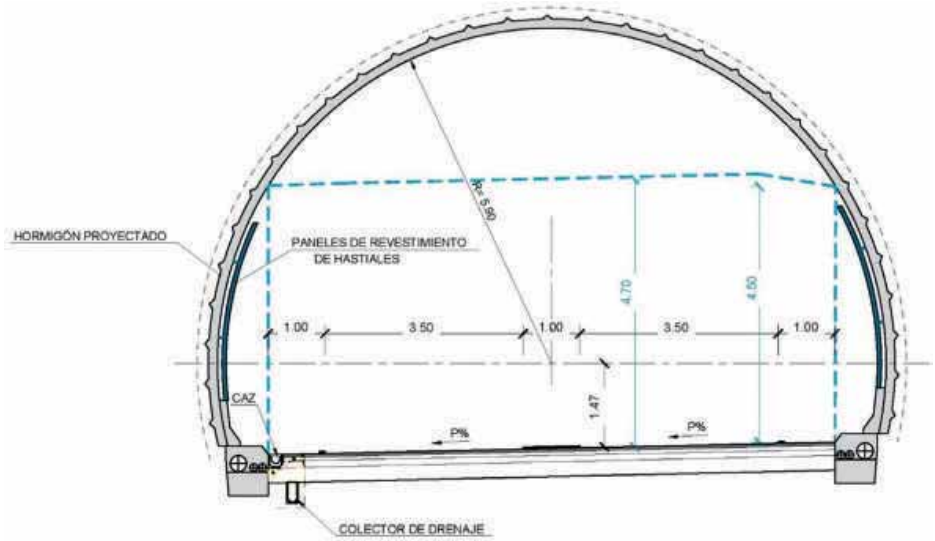


Figura 1.b. Sección funcional del Túnel de Belate.

Además de los dos carriles y la mediana central, los túneles tienen dos arcenes de 1 m de ancho; por lo cual la anchura de la calzada es de 10 m.

La ventilación de ambos túneles es longitudinal y ninguno de los dos tiene salidas de emergencia; pero el Túnel de Belate dispone de seis apartaderos y el de Almandoz dispone de dos. La pendiente del Túnel de Belate es de 2,2% y la del de Almandoz del 2,7%.

En la actualidad, la IMD de ambos túneles es de unos 8.500 vehículos/día; de los cuales, aproximadamente, el 30% son vehículos pesados.

Los Túneles de Belate y Almandoz están conectados por fibra óptica con el Centro de Control de Conservación de Carreteras del Gobierno de Navarra, que está ubicado en Pamplona.

Las instalaciones de los dos túneles no están de acuerdo con lo dispuesto en la Directiva Europea 635/2006 y en el año 2020 se adjudicó el proyecto para su desdoblamiento y adecuación a la normativa vigente.

Se espera que las obras para el desdoblamiento de los Túneles de Belate y Almandoz sean adjudicadas al inicio de 2023, para lo cual se cuenta con un presupuesto de 175,8 M€; que tiene el siguiente desglose:

- Duplicación Túnel Belate 90,4 M€
- Duplicación Túnel Almandoz 43,3 M€
- Tramo entre túneles 19,5 M€
- Reacondicionamiento de los Túneles de Belate y Almandoz 22,6 M€

En este trabajo se hace una síntesis de las experiencias habidas durante los 25 años de vida de las Túneles de Belate y Almandoz y se presentan las características principales del Proyecto para su desdoblamiento.

2. EXPERIENCIAS DURANTE LOS 25 AÑOS DE EXPLOTACIÓN

Los Túneles de Belate y Almandoz han vivido con intensidad los 25 años transcurridos desde su explotación; que puede caracterizarse por los importantes esfuerzos dedicados por el Gobierno de Navarra para mejorar su funcionalidad, a fin de hacer frente al importante aumento de su IMD. Cuando se inauguraron los túneles en 1997 su IMD no llegaba a 3.000 vehículos/día y, a pesar de que esta cifra se ha casi triplicado en la actualidad, en estos túneles no se ha producido ninguna víctima mortal.

Las mejoras de la funcionalidad de estos túneles se han concentrado en reparaciones en su estructura y en el control de la circulación; tal como se expone en los apartados siguientes.

2.1. Mejora en la estructura de los túneles

Los Túneles de Belate y Almandoz fueron construidos según los principios del Nuevo Método Austríaco, en una época en que el hormigón se proyectaba por vía seca; lo cual generaba importantes problemas en la calidad del hormigón proyectado y en el control de su ejecución.

Las reparaciones de la estructura de estos túneles se han concentrado en el Túnel de Belate; pues en el de Almandoz prácticamente no se ha producido ninguna, lo cual es debido a que el Túnel de Almandoz se excavó en terrenos de calidad bastante mejor que la de los excavados en el Túnel de Belate.

En el Túnel de Belate los primeros problemas estructurales empezaron pocos meses antes de su inauguración, cuando fue necesario reforzar el hormigón proyectado en un tramo y construir en otro una solera de hormigón.

En 1999 Geocontrol fue contratado por el Servicio de Conservación de Caminos del Gobierno de Navarra para inspeccionar el Túnel de Belate y definir las medidas de refuerzo necesarias; lo cual originó que en el verano de 2001 se construyera una contrabóveda en un tramo de 295 m de longitud, que ha sido la reparación más importante que se han efectuado en el Túnel de Belate.

En los veranos de 2006 y 2007 se reforzaron los paramentos del túnel tras producirse el desprendimiento que se muestra en la Fotografía 2.1.a.

Figura 2.1.a. Desprendimiento ocurrido el 6 de julio de 2006.

A partir de 2007 el Servicio de Conservación de Caminos del Gobierno de Navarra está realizando inspecciones periódicas sobre el estado del túnel, a las que siguen las reparaciones puntuales necesarias.

En la Figura 2.1.b se presentan las reparaciones más importantes que se han realizado en el Túnel de Belate; que se concentran en el tramo de pizarras negras, en el tramo de mayor recubrimiento del Túnel.

2.2. Incidencias durante la explotación del túnel de belate

En los apartados siguientes se comentan los aspectos relacionados con la Seguridad de los Túneles de Belate y Almandoz.

2.2.1. Normativa de Seguridad aplicable

En la actualidad la definición de los elementos de seguridad que debe incluir un túnel de la Red Transeuropea se deriva de la Directiva Europea 2004/54/CE; que ha sido traspuesta para España por el Real Decreto 635/2006, consolidado en 2009, que concierne a los túneles con más de 500 m de longitud.

La Directiva Europea 2004/54/CE fue promulgada tras tres grandes incendios en túneles europeos; cuyas características se indican en la Tabla 2.2.1.a.

Tabla 2.2.1.a. Incendios en los túneles de Mont Blanca, Tauren y San Gotardo.

Túnel	Puesta en servicio	Ubicación	Longitud (Km)	Tráfico	Año del incendio	Víctimas mortales
Mont Blanc	1965	Francia/Italia	11,6	Bidireccional	1999	39
Tauern	1975	Austria	6,5	Bidireccional	1999	12
San Gotardo	1980	Suiza	16,9	Bidireccional	2001	11

Cuando se promulgó la Directiva 2004/54/CE los Túneles de Belate, que llevaban cinco años funcionando, no cumplían las exigencias de esta Directiva; particularmente en lo relativo a las salidas de emergencia, que se exigían cada 500 m.

Para adoptar los Túneles de Belate y Almandoz a las nuevas exigencias, la Unión Europea dio un plazo que expiró el 1 de mayo de 2019; por lo cual desde hace tres años los Túneles de Belate y Almandoz se encuentran en situación irregular.

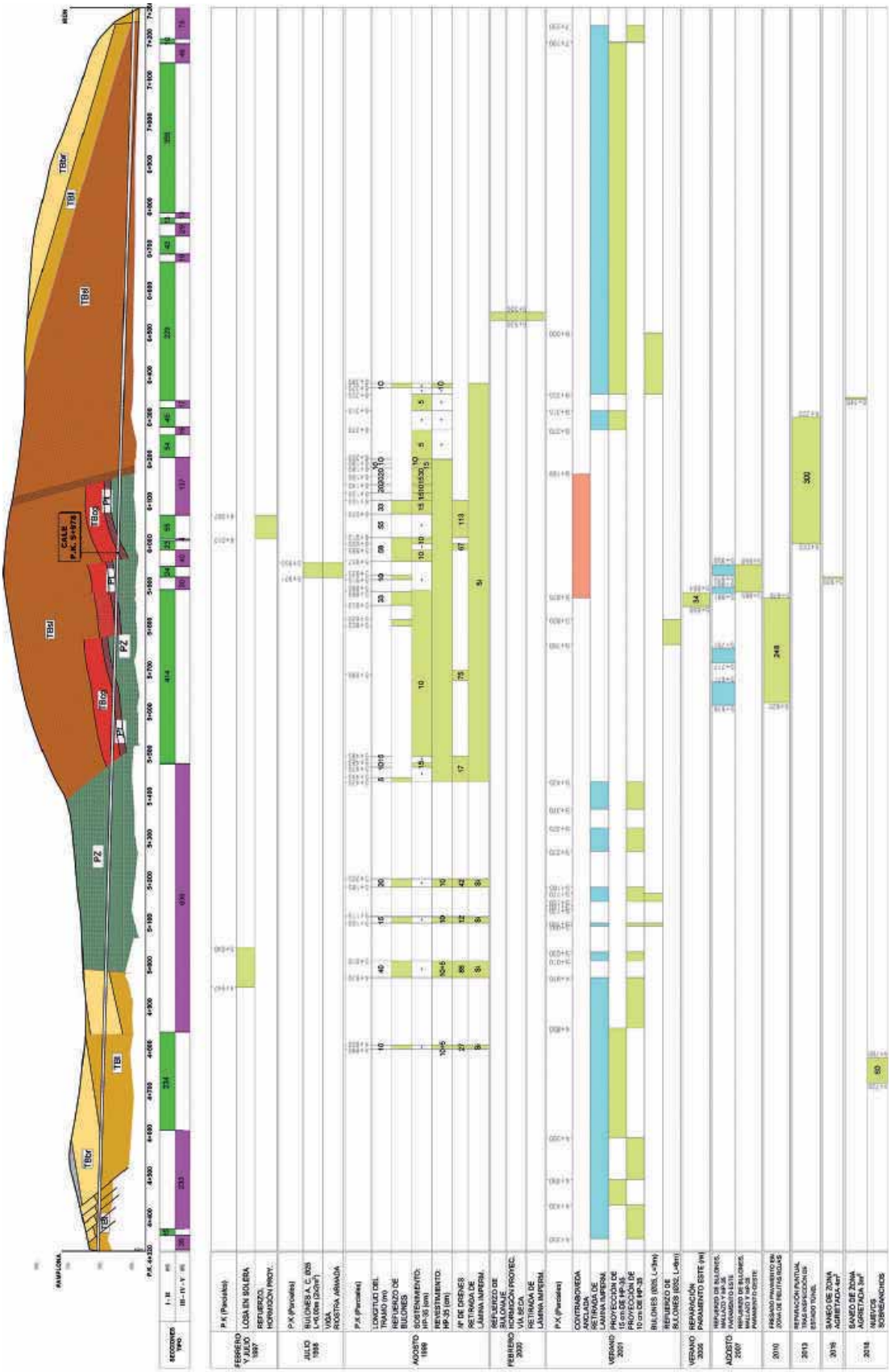


Figura 2.1.b. Reparaciones realizadas en el Túnel de Belate

2.2.2. Experiencias a lo largo de los 25 años de explotación de los Túneles de Belate y Almandoz

Una característica relevante de los 25 años de explotación de los Túneles de Belate y Almandoz es que en el cuarto de siglo transcurrido desde la inauguración de estos túneles en ellos no se ha producido ninguna víctima mortal; a pesar de que, en este período, se han incendiado dos camiones en ellos.

Como dato anecdótico hay que señalar que el 9 de mayo de 2013, la niña Aiala Juanotena nació en un coche, que se había detenido en el portal Sur del Túnel de Belate.

Por lo que se refiere a los dos incendios mencionados, el más importante fue el ocurrido el 8 de julio de 2011 dentro del Túnel de Belate; que no produjo víctimas, pero que supuso el cierre del túnel durante dos meses para realizar reparaciones en las instalaciones por importe de unos

700.000 €.

El incendio en el Túnel de Almandoz, producido el 28 de junio de 2019, tuvo mucha menos importancia; pues se produjo en la salida del Túnel por el portal Sur.

La baja siniestralidad de los Túneles de Belate y Almandoz debe atribuirse a los esfuerzos realizados por el Gobierno de Navarra para mantener las condiciones del tráfico en estos túneles en unos niveles razonables de seguridad.

Hay que destacar que en el año 2002 se inauguró un Centro de Control específico para estos dos túneles y que el 31 de enero de 2007 entró en vigor el "Plan de emergencia para túneles de la red de carreteras de Navarra".

También es reseñable que los Túneles de Belate y Almandoz cuentan con un vigilante 24 horas al día y 7 días a la semana; que realiza la como primera intervención en caso de accidente.

3. ADAPTACIÓN A LA DIRECTIVA COMUNITARIA 2004/57

En diciembre de 2020 el Gobierno de Navarra contrató a las empresas SERTECNA y GEOCONTROL la redacción del Proyecto de Trazado y del Proyecto de Construcción para el desdoblamiento de los Túneles de Belate y Almandoz; que, tal como se presenta en los apartados siguientes, también incluía la adecuación de los túneles actuales.

3.1. Desdoblamiento de los túneles de belate y almandoz

A continuación se sintetizan los aspectos más relevantes del desdoblamiento de los Túneles de Belate y Almandoz.

3.1.1. Túnel de Belate

En el desdoblamiento del Túnel de Belate se consideró prioritario minimizar la longitud del tramo a excavar en las pizarras negras, en el centro del túnel, que fueron el origen de los problemas más graves que experimentó la estructura de este túnel.

A tal efecto; fue necesario armonizar la importante información disponible sobre los terrenos a excavar, que tenía orígenes muy variados:

- Proyecto inicial del Túnel de Belate.
- Construcción del Túnel de Belate.

- Reparación del Túnel de Belate.
- Reconocimientos previos del proyecto de desdoblamiento.

Como resultado de esta armonización se obtuvo el modelo geológico del entorno de los dos Túneles de Belate, que se incluyó como un modelo federado en el modelo BIM del proyecto.

En la Figura 3.1.1.a se presenta una vista del terreno a excavar, obtenida a partir del modelo geológico federado.

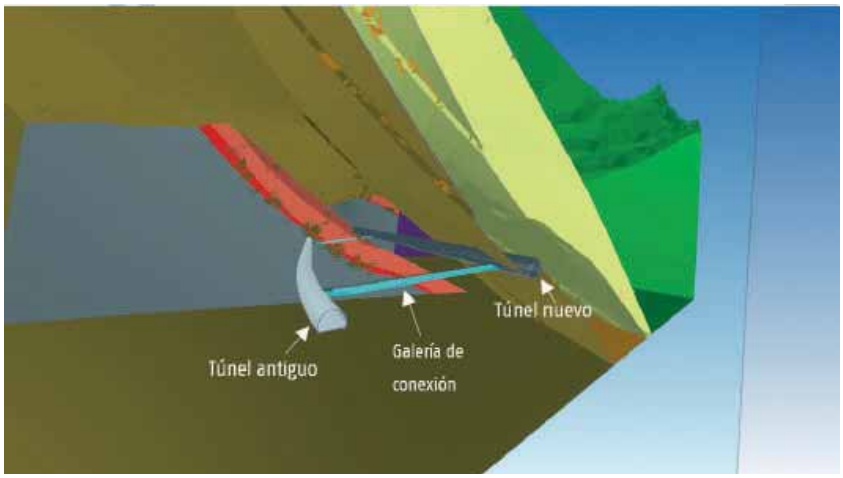


Figura 3.1.1.a. Modelo geológico de los Túneles de Belate.

Una vez confeccionado el modelo geológico se encajó el trazado del nuevo túnel, cuya disposición en planta se muestra en la Figura 3.1.1.b.

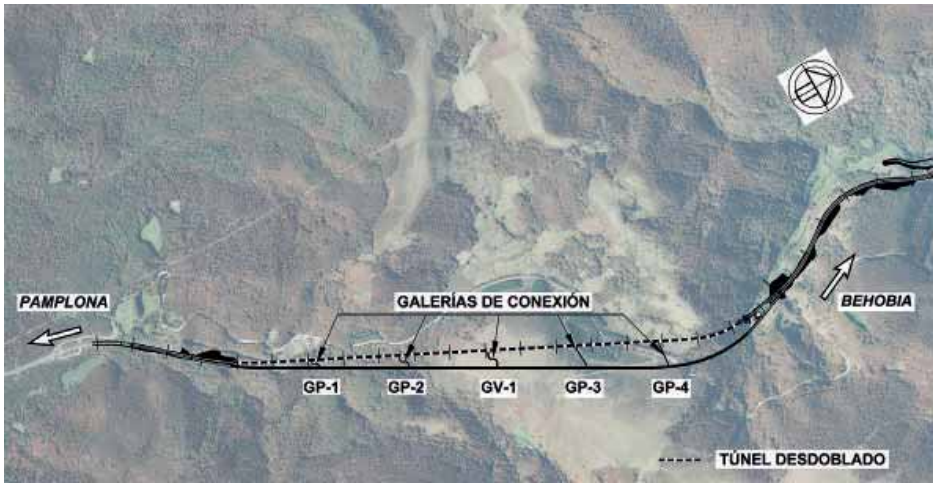


Figura 3.1.1.b. Trazado del Túnel de Belate desdoblado.

El nuevo túnel se sitúa al oeste del túnel actual y se dedicará al tráfico hacia Pamplona; entre ellos se han previsto cinco galerías de conexión, cuatro peatonales y una vehicular.

La longitud del nuevo túnel será de 2.863 m y su pendiente media del 2,6%. En la Figura 3.1.1.c se presenta la sección funcional del nuevo Túnel de Belate; que presenta notables mejoras respecto a la actual.

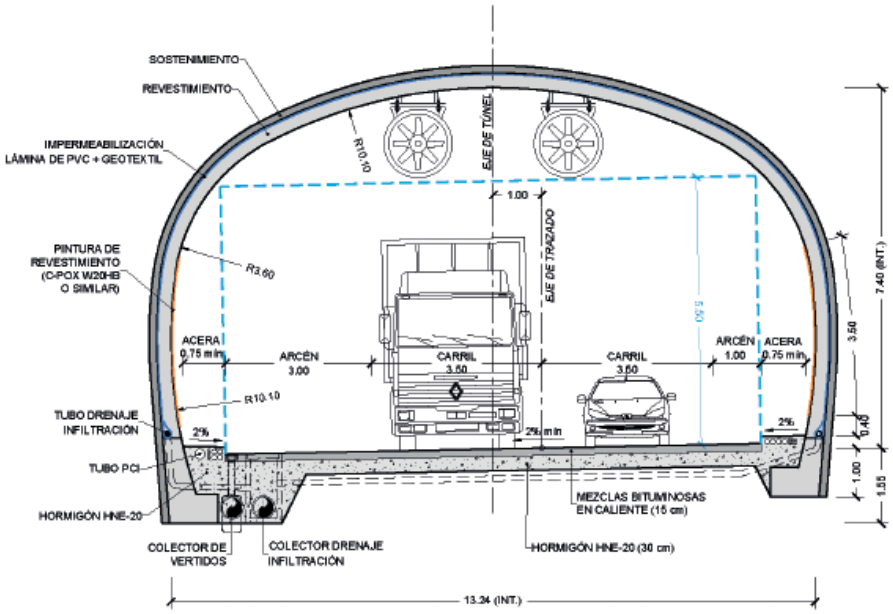


Figura 3.1.1.c. Sección funcional del nuevo Túnel de Belate.

El gálibo vertical del nuevo túnel es de 5,5 m, frente a los 4,7 m del túnel actual.

En cuanto a la calzada se mantienen los dos carriles de 3,5 m, que ahora serán unidireccionales, y el arcén a la izquierda de 1 m; la mediana central desaparece y el arcén a la derecha pasa a tener una anchura de 3 m; lo cual equivale a disponer de un apartadero continuo a lo largo del todo el túnel. Esta solución, que ya se ha aplicado en el Túnel de María de Molina en Madrid, supone aumentar la anchura de la calzada; lo cual es favorable para aumentar la seguridad de los túneles, Celada et alt. (2001).

En la Fotografía 3.1.1.d se muestra una vista del arcén ampliado del Túnel de María de Molina.

Fotografía 3.1.1.d. Arcén ampliado del Túnel de María de Molina (Madrid).

3.1.2. Túnel de Almandoz

Para proyectar el Túnel de Almandoz desdoblado se ha mantenido el mismo criterio aplicado en el desdoblamiento del Túnel de Belate; de tal forma que, tal como se muestra en la

Figura 3.1.2.a, el nuevo túnel se construirá al Oeste del actual.

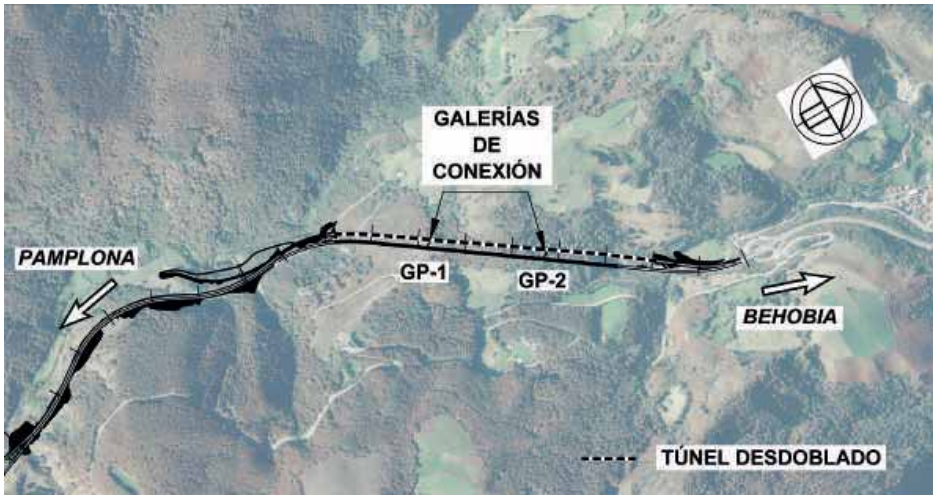


Figura 3.1.2.a. Planta de los Túneles de Almandoz.

Con el trazado adoptado el nuevo Túnel de Almandoz pasa a tener una longitud de 1.342 m; por lo cual se construirán dos galerías peatonales para conectarlo con el actual. La pendiente media del nuevo Túnel de Almandoz será del 2,4%.

Dado que los Túneles de Belate y Almandoz distan entre sí unos algo menos de 2 Km, se ha adoptado para el nuevo Túnel de Almandoz la misma sección funcional que la del Túnel de Belate; con objeto de no introducir variables que pudieran perturbar el comportamiento de los conductores.

3.2. Acondicionamiento de los túneles actuales

El acondicionamiento de los túneles actuales se iniciará, una vez entren en servicio los nuevos túneles de Belate y Almandoz, retirando las instalaciones y el revestimiento, constituido por placas de hormigón y chapas metálicas.

A continuación se sanearan las posibles zonas agrietadas, que ahora no son visibles, y se ejecutará un anillo de hormigón para conseguir la sección funcional que se muestra en la Figura 3.2.a.

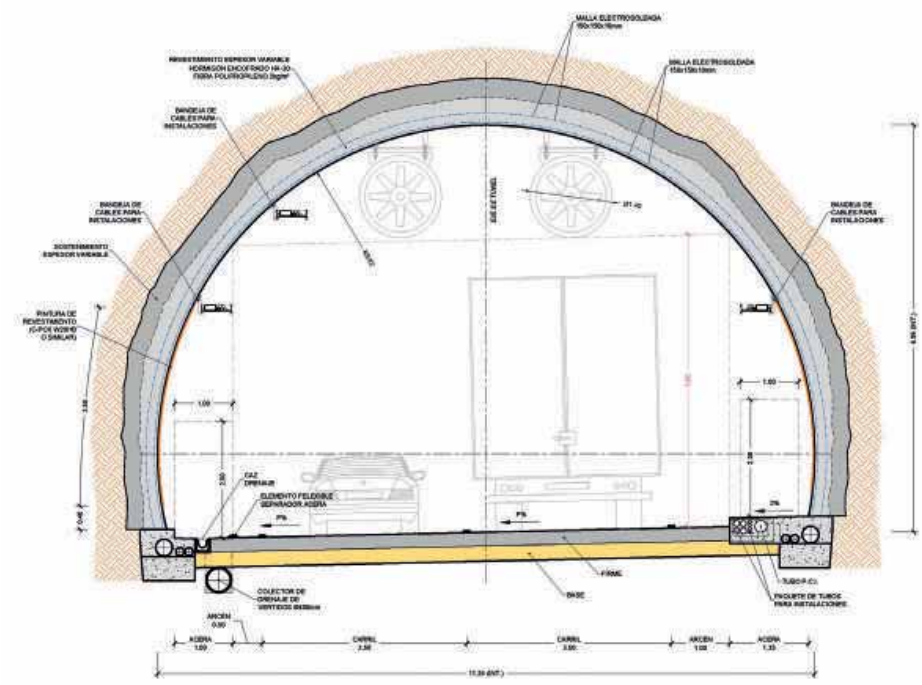


Figura 3.2.a. Sección funcional de los Túneles de Belate y Almandoz tras ser reacondicionados

La nueva sección reacondicionada tendrá un gálibo vertical de 5,0 cm, en vez de 4,7 m que tenía antes, y la calzada mantendrá dos carriles de circulación de 3,5 m, una acera a la derecha de 1,35 m, un arcén a la derecha de 1,0, un arcén a la izquierda de 0,5 m y una acera a la izquierda de 1,0 m.

En el Túnel de Belate hay un tramo de unos 100 m de longitud excavando en pelitas rojas, contiguo al tramo de pizarras negras en el lado Pamplona, que es donde se acumularon los problemas estructurales; que sufre, desde hace 20 años, un levantamiento de la calzada del túnel.

En la Figura 3.2.b se muestran las medidas de convergencia de una estación de control, ubicada en este tramo.

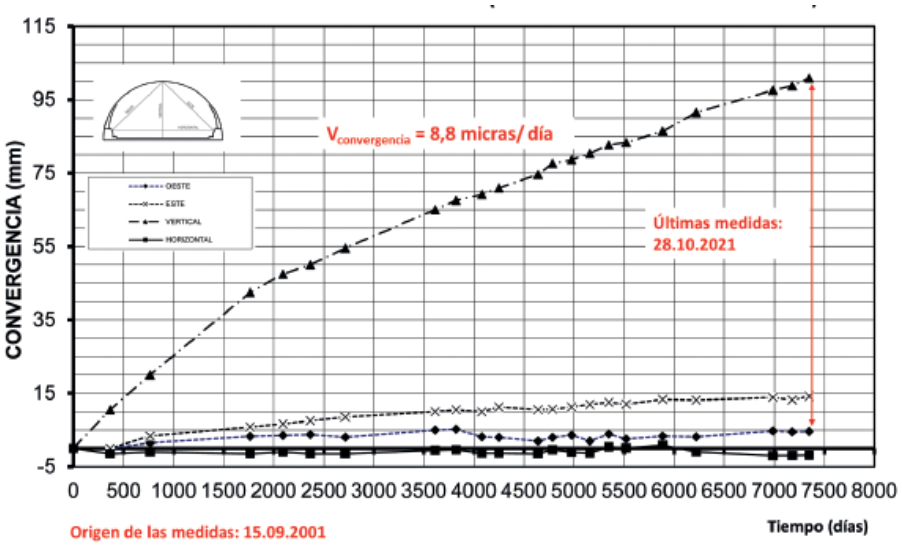


Figura 3.2.b. Convergencias medidas en el tramo de pelitas rojas

En esta figura están representadas las convergencias medidas durante los últimos 21 años en una de las estaciones de control colocada en la zona de pelitas rojas; en la cual, tal como corresponde a un fenómeno de fluencia, la velocidad de convergencia se mantiene constante a 8,8 micras/día.

Para poner fin a este fenómeno de fluencia es preciso construir una contrabóveda anclada, de forma similar a la que se hizo en el año 2021 en el tramo de pizarras negras.

Por ello, en al Proyecto de Acondicionamiento del Túnel de Belate se ha incluido la sección tipo que se muestra en la Figura 3.2.c.

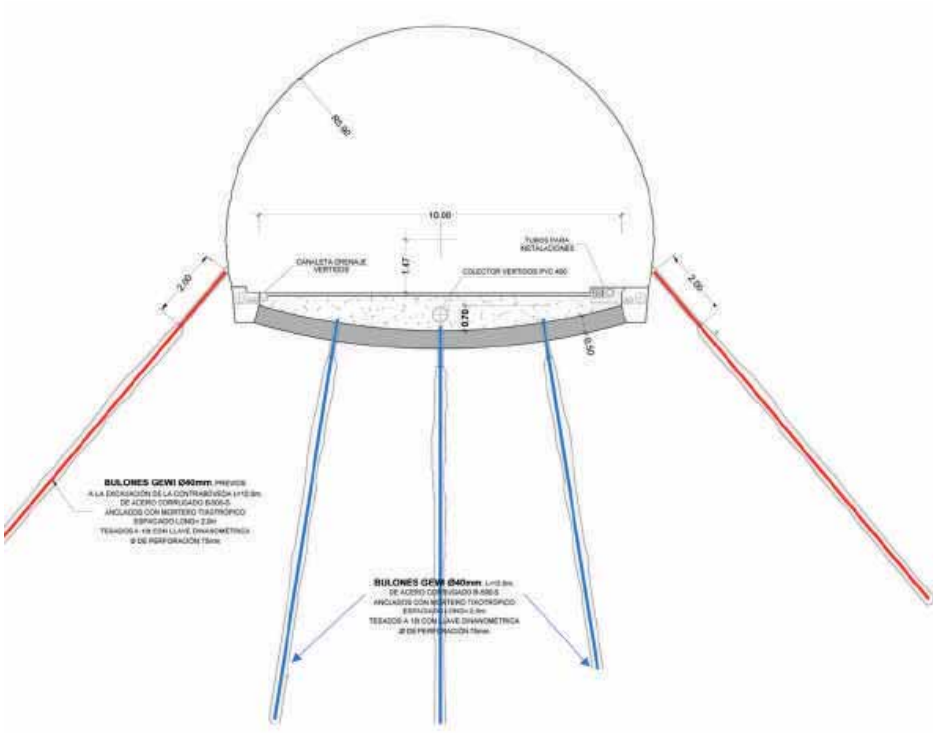


Figura 3.2.c. Contrabóveda anclada para parar la elevación de la calzada en el tramo de pelitas rojas del Túnel de Belate.

3.3. Instalaciones de seguridad

Tanto los túneles actuales como los de nueva construcción estarán equipados con todas las Instalaciones de Seguridad y de Protección Civil exigidas por la Directiva Comunitaria 2004/54/CE.

La mayor carencia en materia de Seguridad de los Túneles de Belate y Almandoz se concreta en la inexistencia de galerías de conexión; carencia que se subsanará con el desdoblamiento, pues en el Túnel de Belate se construirán cinco galerías de conexión y dos en el de Almandoz.

El sistema de ventilación seguirá siendo longitudinal, redimensionando los ventiladores; lo cual no supone problema alguno mientras que la longitud de los túneles no supere ampliamente los 3 Km.

A título de ejemplo, cabe señalar que el tercer túnel viario de Guadarrama, que entró en servicio en 2007 y tiene una longitud de 3.148 m, tiene una ventilación longitudinal; que ha funcionado correctamente en los 15 años que lleva en servicio.

3.4. Duración de las obras

Tal como se muestra en el cronograma de la Figura 3.4.a las obras para la adaptación de los Túneles de Belate y Almandoz a la Directiva Europea 2004/54 se deben realizar en 66 meses.

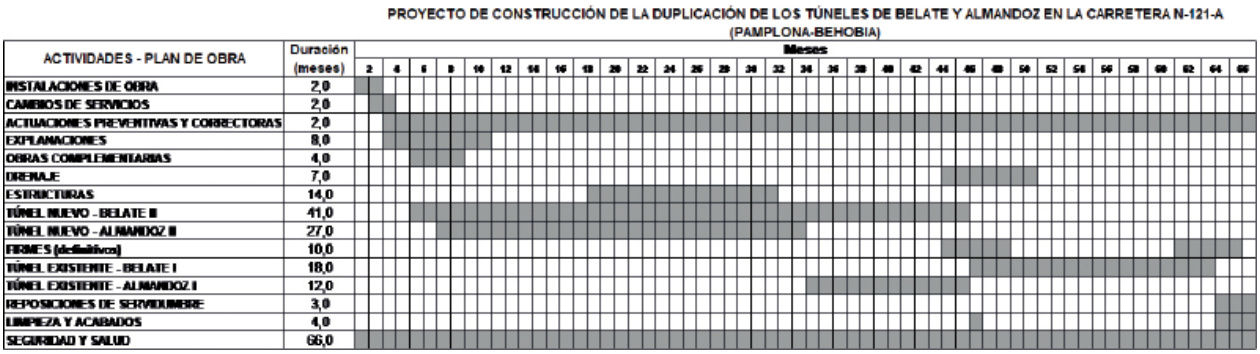


Figura 3.4.a. Cronograma de las obras para adaptar los Túneles de Belate y Almandoz a la Directiva Europea 2004/54.

Se estima que la construcción del nuevo Túnel de Belate se puede realizar en 41 meses; mientras que el nuevo Túnel de Almandoz se construirá en 27 meses, solapando con la del Túnel de Belate.

La adaptación de los túneles actuales se ha previsto que dure 18 meses para el de Belate y 12 para el de Almandoz.

4. CONCLUSIONES

Tras 25 años de su puesta en servicio se puede afirmar que el balance de la explotación de los Túneles de Belate y Almandoz es claramente positivo; pues su IMD se ha triplicado en este período y a pesar de haber ocurrido dos incendios, uno en cada túnel, no ha habido ninguna víctima mortal, considerando todos los incidentes producidos.

En el Túnel de Belate se han hecho, desde su inauguración, reparaciones estructurales; que han tenido por objeto eliminar algunos defectos constructivos importantes.

La reparación de mayor entidad se realizó en el verano de 2001, cuando se construyó una contrabóveda anclada, en el tramo de pizarras negras, de 295 m de longitud.

En el período 2001-2013 las reparaciones fueron puntuales y se concentraron en un tramo de pelitas rojas, que presenta un suave fenómeno de fluencia.

Desde 2013 las reparaciones han tenido una importancia muy pequeña; pese a lo cual en el Túnel de Belate se hacen inspecciones semestrales detalladas y es objeto de una atención constante por parte del Servicio de Conservación de Caminos.

En el año 2004, cinco años después de la inauguración de los Túneles de Belate y Almandoz, se publicó la Directiva Comunitaria 2004/54CE; que, entre otros requisitos, exigía galerías de evacuación en los Túneles de Belate y Almandoz.

El Gobierno de Navarra ha hecho importantes esfuerzos para mantener en niveles muy bajos la siniestralidad de estos túneles; pues en 2002 se inauguró un Centro de Control específico, ubicado en el portal norte del Túnel de Belate, en 2007 entró en vigor el "Plan de Emergencia para túneles de la Red de Carreteras de Navarra" y en la actualidad estos túneles son los únicos en Navarra que cuentan con vigilancia continua 24 horas al día y 7 días a la semana.

Para adaptar los Túneles de Belate a lo exigido en la Directiva Comunitaria 2004/54/CE la Unión Europea dio una moratoria hasta el 1 de mayo de 2019; pero esta adaptación no se ha hecho realidad y los Túneles de Belate y Almandoz se encuentran en situación irregular desde hace tres años.

En diciembre de 2020 el Gobierno de Navarra contrató a las empresas SERTECNA y GEOCONTROL la redacción del Proyecto de Trazado y del Proyecto de Construcción para el desdoblamiento de los Túneles de Belate y Almandoz; que fue entregado en diciembre de 2021 con un grado de cumplimiento de las actividades contratadas del 90%, a falta de que se conozca el contenido de la Declaración de Impacto Ambiental.

Se ha anunciado que las obras para la evacuación de los túneles de Belate y Almandoz se licitarán en 2023, con un presupuesto de 175,8 M€ y un plazo de ejecución de 66 meses.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Celada Tamames, B.; De Cabo Ripoll, M.; Fernández Pérez, M.
  ALGUNOS ASPECTOS DEL PROYECTO DE TÚNELES DE CARRETERA QUE INCIDEN EN SU SEGURIDAD.
  Ingeopres nº 97. Madrid 2001.
- Comisión Europea
  Directiva 2004/54/CE del Parlamento y del Consejo de 29 de abril de 2004, sobre REQUISITOS MÍNIMOS DE SEGURIDAD PARA TÚNELES DE LA RED TRANSEUROPEA DE CARRETERAS.
  DOUE nº 167, de 30 de abril de 2004.
- Servicio de Protección Civil.
  PLAN DE EMERGENCIA PARA TÚNELES DE LA RED DE CARRETERAS DE NAVARRA.
  Dirección General de Interior.

THE UPGRADE OF THE HUGUENOT TUNNEL NORTH BORE AND THE TEMPORARY REPAIRS OF THE SOUTH BORE TUNNEL TO INCREASE RESILIENCE AND SAFETY

Tiago Massingue
The South African National Roads Agency SOC Ltd, Cape Town, South Africa
Project Engineer, MBA
PIARC T4.4 Tunnels

Kate Hunt
WSP, Technical Director, Meng CEng FIMechE, London UK
PIARC TC.4.4, WG2

The South African National Roads Agency SOC Ltd (SANRAL) has identified the need to upgrade the Huguenot Tunnel from the 2-lane single bore, to twin bore tunnel configuration with separated traffic flows. The proposed intervention will address traffic capacity issues, provide upgrades to the fire and ventilation resilience systems to respond to a 100MW fire, the improvement of vehicle and pedestrian cross connections as well as the provision of new concrete pavement structure. Currently, SANRAL is undertaking repair works to the existing Huguenot Tunnel South Bore, comprising the following activities: installation of new back-up generator, replacement of VMS signs, electronic signage, fire detection and suppression systems, the installation of new radio and re-broadcast systems to enhance public announcement systems in the tunnel. The Huguenot Tunnel is the main transportation link between the coastal plains of the Western Cape and the interior. It eliminates a steep climb of 500m over the 23 km long Du Toits Kloof Pass and contributes significantly to the national economy in terms of savings in logistics, road user costs and accident costs. It is expected that once all works are completed not only will there be an enhanced tunnel safe environment but it will also comply with international tunnel safety standards with reference to EU Directive 2004 for Tunnel operations

MEJORA DEL TUBO NORTE DEL TÚNEL HUGONOTE (SUDÁFRICA) Y REPARACIONES TEMPORALES EN EL TUBO SUR PARA AUMENTAR SU RESILIENCIA Y SEGURIDAD

La Agencia Sudafricana de Carreteras (SANRAL, del inglés South African Roads Agency SOC Limited) identificó la necesidad de renovar el túnel Huguenot, que pasará de tener un único tubo bidireccional con 2 carriles a una configuración de doble tubo con flujos de tráfico separados. La actuación propuesta abordará los problemas de capacidad de tráfico, proporcionará mejoras en los sistemas de protección frente a incendios y ventilación para responder a un incendio de 100MW, la mejora de las conexiones transversales de vehículos y peatones, y la provisión de pavimento de hormigón. Actualmente, SANRAL está llevando a cabo trabajos de reparación de las señales existentes, señalización electrónica, sistemas de detección y extinción de incendios, la instalación de nuevos sistemas de radio y retransmisión para mejorar los sistemas de anuncios públicos en el túnel. El túnel Hugonote es el principal enlace de transporte entre las llanuras costeras del Western cape y el interior. Elimina una subida pronunciada de 500 m en los 23 km del paso de Du Toits Kloof y contribuye significativamente a la economía nacional en términos de ahorro en logística, costes para los usuarios de la carretera y costes debido a accidentes. Se espera que, una vez concluidas todas las obras, no sólo se mejore la seguridad del túnel, sino que también se cumplan las normas internacionales de seguridad de los túneles con referencia a la Directiva de la UE de 2004 para operaciones en túneles.

AMELIORATION DU TUBE NORD DU TUNNEL HUGUENOT (AFRIQUE DU SUD) ET RÉPARATIONS TEMPORAIRES SUR LE TUBE SUD POUR EN AUGMENTER LA RÉSILIENCE ET LA SÉCURITÉ

L'Agence Nationale Sud-africaine des Routes (SANRAL, de l'anglais South African Roads Agency SOC Limited) a identifié la nécessité de rénover le tunnel Huguenot, qui passera d'un unique tube bidirectionnel de 2 voies à une configuration avec double tube et des flux de trafic séparés. L'intervention proposée permettra d'aborder les problèmes de capacité de trafic, d'apporter des améliorations aux systèmes de protection contre incendies et de ventilation pour traiter un incendie de 100 MW, d'améliorer les connexions transversales de véhicules et de piétons et de créer un revêtement en béton. La SANRAL réalise actuellement des travaux de réparation des panneaux existants, de la signalisation électronique, des systèmes de détection et d'extinction d'incendies, d'installation de nouveaux systèmes radio et de retransmission pour améliorer les systèmes d'annonces publiques dans le tunnel. Le Tunnel Huguenot est la principale liaison de transport entre les plaines côtières du Western Cap et l'intérieur. Il élimine une côte prononcée de 500 m sur les 23 km du col Du Toits Kloof et contribue de manière significative à l'économie nationale en termes d'économies de logistique, de coûts pour les usagers de la route et de coûts dus aux accidents. On espère que les travaux, une fois terminés, apporteront non seulement une amélioration de la sécurité du tunnel mais permettront également l'application des normes internationales de sécurité des tunnels définies par la Directive de la UE de 2004 pour les opérations dans les tunnels.

1. INTRODUCTION

The Huguenot Tunnel is one of the most strategic infrastructure assets of the South African National Roads Network. It is located on National Road 1 Section 1 from West of the Western Portal (km 60,0) to Eastern Portal (km 66,0), reduces the distance between Paarl & Worcester by 11 km and eliminates a climb of 500m over the Du Toits Kloof Pass. It contributes significantly to the national economy in terms of savings in travel time, vehicle operating costs and a reduction in accidents. It comprises two bores, the North and South, of which the South Bore is in full operation and the North act as a temporary services or emergency route.

2. TIME OF CONSTRUCTION

The construction of the South Bore tunnel commenced in 1982 and was concluded in 1986, including commissioning of the tunnel equipment. It was opened to traffic in March 1988, which translates to 33 years of operation.

3. TUNNEL PERFORMANCE TO DATE

Throughout its operations, the Huguenot tunnel has served over 110 million vehicles, 90.2 million light and 19.8 million heavy vehicles. Having been estimated initially for 3% annual traffic growth for all categories of vehicles, the current growth rate in heavy vehicles is in the order of 18%. In terms of the contribution to national economy, reducing the distance by 11 km on route R101, the total travel time saved to date is approximately 31.1 million hours. Taking a single passenger per vehicle at 26 minutes per heavy vehicles and 15 minutes per light vehicle, the estimated fuel saved associated with the above shortened travel distance is in the order of 5.5 million barrels of crude oil, (at the price of R217.5/barrel in 2021 prices), which translates into a forex saving for the country in the order of R920 million.

Fig. 1: The Huguenot Tunnel North Bore

4. GEOMETRIC CHARACTERISTICS

The summary of technical data including the geometric characteristics for the Huguenot Tunnel as constructed in 1992 is provided in table 4.1 below:

Table 4.1: Summary of technical data including the geometric characteristics for the Huguenot Tunnel as constructed in 1992.

The Tunnel	
1. General information	
Number of bores	2
Number of traffic lanes per bore	2
Design speed	120 km/h (Maximum speed limit in tunnel of 90 km/h)
Portal to portal length of tunnel	3 913 m
Longitudinal gradient through tunnel	0,855 per cent
Centre to centre distance of bores	36,00 m
Number of cross-connections	11
Spacing of cross-connections	328 m apart
	1.5 m
2. Tunnel dimensions	
Minimum cross-sectional area of excavation	Approximately 87 m^2
Width of excavation	Approximately 12,2 m
Height of excavation	Approximately 8,6 m
Carriageway dimensions	2 lanes of 3,70 m plus 0,300 m strip along each side for road marking
Overall width of carriageway (kerb to kerb)	8,0 m
Sidewalk provision	1,00 m wide, flanking carriageway each side and protected by 180 mm high kerb
	500 m
Minimum vertical clearance over carriageway	2,00 per cent
Normal carriageway cross-fall	3,10 per cent
Maximum superelevation in tunnel	1 518 m
Minimum radius of horizontal curvature in tunnel	
Area of ventilation ducts in roof	
Fresh air	4,25 m^2 and 7,90 m^2
Exhaust air	7,90 m^2 (in case of fire)

Some statistics of the Huguenot Tunnel Project	
Tunnel excavation (North and South tunnels)	
Conventional drill and blast with heading preceding bench, tunnelling from both ends. 4 m rounds 425 kg dynagel explosive per heading per round. Tensioned resin anchored rockbolts where required. Shotcrete and TH29 steel arches where required in worst areas. Refer to Fig 1.	
Rock types	Cape Granite 3 200 m
	Table Mountain Series Sandstone 700 m
Average cycle times (drill – charge up – blast – re-entry – muck)	Six to nine hours
12-hour shift, five and a half days per week	
Best advance rate	84 m per week per heading
Total length blast holes drilled	960 000 m
Total mass explosives used	1 400 t
Total solid volume rock excavated	720 000 m^3 (equivalent to 64 000 Kiruna truckloads or a convoy 512 km long)
	9 300 No
Rockbolts, 3 m and 4 m long	133 m – achieved in North tunnel, east heading
Best advance rate for one heading for one week	
Concrete work (South tunnel)	350 mm
Horseshoe profile, lining thickness	56 m per week from each portal
Rate of advance	18 hours
Pumped concrete – stripping time	Hyperlastic sheeting on filter fabric backing layer
Waterproofing membrane	75 000 m^3
	7 500 m^2
Concrete volume	34 000 units
Road paving concrete	
Precast elements for ceiling, wall cladding and drainage	
Approach roads	
Premix	180 000 m^2
Road fill	1 500 000 m^3
Cable ducting	91 500 m
Toll plaza	
Concrete paving	6 000 m^2
Trees and shrubs planted	2 100 No
Small shrubs planted	2 000 No

5. SUCCESSFUL OPERATION FACTORS

The economic benefits derived from the use of this infrastructure, are:

- The tunnel has facilitated development through road Infrastructure, by enabling traffic to move faster and in safer conditions.
- The tunnel has improved traffic flows on the N1 National route, thus minimizing congestion during peak hours.
- It consistently reduces travel times, vehicle maintenance and operation costs.
- The tunnel has safely provided a safe route between Paarl and Worcester for at least 28 of its 33 years of operation. However, during the past 5 years, its capacity, air quality and ventilation system have become an issue and the tunnel operations have been managed with care. This has ensured that no accidents have been recorded.
- The tunnel provides a riding quality of equal standard to other parts of the N1 National route.
- By using a tunnel, the high accident number due to steep grades and local accesses onto the pass is minimized.
- The tunnel has improved the overall safety for road users through the Incident Management System (IMS) Freeway Management System (FMS) and technology such as variable message signs and e-traffic information.

6. NEED FOR UPGRADE

The South African National Roads Agency SOC Ltd (SANRAL) has established that major upgrades for the North and South bores are required to add capacity and for safety improvements. The additional capacity will take the form of creating a two-lane configuration in the North Bore, taking traffic in the North bound direction out of Cape Town, while the existing two lanes in the South Bore will be dedicated to inbound traffic to Cape Town. The layout of the Huguenot Tunnel twin bores is shown in Fig. 2.

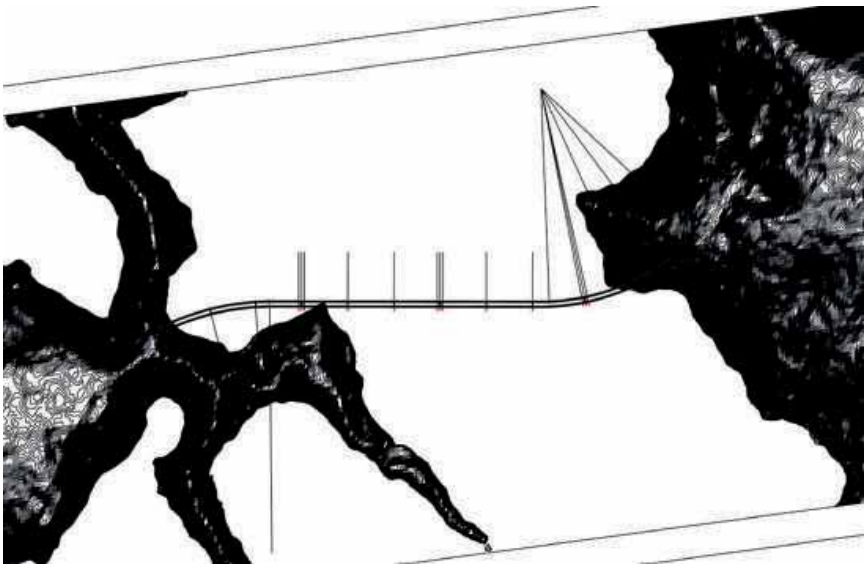


Fig 2: Twin bore configuration of the Huguenot Tunnel

7. DESIGN CONSIDERATIONS

SANRAL established the need to adapt the current tunnel to European Standards due to similarities between this tunnel and many European Tunnels. The risk assessment done in 2014 provided recommendations which are easily adaptable to the European directives. With this as a basis, the following design standards in addition to South African Standards and guidelines and SANRAL requirements:

a) BD 78/99 Design of Road Tunnels;

b) Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council on Minimum Safety requirements for Tunnels in the Trans-European Road Network; and

c) UK Road Tunnel Safety Regulations 2007 No 1520.

It is intended that the tunnel be upgraded to reflect current tunnel best practice as far as possible with a look and feel of a modern tunnel. This philosophy will be applied first to the design of the North Bore and later to the existing Southern bore through retrofitting.

One of the SANRAL specified project requirements is that "the tunnel lining must be capable of withstanding a 100MW fire to reduce closure duration after a fire." A 100 MW fire is consistent with a fire involving a heavy goods vehicle, and a realistic possibility due to the high number of HGVs using the tunnel. The fire intensity is created due to the large amount of fuel carried and the combustible nature of many payloads. Hydrocarbon fires cause the most rapid temperature rises and are typically adopted as the basis for design, checking and controlling fire effects in road tunnels.

8. SCOPE OF THE HUGUENOT TUNNEL UPGRADE

The North Bore is limited to a rock bolted non uniform tunnel section on pavement gravel standards and has never been made available for public use. The current upgrade scope for the 4 km tunnel extension, entail: tunnel lining, the provision of a pavement concrete tunnel infrastructure, drainage and new lighting systems. From operation, safety and maintenance perspective, the tunnel is being upgrade to a 100 MW fire loads which will include the provision of fixed firefighting systems, semi transverse and ventilation design. The work is also extensive for the South Bore which will later bring the two tunnel bores to the same performance standards and shown in fig. 3 below.

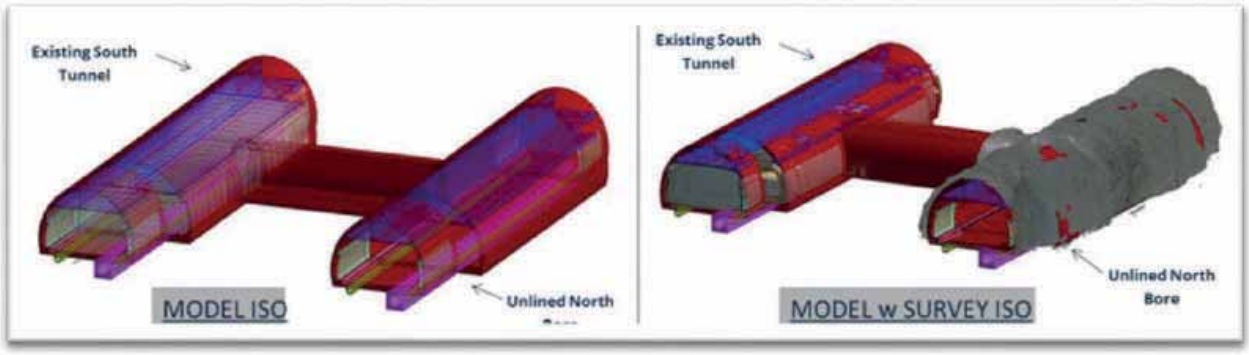


Fig. 3 Model ISO for the current and upgraded south and north bores

The key design decisions include, particularly the following:

8.1. Tunnel lining

The North Bore was bored along with the South Bore and has been in existence for more than 30 years. The lining design strategy for this bore must address several key factors. These include the requirement for a 100-year design life and the ability to withstand a 100MW fire and reducing substantial periods of closure after a fire. A fire coating will be applied in areas where tunnel stability may be affected, should a fire scenario occur. The incorporation of bolted tunnel support also needs consideration.

Critical decisions need to be made regarding the management of water ingress and the control of runoff due to the current seepage resulting from the existing two faults through the tunnel length and the overall drainage systems, including the inclusion of fire hydrants throughout the tunnel. Additional factors include the fact that significant overbreak in the bore was identified and confirmed in July 2010 following laser scanning surveys undertaken by African Consulting Surveyors under the instruction of SANRAL.

Lining options currently being examined include a concrete arch lining, similar to that in the existing Southern Bore, as well as a shotcrete lining. A typical section through a concrete arch lining solution is shown in Figures 4, 5 and Fig 6. below.

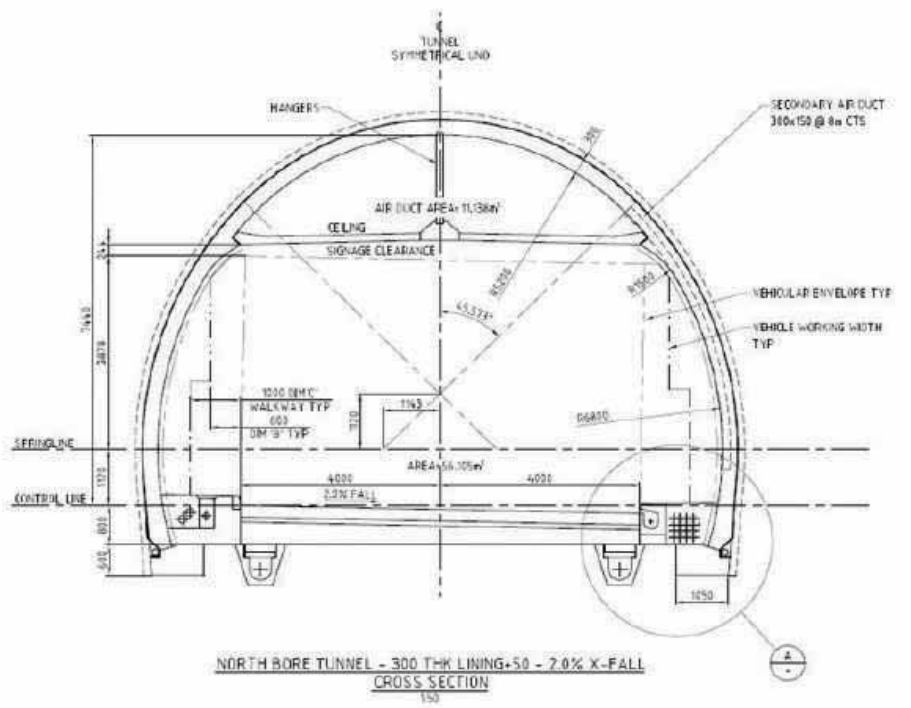


Fig.4: A typical cross section of a concrete lined North Bore

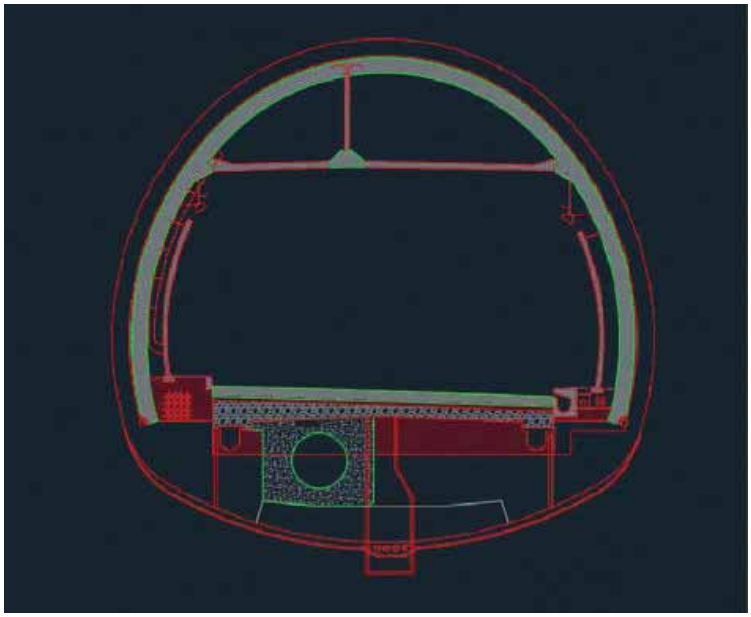


Fig.5: A typical ISO view of the proposed cross section for a concrete lined North Bore.

A shotcrete lining option has not been viewed as the most feasible solution due to the finish already developed for the South Bore. For price comparison however, the Designer was asked to consider developing this option to enable SANRAL to define its options in the light of possible budget constraints. In doing so, the Designer was asked to take into consideration the following:

- The lining may also consist of shotcrete.
- significant savings on the volume of concrete to be placed.
- construction time can be significantly reduced.
- The disadvantages of a shotcrete lining associated with sealing of water seepages and flows being more complicated and riskier than of a concrete lined tunnel.
- The exposed surface of a conventional shotcrete lining being rough and aesthetically unpleasing when compared to a concrete lined tunnel.

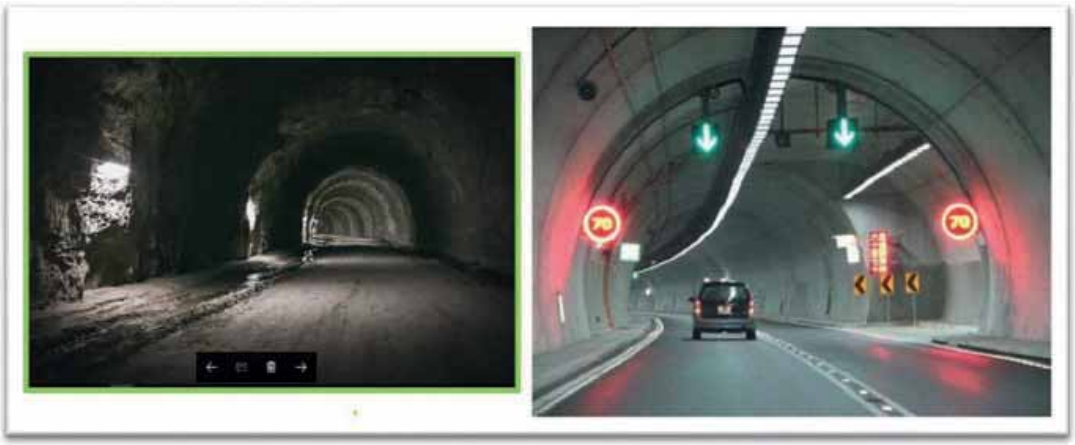


Fig.6: A typical cross section with a shotcrete lined North Bore

Ventilation & Fire Strategy

- Provision of modern ventilation systems.
- Provision of ventilation buildings, for both east and west portals, and
- Sufficient jet fans as per the design to adequately cater for air and smoke extraction in case of fire. The design is currently assessing the jet sizing for different output specifications.
- To cater for the 100 MW fire requirements the tunnel will benefit in addition to fixed firefighting systems in line with the ongoing technology in this field.
- Improvements will also be made to the existing system in the South Bore.

8.2. Fire design resistance

Fire resistance of the tunnel structure reduce damage caused by fire and minimise the time and cost required for shutdown and repairs.

8.2.1. Purpose of Fixed Fire Fighting Systems (FFFS)

Firefighting Systems are aimed to improve both life safety and asset protection. They achieve this by:

1. Improving the self-rescue/evacuation conditions for people,
2. Improving access and operating conditions for the fire brigade and rescue services.
3. Control of heat release rate (HRR)
4. Prevention of fire spread from one to another vehicle.
5. Limiting structural damage to the Tunnel

8.2.1.1 *Improve the Self-Rescue Conditions*

Improved self-rescue condition can be achieved through the implementation of the following mitigating aspects:

- Immediate cooling effect to provide lower temperatures within the fire zone;
- Significant reduction in smoke production by controlling and suppressing the fire;
- Binding smoke and soot.

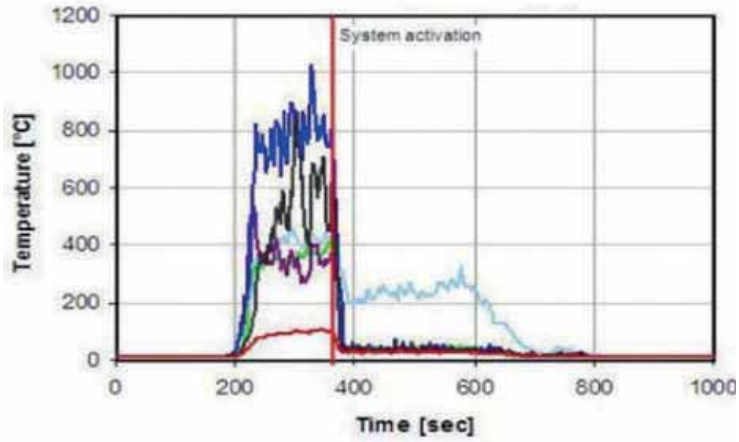


Fig 8.2.1 FFFS lowering the temperature in the tunnel

8.2.1.2 *Improving access and operating conditions for the Fire and Rescue services*

Improved access and operating conditions for fire and rescue services can be achieved through the implementation of the following mitigating aspects:

- limited heat release rate (HRR) with suppression and control;
- lower temperatures; and
- blocking radiant heat transfer.

8.2.1.3 *Control of Heat Release Rate (HRR) with FFFS in Tunnels*

Fig 8.2.2 below shows the impact of reduction heat release rate due to the action of the fixed firefighting systems in tunnels. SANRAL has established the need for providing FFFS at the Huguenot Tunnel North Bore.

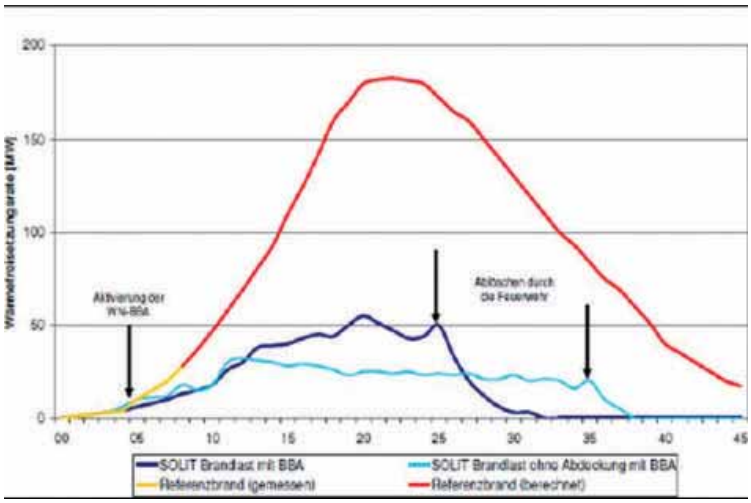


Fig 8.2.2 Reduction heat release rate due to the action of the fixed firefighting systems in tunnels

8.2.1.4 *Prevention of fire spread from one to another vehicle*

Prevention of fire spread from one to another vehicle can be achieved through the implementation of the following mitigating aspects:

- limited fire area
- limited HRR

8.2.1.5 *Limiting structural damage to the tunnel*

The need to limit possible structural damage in the tunnel was indented and the following strategy will be pursued:

- limited fire area
- limited HRR

A fixed firefighting system is being considered to take into the available Water Mix technology which includes provision of main pipe, section valve, nozzles, and session pipes, as well as linkages to the central systems.

8.3. Cellulose and Hydrocarbon fuel sources

The standard temperature – time curve for fire testing is for a cellulose fire. An alternative curve has been defined for a hydrocarbon fuel source and both are shown in Fig 8.3 below. A hydrocarbon fire is characterised by a rapid rise in temperature and results in the same ultimate temperature after approximately 30 minutes compared to 3 hours for the cellulose fire curve. This rapid temperature rises are responsible for explosive spalling of concrete exposed to a HC fire. Subject to the steep temperature rise water vapour forms within the concrete and expand rapidly resulting in what is referred to as explosive spalling. This can cause progressive and substantial damage to a concrete structure.

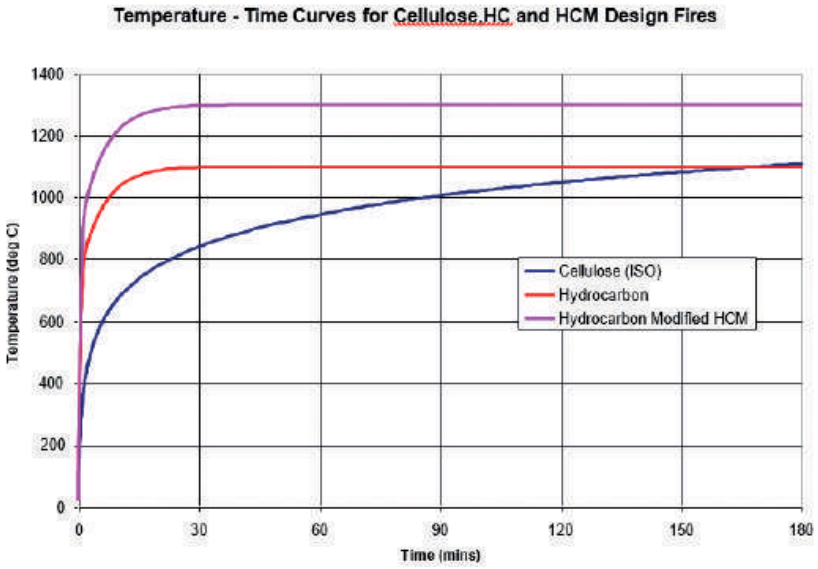


Fig 8.3: Standard temperature-time curves used in fire resistance testing

The damage caused by a fire is dependent on both the fire load as well as duration. The duration of the fire is determined by the tunnel ventilation system, the drainage capacity, the quantity of fuel and the available firefighting provisions. PIARC and ITA recommend the consideration of the HCM design fire curve for road tunnels – refer Figure 8.3 above.

8.4. Fire Protection Strategies

Fire protection against a cellulose fire can generally be achieved by maintaining minimum concrete covers as specified in Table 43 of SABS 0100-1 clause 7.2.

Fire protection against a modified Hydrocarbon fire requires additional measures specifically to minimise explosive spalling during exposure. This can be achieved either by:

- The addition of PP monofilament fibres in the concrete mix or by
- The application of a passive fire protection layer to reduce the temperature rise at the concrete interface.

Interpretation of Fire Design Requirements

A risk-based approach has been adopted to determine the structural fire protection requirements within the tunnels. This approach is consistent with the requirements of Section 2.7 of the EU Directive 2004/54/EC "Minimum Safety Requirements for Tunnels". Where a HCM fire can trigger a structural collapse or can have catastrophic impact above the tunnel additional fire protection to achieve a 2-hour HCM fire rating has been provided. The fire design requirements for tunnel structures that are deemed to comply are outlined as follows:

Tunnel Arch Structure

- Tunnel arch plain concrete – Fire rating 4-hour cellulose fire: In sections of tunnel that are not reinforced, it is assumed that damage to the lining will not result in a tunnel collapse. However, following a 4-hour design fire exposure extensive repair of the tunnel arch lining may be required.
- Tunnel arch reinforced concrete – Fire rating 2-hour HCM fire rating as well as a 4-hour Cellulose fire rating: Reinforced areas are deemed to be critical areas where failure of the tunnel lining could result in a tunnel collapse and hence the supplementary requirement for the 2-hour HCM fire rating. This is achieved with reinforcement cover (65mm intrados Table 43 of SABS 0100-1 clause 7.2) and the addition of microfilament PP fibres to the concrete mix for the arch.

The available literature and test data indicates that monofilament polypropylene fibres can be expected to provide considerable benefit in limiting spalling during a HCM fire but may not prevent it. The dosage of fibres should be between 1 kg/m3 and 2 kg/m3 dependent upon the many factors which contribute to spalling. The addition of polypropylene fibres only addresses permeability and reduces the likelihood of explosive spalling because of increased pore pressure as moisture evaporates. Other factors may still cause some spalling; therefore, it is to be expected that a limited depth of spalling may still occur under hydrocarbon fire conditions.

Ventilation Duct Panels

Fire rating 2-hour cellulose fire: Achieved with reinforcement cover and the addition of ~ 1kg of monofilament PP fibres to the concrete mix. Table 43 of SABS 0100-1 clause 7.2 indicates that the minimum concrete cover required for a 2-hour fire rating (cellulose fire) of reinforced concrete is 45 mm. This table also indicates that additional reinforcement is required to prevent spalling. The Designer is required to assess the merits of additional reinforcement versus the use of microfilament Polypropylene (PP) fibres for minimising spalling.

Tunnel Ceiling and upper walls beneath the ventilation building East and West

Fire rating 2-hour HCM fire rating as well as a 4-hour Cellulose fire rating. Collapse of the tunnel ceiling can have catastrophic implications considering the critical equipment above and hence the supplementary requirement for the 2-hour HCM fire rating. This is achieved with adequate reinforcement cover (65mm intrados Table 43 of SABS 0100-1 clause 7.2) and the addition of passive fire protection to the tunnel ceiling and upper walls. Passive fire protection will be achieved with either fire protection boards or passive fire protection spray on applications.

Pavement and Sub-base

The scope of works driven by Engineering Requirements a CRCP pavement must be provided for the Huguenot North Bore Tunnel. The CRCP is 235mm thick and is placed on a free draining no fines concrete layer. A protection membrane is placed between the no fines and the CRCP to prevent infiltration into the no fines layer. The thickness of the no fines varies depending on the existing cross falls in the tunnel but assuming a minimum 2% cross fall the average no fines concrete thickness is 485mm. The reinforcement arrangement of Y10 @100 centres longitudinal and Y10@200 centres transverse in two layers top and bottom, should be considered.

Manholes

There are many manholes in the North Bore for HV and LV cables, Hydrants and Drainage. The layout for the North Bore should take due consideration to the existing layout in the South Bore.

Design for Fire Resistance

Protection for the upper walls beneath the ventilation building and the first-floor deck which supports the ventilation equipment from fire damage is critical. To achieve a 2-hour HCM fire rating as well as a 4-hour Cellulose fire rating the provision of adequate reinforcement cover (65mm intrados Table 43 of SABS 0100-1 clause 7.2) and the addition of passive fire protection to the first-floor deck soffit and upper walls must be considered. Passive fire protection may be achieved with either fire protection boards or passive fire protection spray on applications.

Fire Detection and Warning

The ventilation building must be provided with point source smoke or heat detection system in accordance with local and international building regulations. Detectors must be selected to minimise incidents of unwanted alarms due to environmental conditions. Audible fire alarm sounders installed in the ventilation building should be supplemented with strobe lights for visual warning as ambient noise levels may be high due to the ventilation equipment. Other relevant technologies in this field must be properly investigated and discussed during the design phase.

Emergency Egress

Emergency egress shall be part of the tunnel operations centre's emergency procedures to evacuate personnel.

Emergency Lighting and Exit Signage

The location of emergency lighting and exit signage for way finding and exit identification will be in accordance with the specified Safety Requirements. The Ventilation buildings will be provided with emergency lighting and exit signage in accordance with local and international building regulations.

Smoke Hazard Management

Jet fans will be accommodated in the ventilation building near the entrances to assist longitudinal ventilation in event of smoke hazards.

Fire Suppression

In addition to the stipulated provision of fixed firefighting systems, portable hand-held fire extinguishers must be provided at emergency points.

Huguenot North Bore and South Bore Fire Life Safety General

The Fire and Life Safety (FLS) provisions for the Huguenot North Bore and South Bore will generally aim to follow the recommendations of BD78/99, allowing for constraints imposed by the existing tunnel geometry. The overarching Fire and Life Safety strategy for both tunnels is to control smoke spread within the tunnel through a combination of longitudinal ventilation and smoke extraction at source to provide sufficient time for tunnel occupants to evacuate the incident tube into the non-incident tube or out the portal.

The strategy for each tube will be as closely aligned as possible, however it is recognised that in some instances there will be differences in the FLS provisions for each bore. For example, additional fire hydrants will be provided in the North Bore.

The SANRAL Engineering Requirements specify Huguenot Tunnel as Tunnel Category AA (DB78/99 Table3.1) with basic safety provisions and fire protection equipment as follows:

- Emergency Telephones
- Radio Rebroadcasting System
- Traffic Loops
- CCTV
- Hand Held Fire Extinguishers
- Pressurized Fire Hydrants
- Fire Hose Reels
- Emergency Exit Signs
- Lane Control and Tunnel Closure Signs/Signals
- Emergency stopping lane
- Emergency walkway
- Escape Doors
- Ventilation for Smoke Control

The Designer must comply with all the above requirements including those not described that fulfil the international accepted safety standards and best practices.

Fire Detection and Warning
The Designer is taking cognisance that:

Automatic fire detection will be via a zoned linear heat detection (LHD) cable located at the crown of the tunnel. Activation of the LHD will send a signal to the fire alarm system and alert the tunnel operations centre as to the location of the incident. The LHD zoning will match the smoke exhaust zones to facilitate selection of correct exhaust dampers. It is however expected that the tunnel operations centre will be made aware of a fire incident prior to activation of the automatic heat detection system via the CCTV, particularly if an automatic incident detection system that identifies stopped vehicles is provided.

The tunnel operations centre can also be alerted to a fire incident by tunnel occupants using the emergency telephones located at each Emergency Point, or by emergency services passing on mobile phone calls from motorists (mobile phone coverage will be provided within the tunnels).

Tunnel occupants will be provided with evacuation instructions from the tunnel operations centre via variable message signs, and radio rebroadcast facilities.

Plant rooms and ancillary spaces within the tunnel will be provided with point source smoke or heat detection in accordance with local building regulations. Detectors will be selected to minimise incidents of unwanted alarms due to environmental conditions. Detector activation will send a signal to the fire alarm system and alert the tunnel operations centre as to the location of the incident. Fire alarm sounders will be installed in plant rooms and ancillary spaces in accordance with local building regulations. Where ambient noise levels may be high, audible fire alarms will be supplemented with strobe lights for visual warning.

Emergency Egress
The Designer was asked to take cognisance that:

In the event of a fire or other emergency that requires evacuation of the tunnel, occupants will evacuate the incident tube to a place of relative safety within the non-incident tube before ultimately being evacuated from the tunnel. Occupants close to the tunnel entrance or exit are expected to evacuate via the portal. Emergency egress is

provided via cross passages connecting the two mainline tunnels at a maximum spacing of 335 m along the length of the tunnels. Occupants will make their way to the exits via the shoulder at the side of the roadway, and via the space between vehicles stopped in each lane. It shall be part of the tunnel operations centre's emergency procedures to immediately close the non-incident tube to allow incident tube occupants to safely evacuate into the non-incident tunnel. The strobe light located above each exit door will activate when the exit door at either end of the cross passage is opened, to warn motorists that pedestrians may be entering the mainline tunnel from the cross passage.

8.5. Tunnel Ventilation design

8.5.1. Rationale for Huguenot Tunnel Ventilation design

Ventilation in tunnels is required for normal and emergency operation. During normal operation, its purpose is to provide a clean air environment and to maintain reasonable temperatures during congested conditions. During emergency operation, ventilation is needed to influence the flow of smoke and combustion products to create a safer environment for tunnel users to escape and for emergency services to intervene. Given the layout of the tunnel, the design is taking into consideration the characteristics of the traffic such as the expected flow, type of vehicles and combustible load. The design also aims to safeguard tunnel users by keeping a smoke-free area and providing sufficient exit facilities for egress and rescue, and to support the responding emergency services to cope with the design fire scenario.

Ventilation systems and the objectives for smoke control

Tunnel ventilation can be achieved by either natural or mechanical means. Natural systems rely on the piston effect of moving vehicles, external wind, and temperature and pressure differentials between the portals to produce airflow through the tunnel. Mechanical ventilation systems use fans to produce airflows and may use ducts and dampers to distribute this airflow. Regardless of mechanical ventilation equipment, naturally induced airflows are present in all tunnels to a varying extent.

Tunnel ventilation is based on the application of either dilution or removal of smoke. Dilution is usually an efficient method for normal operation, in which case the objective is to maintain air quality and visibility. It can increase tenability by reducing concentrations of toxic gases. During emergency operation, smoke management is ideally achieved by removal of air, for example by the extraction of air and smoke. Hence, vitiated air is replaced by clean or smoke-free air, which is either supplied mechanically or drawn in through the portals.

The general classification of a ventilation system is based on the direction of airflow. Longitudinal ventilation is in the direction of the tunnel axis; air may be introduced or removed from the tunnel at a limited number of points, such as portals or ventilation shafts, or ceiling-mounted jet fans will be used to produce the required airflow through the tunnel. In transverse and semi-transverse ventilation systems, which are generally more common in road tunnels, air movement is perpendicular to the tunnel axis in the plane of a cross-section.

Longitudinal ventilation for smoke control is ideal in a non-congested road tunnel with unidirectional operation. The ventilation flow would be in the direction of traffic, and so traffic ahead of an incident would exit the tunnel, and traffic behind the incident would be in fresh air. Semi-transverse ventilation systems have the characteristic of either extracting or injecting air in a distributed fashion over the length of the tunnel. Typically, the

extraction or injection flow rate is constant along the length of the tunnel. Semi-transverse systems operating in exhaust are not efficient for smoke control, and recent developments in semi-transverse systems apply remotely controlled dampers enabling point extraction of smoke. In this case, only the dampers nearest to the fire are opened, and the remaining ones are closed. The efficiency of the smoke extraction is greatly increased if the longitudinal velocity in the tunnel can also be controlled from the beginning of the fire, for example by jet fans, thus avoiding extensive smoke spread. The aim is to provide longitudinal flow on either side of the extraction zone, effectively pushing smoke towards it. Smoke can then be extracted over a short distance near to the fire. This overcomes the shortcoming of traditional semi-transverse systems, where extraction is performed over longer sections of tunnel.

Transverse systems use both a supply and an exhaust air duct to uniformly distribute air to and remove air from a tunnel. Typically, air is supplied at a low level near the roadway and extracted along the tunnel ceiling. Here again, systems that incorporate remotely controlled dampers enabling point smoke extraction are more efficient for smoke control. During a fire, the fresh air supply is sometimes reduced along the tunnel length, for example to preserve stratification and to create a longitudinal velocity toward the fire. Where the capability exists, the supply may be further restricted in the fire section.

Optimal strategies for the operation of tunnel ventilation need to consider the real fire situation and its development with time, noting that the normal operating condition is the starting point for the initiation of the emergency response. The goal of smoke control would be the achievement of a system that can take the correct online decisions and of instructing all rescue services as a function of the actual situation. However, due to the complexity and diversity of fire hazards, optimal control is perhaps beyond the reach of the actual state of knowledge and technology. Hence, strategies based on predefined intervention plans and procedures using the available knowledge and equipment is being developed.

Tunnel Ventilation Ceiling Duct

The vent duct ceiling in the tunnel roof has been slightly raised to accommodate an additional 250mm clearance for traffic signage as required by the SANRAL Engineering Requirements. An additional 250mm tarpaulin allowance as required in BD78/99 will be provided. The vent duct ceiling is to be constructed with precast panels similarly to the South Bore except that there is only one single duct in the North Bore which is laterally supported on corbels and centrally by vertical steel hangers connected via inserts to the arch lining crown. Contrary to the South Bore the North Bore ventilation duct does not include a vertical partition wall. The minimum thickness for the reinforced ceiling panels is 150mm.

The Design takes due consideration to how the ventilation system can be improved if is to consider the provision of centrifugal jet fans spaced at the equal intervals for the entire 4 km of tunnel length. The provision of 2-4 fans (500hp) connected by common extraction 4 km duct Jet fans is being considered. These jet fans positioned at the tunnel entrances and exits will draw and push fresh air through the tunnel. Further assessment is being made towards the provision of two independent buildings for ventilation management on both sides of the tunnel.

Both North and South tunnel entrances will be equipped with two operations building. These buildings will run the tunnel's lighting, traffic management and safety systems, house maintenance facilities, and each operating building will feature some ventilation stacks, supporting a ventilation system designed to handle a 100 MW fire.

Tunnel Electrical Power Supply

Power supply for the Huguenot Tunnel is provided by two Sources: Eskom, the National Power Supply Company, and the Drakenstein Municipality (DM). Currently, the dedicated Eskom Kloof substation provides an average of 3 MW power for daily tunnel operations. However, this substation is 30 years old and is due for an upgrade to ensure its reliability. The DM is a second Tier Service Provider for the provision of power supply. It relies on the ESKOM for supply and, in turn, sells from the ESKOM grid capability to the Huguenot Tunnel.

Adequate power supply is required to cater for the new ventilation and fire systems, with an appropriate level of redundancy, as dictated by International Safety standards. A worst-case scenario with traffic congestion in the tunnel leading to maximum air pollution and strong wind conditions limiting natural airflows in the tunnel. This would require operation of all fans. The upgrade works are expected to lead to an estimated power demand increase to 8MVA.This increased power demand has triggered the requirement for an upgrade to the substation. This improved power redundancy level will ensure that the tunnel can operate independently in case of power shortages from the national grid.

Below is the type of equipment being prepared for the tunnel.

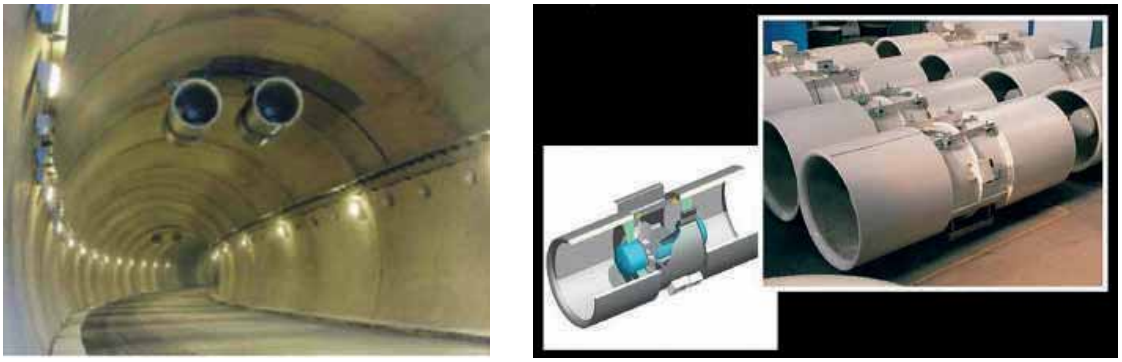


Fig. 8.5.a) Reversible jet fans

Fig. 8.5.b) Axial Fans and jet reversible fans

Fig. 8.5.c) Axial Fans

Technology

The latest developments in tunnel management system will be Incorporated in the tunnel upgrade.

Aesthetics

SANRAL, in its commitment to the broader community, requires that all design consultants, appointed contractors construct bridges and tunnels that are visually pleasing. To this end the Huguenot Tunnel upgrade must be to a high aesthetic quality. Attention to the overall appearance as well as the finishing details of tunnels is being considered and implemented.

South Bore

The South Bore is currently operational. To enhance functionality in the overall tunnel once the upgrade is complete, the following design reviews and upgrades are required:

- An in-depth analysis of Huguenot Tunnel South Bore structural, electrical and maintenance requirements to optimize safety and align its performance level of North Bore standards.
- Update design and realign the 100 MW fire load design to be extended to South Bore. This implies new equipment and new power supply including reconfiguration of the ceiling structure, ventilation elements and ducting.

Additional repair works for the South Bore which include:

- Repair of the existing structural cracks through the tunnel ceiling structure, inner tunnel walls and others,
- Repair of the existing structural failures including the replacement of cracked concrete slabs,
- Replacement of floor slabs affected by localized past fires
- Repair and improvement works where water ingress is noted through new damp-proof membrane where applicable. This include extended drainage systems particularly at tunnel fault areas, where the level of water ingress can be considered higher.

Tunnel Approaches

Geometric improvements of the existing N1 freeway are required to tie in with the upgraded Huguenot Tunnel. These improvements include the provision of a four-lane divided freeway approaches on both sides of the tunnel and widening of existing bridges or construction of new ones, as appropriate.

8.6. Geotechnical investigations

A substantial number of geotechnical investigations are being conducted throughout the tunnel infrastructure, access roads and bridges. Through the Design Team and the appointed Contractor for geotechnical investigation, the following works are anticipated:

(i) Machine excavated test pits to a maximum depth of 3.5m

(ii) Bulk soil sampling of test pits

(iii) Rotary-cored drilling (vertical)

(iv) Standard Penetration Tests (SPT) at well-defined intervals in boreholes

(v) Installation of groundwater monitoring standpipe piezometers within the boreholes

(vi) Undisturbed (Shelby tube) sampling

(vii) Traffic accommodation on the N1

8.7. Bridge Structures

Access to the tunnel is over a series of bridge structures, namely, Molenaars River Bridge, Elands River Viaduct, Elands River Bridge and the New Elands River Bridge on the East side of the portal as shown on Fig.8.7 below and the Hugos River Viaduct Bridge on the Western side.

Fig 8.7: Bridge Structures on the Tunnel Eastern Portal

The upgrade of the N1 as it leaves the Eastern Portal is particularly challenging from a geometric perspective. This may require the replacement of Pier 4 of the existing Elands River Bridge B816 with a portal structure to allow the North Bore carriageway onto existing Bridge B721B. An alternative to the above may include revised horizontal curves to previously approved alignment to maximize the currently existing site conditions.

As the full design for the tunnel is concluded, proper accesses must equally be in place. SANRAL and the Designer are making appropriate effort to tie the tunnel infrastructure to effective bridge infrastructure projects. New bridges where applicable are being considered as part of the design effort as well as the improvement of the existing ones.

9. SPECIAL CONSIDERATIONS

9.1. Rationale for Huguenot Tunnel Ventilation design

There are several design challenges that need addressing to complete the upgrade of the tunnel. These include the following:

- The interface between the modern technology for tunnel design which is being implemented and the introduction to the same technology for an adjacent tunnel bore in operation for more than 30 years. Examples of these relate to the ventilation design, fire deign and the application of fixed fire-fighting systems.
- The drilled portion of the North Bore tunnel poses a challenge as there is limited space for the introduction of technology systems. No additional tunnel blasting is envisaged. However, to maximize the existing cross section, solutions including lowering the tunnel invert are being examined.
- The redesign of the vehicle cross connections is of special significance. The provision for heavy vehicles to move from one tunnel bore to another needs to be concluded with due care as the vertical grades must not exceed the safety permissible levels in terms of geometric design.
- The inclusion of modern signage in the tunnel, particularly gantries and variable message signs, needs to be carefully considered.
- The refurbishment of the South Bore is being carefully considered. The introduction of new technology for effective ventilation will be impacted by the existing tunnel geometry.

10. CONCLUSION

The upgrade of the Huguenot Tunnel from one to two operational tunnel bores is one of the largest infrastructure projects in South Africa. It aims to improve the travel time, the safety of the road user and enhance the development of the Western Cape Province, the South African Roads Network and to promote economic growth. The design work is well advanced with planned construction works to start in 2023. SANRAL and its Designers are fully committed to the successful implementation of this project.

EQUIPO DE SEGURIDAD: CONSIDERACIÓN CONJUNTA EN UN TÚNEL: "FASE PRELIMINAR-EL DISEÑO-LA CONSTRUCCIÓN-LA EXPLOTACIÓN"

Manuel Alberto Abella Suárez
SEOPRIN, S.L.

Ignacio García-Arango
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Presidente de la Fundación Foro Jovellanos del Principado de Asturias

Fernando Hacar
Ingeniero Civil

Como no podía ser de otra manera, y considerando que un túnel debe ser considerando conjuntamente la "Fase Preliminar-El Diseño-La Construcción-La Explotación", la Directiva Europea 2004/54/CE señala en el epígrafe "Aprobación del proyecto" que "Las disposiciones de la presente Directiva se aplicarán a partir de la fase preliminar de proyecto".

En esa idea de consideración conjunta, a la hora de analizar los Requisitos de Seguridad, es determinante lo que se haya hecho en la fase de Diseño, de lo que se haya hecho durante la Construcción (que por diversas razones no siempre es lo previsto en el Diseño), y todo ello teniendo siempre en cuenta que el futuro es la puesta en Servicio del Túnel. Cada una de esas Fases requiere una especialización.

En la presente comunicación se exponen diferentes aspectos que muestran la importancia de esa consideración conjunta y los problemas -algunos de costosa o prácticamente imposible solución- que pueden producirse si no se realiza esa consideración conjunta.

Como ejemplo muy conocido y debatido en algunas regiones puede citarse la decisión de terminar el túnel sin un revestimiento definitivo de hormigón encofrado, empleando gunita en el acabado final y/o empleando placas para el acabado estético. Esa decisión debe evaluarse desde la fase preliminar pues la construcción deberá ser de una u otra manera, así como la explotación.

De aquí se concluye que el Responsable de Seguridad debe estar formado por un Equipo de Seguridad, Equipo que ha de intervenir trabajando en equipo desde la fase preliminar (como así lo apunta la Directiva 2004/54/CE) y que ha de estar formado por aquellos profesionales con reconocida experiencia en el Diseño, Construcción y Explotación, capitaneado por un ingeniero generalista con experiencia, todo ello con el fin de predecir los inconvenientes futuros, aumentando, de ese modo, la resiliencia y la endurancia del túnel.

GLOBAL CONSIDERATION IN A TUNNEL: SAFETY TEAM: "PRELIMINARY PHASE-THE DESIGN-THE CONSTRUCTION-THE EXPLOITATION"

As it could not be otherwise, and considering that a tunnel must be considered jointly the "Preliminary Design - Design - Construction - Operation Phase", the European Directive 2004/54/EC states under the heading "Approval of the project" that "The provisions of this Directive shall apply from the preliminary design phase onwards".

In this idea of joint consideration, when analysing the Safety Requirements, what has been done in the Design phase is decisive in relation to what has been done during Construction (which for various reasons is not always what was foreseen in the Design), and all this always bearing in mind that the future is the commissioning of the Tunnel. Each of these phases requires specialisation.

This paper presents different aspects that show the importance of such joint consideration and the problems - some of them costly or practically impossible to solve - that can occur if such joint consideration is not carried out.

A well-known and much debated example in some regions is the decision to finish the tunnel without a final concrete lining, using gunite for the final finish and/or using slabs for the aesthetic finish. This decision has to be evaluated at the preliminary stage as the construction will have to be one way or the other, as well as the operation.

From this it can be concluded that the Safety Officer should be formed by a Safety Team, a team which should work as a team from the preliminary phase (as stated in Directive 2004/54/EC) and which should be formed by professionals with recognised experience in Design, Construction and Operation, led by an experienced general engineer, with the aim of predicting future inconveniences, thus increasing the resilience and durability of the tunnel.

ÉQUIPEMENTS DE SÉCURITÉ : RÉFLEXION COMMUNE DANS UN TUNNEL : " PHASE PRÉLIMINAIRE - CONCEPTION - CONSTRUCTION - EXPLOITATION "

Comme il ne pouvait en être autrement, et considérant qu'un tunnel doit être envisagé conjointement à la " phase d'avant-projet - conception - construction - exploitation ", la directive européenne 2004/54/CE stipule sous le titre " Approbation du projet " que " Les dispositions de la présente directive s'appliquent à partir de la phase d'avant-projet ".

Dans cette idée de considération conjointe, lors de l'analyse des exigences de sécurité, ce qui a été fait dans la phase de conception est déterminant par rapport à ce qui a été fait pendant la construction (qui, pour diverses raisons, n'est pas toujours ce qui était prévu dans la conception), et tout cela en gardant toujours à l'esprit que le futur est la mise en service du tunnel. Chacune de ces phases nécessite une spécialisation.

Ce document présente différents aspects qui montrent l'importance d'une telle réflexion conjointe et les problèmes - dont certains sont coûteux ou pratiquement impossibles à résoudre - qui peuvent survenir si cette réflexion conjointe n'est pas menée.

Un exemple bien connu et très débattu dans certaines régions est la décision de terminer le tunnel sans revêtement final en béton, en utilisant la gunite pour la finition finale et/ou en utilisant des dalles pour la finition esthétique. Cette décision doit être évaluée dès le stade préliminaire, car la construction devra se faire dans un sens ou dans l'autre, de même que l'exploitation.

On peut en conclure que le responsable de la sécurité devrait être formé par une équipe de sécurité, une équipe qui devrait travailler en tant qu'équipe dès la phase préliminaire (comme indiqué dans la directive 2004/54/CE) et qui devrait être formée par des professionnels ayant une expérience reconnue dans la conception, la construction et l'exploitation, dirigée par un ingénieur général expérimenté, dans le but de prévoir les inconvénients futurs, augmentant ainsi la résilience et la durabilité du tunnel.

INTRODUCCIÓN.

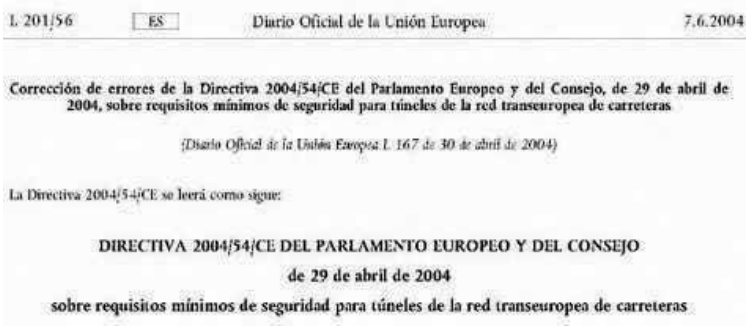
Un túnel es, sin duda, una de las obras más complejas que se deben acometer en la ingeniería de infraestructuras.

Los condicionantes geológicos hidrológicos y de todo tipo que es preciso resolver para llevar a buen término la obra suelen ser de gran envergadura y conllevan un coste importante.

Sobre estos aspectos se ha escrito y hablado mucho y en innumerables foros.

Los acontecimientos luctuosos acaecidos en los grandes e importantes túneles de Mont Blanc y Tauern a finales de la década de los 90 del pasado siglo, pusieron de relieve la importancia de la seguridad.

De la concienciación de la seguridad, se promulgaron distintas normativas, entre las que destaca la Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras (Figura 1).



L 201/56 ES Diario Oficial de la Unión Europea 7.6.2004

Corrección de errores de la Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras

(Diario Oficial de la Unión Europea L 167 de 30 de abril de 2004)

La Directiva 2004/54/CE se leerá como sigue:

DIRECTIVA 2004/54/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO

de 29 de abril de 2004

sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras

Figura 1. Requisitos Mínimos de Seguridad para Túneles de la Red Europea de Carreteras.[1]

LOS REQUISITOS DE SEGURIDAD EN TÚNELES.

La mencionada Directiva dice textualmente en su punto 9, justificativo de la norma: *"La seguridad de los túneles requiere una serie de medidas relacionadas, entre otros aspectos, con la geometría del túnel y su diseño, el equipamiento de seguridad, incluida la señalización vial, la gestión del tráfico, la formación de los miembros de los servicios de emergencia, la gestión de incidentes, la información dirigida a los usuarios sobre la mejor manera de actuar en un túnel, así como una mejor comunicación entre las autoridades responsables y los servicios de emergencia, tales como la policía, los bomberos y los equipos de rescate".*

Y continúa:

"Las medidas de seguridad permitirán que las personas afectadas por incidentes puedan ponerse a salvo; permitirán la intervención inmediata de los usuarios de la carretera para evitar mayores consecuencias; garantizarán la actuación eficaz de los servicios de emergencia y protegerán el medio ambiente y limitarán los daños materiales" (punto 11).

*"Con el fin de poner en práctica un planteamiento equilibrado y debido al elevado coste de estas medidas, se debería fijar un equipamiento mínimo de seguridad, teniendo en cuenta el tipo y el volumen de tráfico previsto de cada túnel" (*punto 13).

"Mantener un nivel elevado de seguridad requiere un correcto mantenimiento de los sistemas de seguridad de los túneles. Debe organizarse de modo sistemático, un intercambio de información entre los Estados miembros sobre técnicas modernas de seguridad y de datos relativos a accidentes e incidentes" (punto 15).

En el "Artículo 1, Objeto y ámbito de aplicación", explica que *"tiene por objeto garantizar un nivel mínimo de seguridad a los usuarios de la carretera en los túneles de la red transeuropea de carreteras mediante la prevención de situaciones críticas que puedan poner en peligro la vida humana, el medio ambiente y las infraestructuras de los túneles y mediante la protección en caso de accidente".*

Y su apartado 2 señala *"Será aplicable a todos los túneles de la red transeuropea de carreteras cuya longitud supere los 500 m, tanto si están en servicio como si se encuentran en fase de construcción o de proyecto".*

Atendiendo a esta regulación se entiende que los esfuerzos de conseguir un alto nivel de seguridad de los túneles se centran en disponer de los sistemas o instalaciones necesarias para poder actuar eficazmente en caso de incidente, y se refiere especialmente a la geometría del túnel, su diseño, y el equipamiento de seguridad.

LA SEGURIDAD EN LOS TÚNELES EN EL DÍA A DÍA.

En este Congreso se ha tratado de enfatizar el equipamiento y sistemas de seguridad instalados, o que es preceptivo instalar en los túneles, básicamente para dar cumplimiento a los requisitos normativos.

Es notorio que los túneles actuales se diseñan teniendo en cuenta todos los requisitos normativos y las mejores recomendaciones. En este sentido, la profusión de equipamiento y elementos tecnológicos que ayudan a tener un alto nivel de seguridad y de confort para el usuario, son evidentes.

Como es costumbre en estos tiempos de informatización, digitalización y algoritmos, se tiende a utilizar aparatos de muy última generación, en muchas ocasiones por el mero hecho de ser lo más novedoso.

Nada hay de malo en ello siempre que se haga con criterio.

No obstante, de igual forma que se realizan estudios para acometer de manera segura la perforación del túnel, y la estabilización del hueco, buscando la solución más rentable, económicamente, se echa en falta la realización de estudios para determinar de forma holística la mejor solución.

Esta afirmación puede parecer un tanto críptica, o incluso fuera de contexto. Se puede decir que ya se hacen los preceptivos estudios de tráfico, y se contemplan diferentes escenarios, etc. A nuestro juicio, avalado por años de explotación y operación de túneles, no es esto lo necesario.

OPERACIONES NORMALES EN EL TÚNEL.

Las operaciones normales en un túnel abarcan muchas y muy diversas tareas:

- Limpieza: Paredes, canalizaciones de drenaje separativo y de calzada.
- Sustitución/reparación de elementos de alumbrado.
- Mantenimiento de cámaras, calibrado de DAI.
- Calibrado de sensores.
- Mantenimiento de ventiladores.
- Mantenimiento/reparación de elementos de comunicación con usuario: Postes SOS, Megafonía.
- Comprobaciones de estado de cableado: potencia y comunicaciones/fibra óptica.

Son tareas periódicas. Forman parte de un elemento esencial en la operativa y en la seguridad del túnel: el Mantenimiento Preventivo, y la Reparación de Averías.

Para la realización de la mayor parte de ellas es necesario disponer de un espacio vital y de seguridad para los operarios. Este espacio puede comprometer el paso de los vehículos si la sección es angosta; aun cuando estas tareas se lleven a cabo en horas de muy poco tránsito, la seguridad exige que se disponga del espacio de seguridad. Por tanto, se está abocando a cerrar el túnel, si es bidireccional, o a cerrar un carril, en caso de un solo sentido de circulación.

En el caso de los túneles de nueva construcción, especialmente en los países de América Latina, parece que hay una tendencia a ser en régimen de concesión, la cual tiene exigencias estrictas de cumplimiento de los niveles de servicio, con penalizaciones importantes. Es fácil, pues, entender la gran importancia que conlleva que el diseño se realice con la vista puesta en la operación, y no en las posibles dificultades o mayores costes -siempre que sean razonables- durante la construcción.

EQUIPAMIENTO Y SISTEMAS DE SEGURIDAD.

En este Congreso, se ha tratado de enfatizar el equipamiento y sistemas de seguridad instalados, o que es preceptivo instalar en los túneles, básicamente para dar cumplimiento a los requisitos normativos.

Como es costumbre en estos tiempos de informatización, digitalización y algoritmos, se tiende a utilizar aparatos de muy última generación, en muchas ocasiones por el mero hecho de ser lo más novedoso.

Nada hay de malo en ello, siempre que se haga con criterio.

EJEMPLOS.

Seguidamente apuntamos algunos ejemplos relevantes relativos a la implantación de diversos sistemas de seguridad en los que hay que pensar con criterios claros desde los inicios.

Sección del túnel.

Es entendible, dentro de la adopción de roles distintos dentro de un proyecto de trazado y construcción, que la sección transversal, e incluso la pendiente, vengan determinados por las características geomecánicas del terreno a atravesar.

Como es natural, el coste de ejecución del túnel se verá incrementado por el tamaño de la sección libre, que, en numerosas ocasiones concluye con secciones estrictas, en las que "caben" los elementos de seguridad que, por normativa, son necesarios.

Una mayor sección no es fácilmente justificable a nivel presupuestario, visto solamente desde ese ángulo.

Pongamos un ejemplo:

- Una sección normal, de dos carriles de 3,5 m, con un arcén en el lado derecho de 2,5 m, y en el izquierdo de 1 m, y dos aceras de 0,75 m, da lugar a una plataforma de 12 m, que, en función de la geometría, hace una sección aproximada de 75 m^2 (Figura 2). Se dispone así, a todo lo largo del túnel de un espacio en el que cualquier vehículo pueda detenerse, sin interrumpir el tráfico, ni comprometer la seguridad.
- Otra sección bastante común es de dos carriles de 3,5 m., arcén derecho de 1,5 m, izquierdo de 0,5 m., y dos aceras de 0,75 m, que origina una plataforma de 10,5 m, y una sección de unos 67 m^2 (Figura 3).

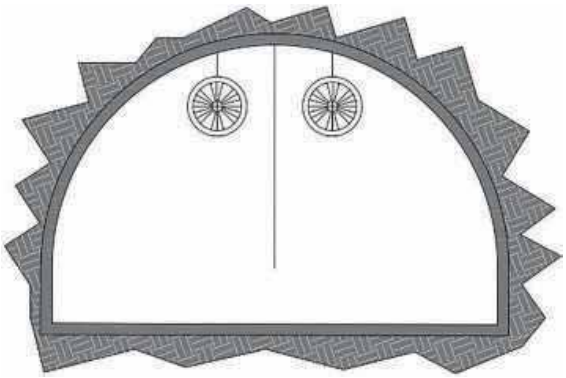


Figura 2. Plataforma de 12,00 m.

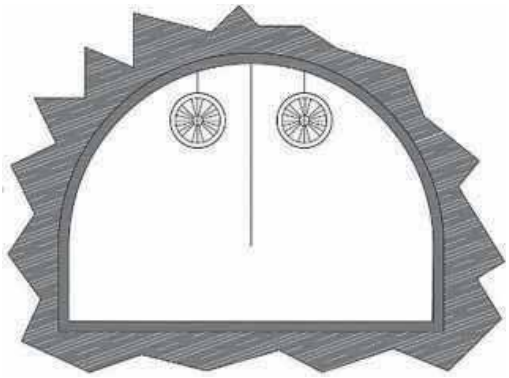


Figura 3. Plataforma de 10,50 m.

La diferencia entre ambas secciones es aproximadamente un 10% (Figura 4). Si bien el aumento de coste no es necesariamente en la misma proporción -y en un túnel de 1 km, puede ser importante-, este aumento de costes es completamente asumible, si se compara y se tienen en cuenta los costes de explotación.

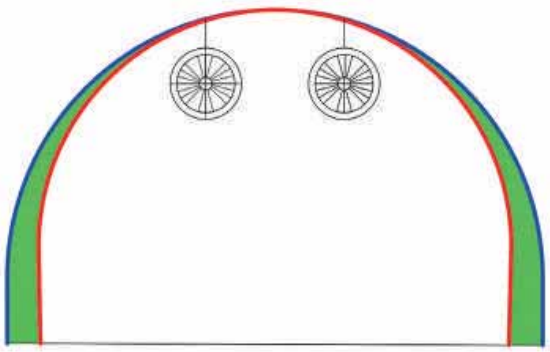


Figura 4. Diferencia entre ambas plataformas, manteniendo el mismo gálibo.

Galería de emergencia o evacuación.

Las galerías de emergencia o de evacuación son soluciones que posibilitan la rápida evacuación a pie -y en determinados casos también para vehículos de emergencias- asegurando de ese modo la protección de los usuarios en caso de emergencia, así como permitiendo el acceso de los equipos de auxilio. Son elementos de seguridad esenciales en un túnel. En el caso de túneles gemelos es frecuente que un tubo haga de galería de emergencia del adyacente. En la Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo se especifican los criterios para la implantación de las vías de evacuación y salidas de emergencia (punto 2.3).

Es frecuente que se construyan inicialmente túneles como bidireccionales (un solo tubo para ambos sentidos de circulación) por no existir tráfico que requiera su construcción como unidireccionales (un tubo para cada sentido de circulación), posponiendo su duplicación para cuando el tráfico ya exceda los límites señalados en la Directiva. En esos casos, también es frecuente que se construya una galería paralela a ese túnel, túnel que trabajará como bidireccional hasta que llegue el momento de su duplicación.

Es importante al construir el primer tubo (el que hemos dicho funcionará como bidireccional) tener previsto dónde se ejecutará el segundo tubo para cuando llegue el momento de duplicar con el fin de que, cuando eso se haga, esa galería que ya fue construida quede como galería de evacuación de ambos tubos, y ubicada entre ambos. Hay que contemplar la geología, reservar los terrenos para ello, etc. También puede decidirse

anular esa galería al ejecutar la duplicación y emplear un tubo como evacuación del gemelo. Cualquier solución que se decida debe ser prevista con anterioridad.

Además, dependiendo del tráfico previsto y su prognosis para años futuros, de la longitud del túnel, de los costes de construcción y financieros, riesgos y costes en la explotación, etc. es importante estudiar si es más ventajoso construir primero el túnel como bidireccional y posteriormente duplicarlo, o directamente construir los dos tubos. En ocasiones el túnel bidireccional requiere una cara ventilación transversal o semi transversal, una galería de evacuación…etc. Aspectos que hay que tener en cuenta al tomar la decisión.

Los esquemas de la siguiente figura (Figura 5) sintetizan los estudios que se hicieron en fase de diseño para un túnel en España, de 725 m de longitud, en el que los estudios de tráfico indicaban que a los 15 años se alcanzarían los 7500 veh/día/carril y, entonces, preceptivamente tendría que duplicarse según la normativa de España [2] (punto 2.1.2), que como sabemos es la transcripción de la Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. Del estudio de algunas alternativas se concluyó que era más ventajoso construir inicialmente los dos tubos para que el túnel operase con tráfico unidireccional.

Figura 5

Estudios en fase de diseño de la solución para las salidas de emergencia en un túnel en España.

- *Longitud de túnel 725 m.*
- *En 15 años tendrá que hacerse el segundo tubo pues se habrán superado los 7500 veh/día/carril (según la normativa de España, punto 2.1.2).*

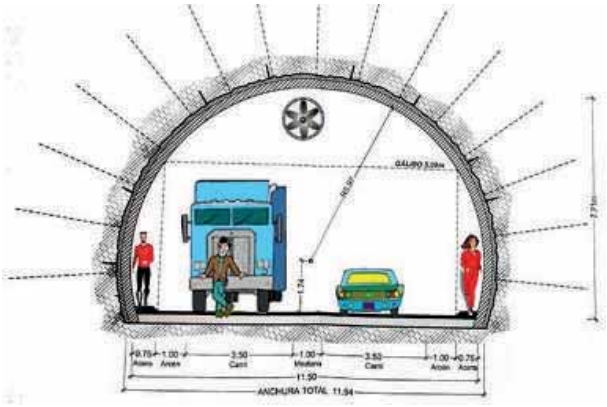


Figura 5a. Opción 1:

Túnel bidireccional, ventilación longitudinal, sin galería de emergencia (salida por las bocas).

OPCIÓN NO VÁLIDA por incumplir la distancia entre salidas de emergencia (debe ser cada 400 m según la normativa de España), que sería por las bocas (a 800 m).

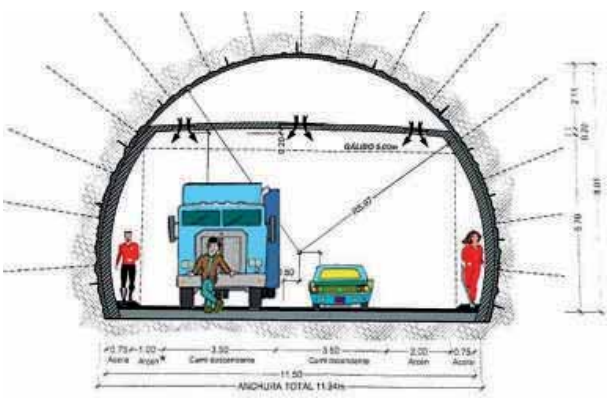


Figura 5b. Opción 2:

Túnel bidireccional, ventilación semitransversal reversible, sin galería de emergencia (salida por las bocas).

OPCIÓN NO VÁLIDA por incumplir la distancia entre salidas de emergencia (debe ser cada 400 m según la normativa de España), que sería por las bocas (a 800 m).

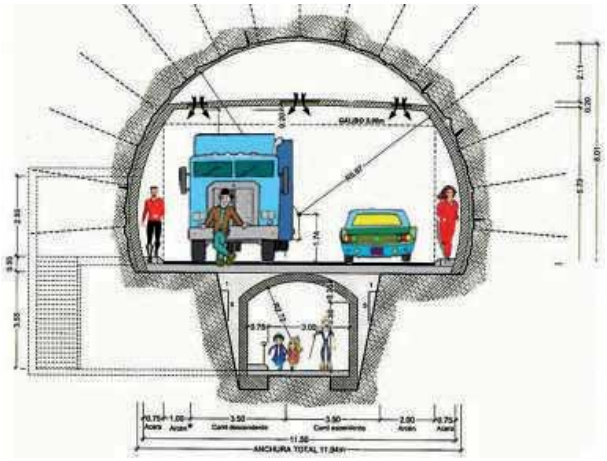


Figura 5c. Opción 3:

Túnel bidireccional, ventilación semitransversal reversible, galería bajo calzada con conexiones al túnel cada 400 m.

OPCIÓN VÁLIDA Coste relativo: 100%.

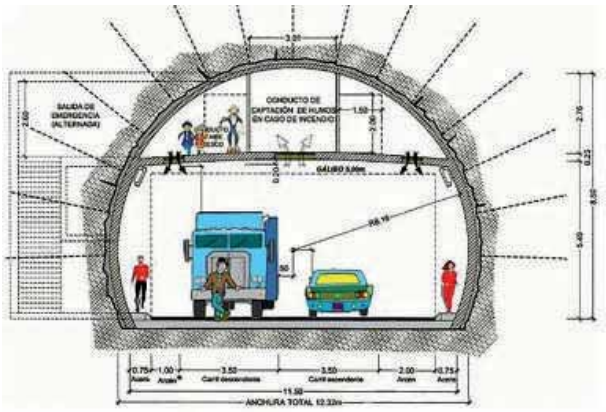


Figura 5d. Opción 2:

Túnel bidireccional, ventilación semitransversal reversible, sin galería de emergencia (salida por las bocas).

OPCIÓN NO VÁLIDA por incumplir la distancia entre salidas de emergencia (debe ser cada 400 m según la normativa de España), que sería por las bocas (a 800 m).

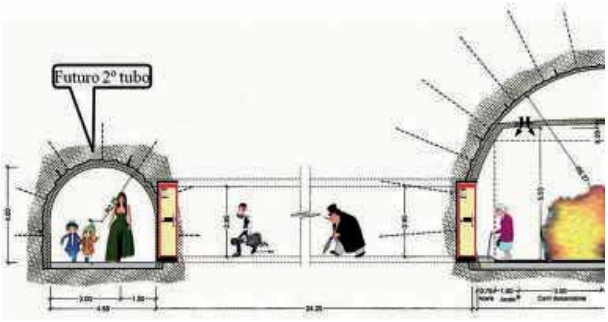


Figura 5e. Opción 5:

Túnel bidireccional, ventilación semitransversal reversible, galería paralela con conexiones al túnel cada 400 m.
OPCIÓN VÁLIDA Coste relativo: 107%.

Figura 5f. Opción 6: Solución diseñada y construida:

Tráfico unidireccional (dos tubos paralelos), ventilación longitudinal, galería de conexión entre tubos.

OPCIÓN VÁLIDA Coste relativo: 115%.

Drenaje.

Los sistemas de drenaje funcionan bien siempre que se puedan mantener limpios.

Es evidente que los que más cuerpos extraños reciben son los que recogen los vertidos a la calzada (Figura 6). Es necesario que se tenga esto en cuenta, en el diseño, para poder acceder a ellos para su limpieza, al igual que al depósito o balsa de recogida. Dicha balsa debe estar cubierta para no llenarse con el agua de lluvia. Ha de tener acceso digno y un espacio de maniobra para que un camión tanque pueda evacuar los vertidos.

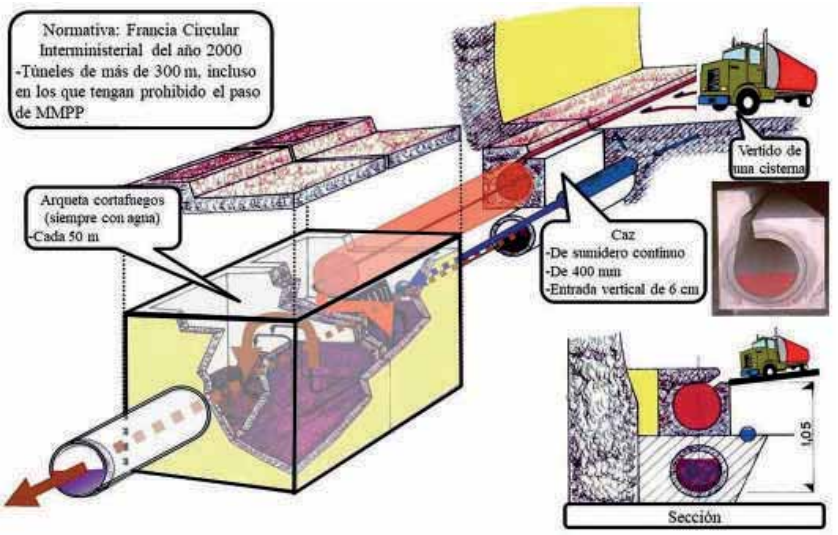


Figura 6. Sistema de evacuación de vertidos.[3]

En el caso de las aguas de filtración se debe tener muy presente el tipo de terreno atravesado. Los macizos calcáreos depositan concreciones de cal en los conductos que los hacen disminuir de sección dramáticamente. Por tanto, se debe prever la necesidad de arquetas ubicadas en lugares desde donde poder limpiar mecánicamente la calcificación, sin interrumpir o comprometer la circulación.

Igualmente, los tubos dren colectores de trasdós que recogen las aguas de la lámina de impermeabilización deben tener un sistema de acceso que posibilite su limpieza.

Revestimiento.

Es muy importante definir en el Diseño el tipo de revestimiento a emplear en el túnel, pues el sistema constructivo y los controles de calidad durante la construcción serán unos u otros.

Obviamente, no es admisible cambiar durante la fase de construcción de un revestimiento previsto de hormigón encofrado a otro de hormigón proyectado. El argumento de que se ahorra plazo para la finalización del túnel es hipotecar muy seriamente la vida de la estructura. El otro argumento de posponer para el futuro la construcción del revestimiento de hormigón encofrado es una entequia. El argumento de que se produce un ahorro en la construcción puede ser cierto, ahora bien, en el futuro será pagado con creces y habrá más de un disgusto. Los túneles son estructuras costosas y con ello hay que trabajar.

Los revestimientos de hormigón flexible, colocados por proyección (Figura 7), son, sin duda, mucho más baratos, pero su vida es más corta y, en todo caso requieren más mantenimiento, y tienen mayor riesgo de desprendimientos que los de hormigón encofrado, son difíciles de controlar (auscultar) su evolución con el tiempo, por lo que se recomienda el empleo del hormigón encofrado en cualquier caso (Figura 8).

Figura 7. Ejemplo de un túnel con revestimiento de hormigón flexible, colocado por proyección.

Figura 8. Ejemplo de túnel en construcción con revestimiento de hormigón encofrado realizado con cemento blanco.

Energía.

Todos los túneles son consumidores de energía, necesaria para alumbrado, ventilación, control, etc.

En general se tiende a proyectar Centros de Transformación, y Grupos electrógenos de emergencia con potencia suficiente y sobrada. No obstante, del mismo modo que se tiene en cuenta el máximo de potencia necesaria en el túnel, se muestra, en muchas ocasiones un menor cuidado en la ubicación de estos Centros.

El proyectista olvida que hay que mantenerlos, que los grupos electrógenos necesitan combustible, cambios de aceite en los motores, que puede ser necesario sustituir un transformador o un grupo electrógeno, para lo que se necesita una grúa pesada, y un espacio suficiente para las maniobras y acopios.

En ocasiones si se tiene en cuenta esto, pero se olvida hacer un camino adecuado para acceder con los medios necesarios. Por lo tanto, es conveniente que los proyectistas tengan una visión de cómo funcionan las cosas.

Alumbrado.

Generalmente es el mayor consumidor de energía en túneles no urbanos y o de congestión poco frecuente[4].

Se puede decir que los sistemas de alumbrado LED han permitido rebajar en gran medida este consumo, pero, sigue siendo importante. Además, no se debe olvidar que cuando más cara es la energía es cuando más se consume en un túnel.

Mantener limpias las luminarias mejora el rendimiento de forma muy significativa. Por otro lado, cuando se calcula el alumbrado, se deben tener en cuenta la reflexión de las paredes, de forma que, si estas se diseñan con elementos de alta reflectividad, como pueden ser paneles tipo vitrificado, o de hormigón blanco, o pintado en colores claros, se mejora mucho el rendimiento, y se pueden colocar menos luminarias. Es importante en este caso hacer saber a los responsables de la Operación los valores de diseño, para que éstos planifiquen bien los trabajos de mantenimiento y limpieza, e incluso que adaptan el alumbrado a esas nuevas condiciones -si es el caso- lumínicas del túnel. Resulta poco operativo, y en ocasiones es hasta contraproducente, colocar paneles que mejoren la reflectividad de las paredes una vez diseñado e instalado el sistema de alumbrado, dado que pueden originar condiciones indeseadas.

En cuanto a la ubicación de las luminarias, su limpieza, reparación, sustitución de lámparas o elementos de luz necesitan el concurso de sistemas de elevación. Disponer de espacio suficiente, como se comentó al hablar de la sección, es de suma importancia, dada la frecuencia que deben tener estas operaciones. Si se opta por emplear sistemas de alumbrado a contra flujo, es recomendable no disponerlos en el eje del túnel.

Ventilación.

Es uno de los sistemas más importantes.

La elección de un sistema de ventilación adecuado es vital. La ventilación longitudinal es, con mucho, la más utilizada en los túneles. Es barata, eficaz y segura, hasta cierto punto. Su mantenimiento es sencillo, y descolgar los ventiladores, es una operación que se realiza cada varios años. Pese a ello, la profusión de sensores de vibración, hacen que en ocasiones puedan quedar fuera de servicio sin una buena justificación, en especial en caso de emergencia.

Si se emplea una ventilación transversal o semitransversal (sistemas de ventilación cuya implantación ha de estar debidamente justificada), el diseño de los dampers y su motorización es fundamental, así como sus dimensiones han de estudiarse para minimizar en lo posible las pérdidas de carga. E igualmente ha de proyectarse el tabique de separación de los conductos de aire fresco y aire viciado para minimizar las necesidades de ventilación[5] .

Los sensores de detección de parámetros ambientales, CO, NO_x, Opacidad, Velocidad de aire en el túnel, han de seguir la idea de maximizar los lapsos de tiempo entre operaciones de calibrado y sencillez para poder realizarlas. No sirve de mucho tener el detector de ultimísima generación, si se ha de calibrar cada mes y además necesita un técnico especialista exclusivo del fabricante. Se debe pensar que disponer de valores con tres decimales no hace que el aparato sea mucho mejor para el trabajo que debe realizar. Posiblemente –seguro- no necesite más que el primer decimal, y a veces ni eso…

Circuito Cerrado de Televisión (CCTV) y Detector Automático de Incidencias (DAI).

Siendo esos sistemas "los ojos del operador" dentro del túnel, y el sistema de alerta temprana más eficaz del que se dispone, su importancia es incuestionable. Obviamente, se puede operar de forma segura el túnel sin disponer de estos sistemas, pero no es lo deseable.

De nuevo la ubicación de las cámaras con vistas a su mantenimiento y limpieza es importante, contraria con la ubicación óptima para su función que es normalmente en el eje de la calzada. Pero se debe tratar de colocar en puntos donde se tenga fácil acceso sin cerrar el túnel, y que su visión sea la mayor posible del túnel y elementos importantes: PMV, señales aspa flecha, ventiladores, etc.

SCADA.

El corazón de la seguridad del túnel, el Gran Hermano que todo lo controla.. El Scada es el sistema de gestión y automatización de incidencias que permite una operativa segura y eficaz del túnel, interactuando con los distintos elementos y subsistemas que en él estén instalados.

Tiene un cierto componente "críptico", y alejado de los mortales comunes. Los informáticos "programan" y hacen su voluntad en el Scada, solamente con las directrices de las normativas. Todo ello, eso si, muy "escalable" y dotado de "permisos" de acceso a determinadas funciones.

Se habla mucho de aplicaciones libres, no dependientes de las compañías instaladoras y de ITS, pero lo cierto es que realmente abierto, e independiente, no hay ninguno.

Actualmente se están implementando Scadas basados en wonderware, un software comercial, modular y de muy amplio espectro de aplicación. Ello debería ser condición suficiente para hacerlo "libre", aunque, obviamente, no así: se depende de las licencias de un software comercial, y el desarrollo de cada módulo tendrá el "sello" del informático que lo haga, con todas sus connotaciones.

Ello significa que los cambios y adaptaciones a nuevos elementos, tendrán que pasar por su "autor", o, como ya ha sucedido con alguna empresa española muy conocida. La sustitución (precio paso por caja, obviamente) de todo el aplicativo, dado que el autor del que había había dejado la compañía.

CONCLUSIONES.

Un túnel de una vía de comunicación "sólo" -y nada menos- que excavado, sostenido, impermeabilizado y revestido, como suele decirse, terminada la "obra civil", no será más que un "tubo estable excavado en un terreno", estando exento normalmente de las condiciones necesarias para poder abrirlo a la circulación vial para el que se construyó.

Si a ese "tubo" se le añade un cúmulo de los aparatos tecnológicos necesarios para la ventilación, el alumbrado, los circuitos de TV, los diversos tipos de detectores, etc., lo que se acostumbra a llamar "instalaciones o equipamiento", se habrá logrado ponerlo en condiciones algo más favorables para que por él pueda pasar el tráfico con seguridad.

Pero si la obra civil y las instalaciones no han sido concebidas conjuntamente desde la perspectiva del funcionamiento, -explotación u operación-, como conclusión se podrá tener algo parecido a un "tubo estable excavado, dotado de artilugios, por el que pasa el tráfico" (Figura 9).

Figura 9. Tubo estable excavado, dotado de artilugios, por el que pasa el tráfico.

En ese túnel las condiciones de la explotación estarán siempre marcadas por la falta de sintonía entre lo que se ha diseñado y su objetivo final, haciendo el trabajo de la explotación y del mantenimiento más arduo, complejo y costoso de que lo que sería necesario (Figura 10).

Una vez el túnel en servicio se inicia el largo período de la conservación (Figura 11) y explotación, teniendo durante ese tiempo que mantenerlo para que las condiciones sean las adecuadas para el paso del tráfico que motivó su construcción[6] .

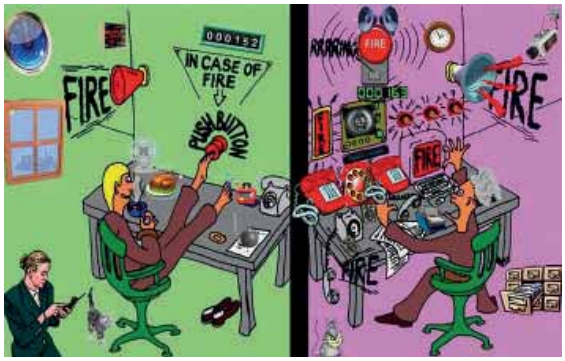


Figura 10. Puesta en marcha del sistema automático de emergencia[7].

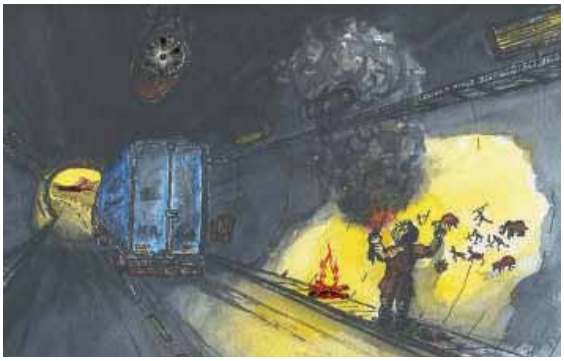


Figura 11. Los túneles tienen larga vida y así hay que pensarlos. (Hacar Rodríguez, Manuel P.)

Como apuntamos en la introducción, de lo expuesto se concluye que el Responsable de Seguridad (cuyas tareas o funciones están especificadas en la Directiva 2004/54/CE, "Artículo 6, El responsable de seguridad") debe estar formado por un Equipo de Seguridad.

Dicho Equipo de Seguridad ha de intervenir trabajando (en Equipo) desde la fase preliminar. Estará formado por profesionales con reconocida experiencia en el Diseño, Construcción y Explotación, capitaneado por un ingeniero generalista con experiencia, todo ello con el fin de predecir los inconvenientes futuros, aumentando, de ese modo, la resiliencia y la endurancia del túnel.

REFERENCIAS.

1. Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. Directiva 2004/54/CE: "Requisitos Mínimos de Seguridad para Túneles de la Red Europea de Carreteras". "DOUE, Diario Oficial de la Unión Europea". 7 de Junio de 2004.

2. Ministerio de Fomento. Requisitos Mínimos de Seguridad en los Túneles de Carreteras del Estado. Real Decreto 635/2006 de 26 de Mayo de 2006. B.O.E. de 27 de Mayo de 2006. Corrección de errores en el B.O.E. de 31 de Julio de 2006.

3. Ministere de L'Interieur; Ministere de L'Equipement des Transports et du Logement. Circulaire Interministerielle Nº 2000-63 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national. 25 de Agosto de 2000. [La Circular Interministerial Nº 2006-20 del 29 de Marzo de 2006 relativa a la seguridad de túneles de carreteras de longitud superior a 300 m anula a la del 25 de Agosto de 2000 a excepción del Anexo 2, que se mantiene en vigor (Annexe n° 2.- Instruction technique relative aux dispositions de securite dans les nouveaux tunnels routiers: Conception et Exploitation)].

4. Abella Suárez, Manuel Alberto; García-Arango Cienfuegos-Jovellanos, Ignacio; Hacar Rodríguez, Fernando. Eficiencia energética y ahorro de costes en instalaciones de túneles. Revista Rutas. Madrid. Nº 141. Noviembre-Diciembre de 2010.

5. Rey Llorente, Ignacio del; Fraile de Lerma, A.; Alarcón Álvarez, Enrique. Características y problemática de los tabiques de separación entre cantones en sistemas de ventilación de tipo (semi-) transversal. III Simposio Nacional de Túneles. Las nuevas tecnologías, métodos y soluciones aplicadas a la explotación de túneles. Pamplona (Navarra). 5 a 7 de Febrero de 2003. http://oa.upm.es/25993/1/Caracteristicas_y_problematica.pdf

6. Abella, Alberto; García-Arango, Ignacio; Hacar, Fernando. El Túnel: Un paso más en el camino (Seguridad, Normativa e Instalaciones). Fundación Ingeniería Técnica de Obras Públicas. C/ José Abascal, 20. 28003 Madrid. España. 2012. ISBN: 978-84-615-6491-0. EAN: 9788461564910. http://www.fitop.es/proyectos1.html
Abella, Alberto; García-Arango, Ignacio; Hacar, Fernando. Túneles de Carretera: Seguridad, Normativa, Instalaciones y Explotación. Publicación online. Junio de 2020. https://tunelescarreteros.wordpress.com/

7. Basado en Vardy, Alan; Wright, Kenyon. Emergency procedures and moral dilemmas. Tunnel Management International. Mayo de 1999.

13 AÑOS DE INFRUCTUOSO ESFUERZO POR MEJORAR LA SEGURIDAD EN TUNELES DE ELAVADA PELIGROSIDAD

Mikel Uriarte Toledo
Bombero (Gobierno de Navarra)

Por medio de este comunicado quiero dar voz a mis compañeros de rescate, a los treinta y uno Ayuntamientos de la comarca y a los miles de vecinos y usuarios que transitamos por estos túneles a diario, para dar a conocer y denunciar ante todos ustedes la negligencia del Gobierno de Navarra (España). Este Gobierno, consciente del elevado nivel de peligrosidad de sus túneles, incumpliendo la práctica totalidad de las disposiciones establecidas en la Directiva 2004/54/CE y muy lejos de adecuarlos a los mínimos exigidos por esta, no adopta ni una sola medida preventiva capaz de reducir el actual nivel de riesgo.

Son más de 13 años, en los que ni las continuas instancias, manifestaciones, estudios o propuestas, ni los innumerables accidentes e incidentes ocurridos, ni los pésimos resultados de los distintos análisis de riesgo, ni el expediente de infracción incoado por la Comisión Europea, han hecho que los responsables "tomen cartas" en el asunto, sin darse cuenta de la bomba de relojería que tiene entre manos.

Se expone:

1. Introducción
2. Contexto geográfico y problemática de la ruta (N 121A), características de los túneles, accidentes e incidentes significativos
3. Índices de riesgo
4. Incumplimientos de la Directiva 2004/54/CE
5. Medidas reductoras de riesgo propuestas
6. Cronología de instancias llevadas a cabo por bomberos y representaciones municipales

13 YEARS OF UNSUCCESSFUL EFFORTS TO IMPROVE SAFETY IN HIGH-RISK TUNNELS

Through this statement I want to give voice to my twenty-seven rescue comrades, to the thirty-one Town Halls of the region and to the thousands of neighbours and users who transit through these tunnels daily, to make known and denounce to you all the negligence of the Government of Navarre (Spain). The latter, aware of the high level of danger in its tunnels, in breach of virtually all the provisions laid down in Directive 2004/54/EC and far from bringing them into line with the minimum requirements laid down by that Directive, does not take a single interim/preventive measure capable of reducing the current level of risk.

They are more than 13 years, in which neither the continuous instances, manifestations, studies or proposals, nor the innumerable accidents and incidents occurred, nor the dismal results of the different risk analyses, nor the infringement dossier by the European Commission, have made those responsible "take action" in the matter, without realizing the time bomb they have in their hands.

I expose:

1. Introduction
2. Geographical and problematic context of the route (N 121A), tunnel characteristics, significant accidents and incidents
3. Risk indices
4. Breaches of Directive 2004/54/EC
5. Risk-reducing measures proposed
6. Chronology of instances carried out by firefighters and municipal representations

13 ANS D'EFFORTS INFRUCTUEUX POUR AMÉLIORER LA SÉCURITÉ DANS TUNNELS DE HAUTE RISQUE

Par ce communiqué, je veux donner la parole à mes vingt-sept compagnons de sauvetage, aux trente-et-une municipalités de la région et aux milliers de voisins et d'usagers qui transitent par ces tunnels chaque jour, pour faire connaître et dénoncer devant vous toute la négligence du Gouvernement de Navarre (Espagne). Celui-ci, conscient du niveau élevé de dangerosité de ses tunnels, en violation de la quasi-totalité des dispositions prévues par la directive 2004/54/CE et loin de les rendre conformes aux minima exigés par celle-ci, ne prend pas une seule mesure provisoire/préventive susceptible de réduire le niveau de risque actuel.

Il s'agit de plus de 13 ans, au cours desquels ni les instances, manifestations, études ou propositions continues, ni les innombrables accidents et incidents survenus, ni les mauvais résultats des différentes analyses de risque, ni le dossier d'infraction de la Commission européenne, ont poussé aux responsables à "prendre des mesures" en la matière, sans se rendre compte de la bombe à retardement qui se trouve entre ses mains.

J´expose :

1. Introduction
2. Contexte géographique et problématique de la route (N 121A), caractéristiques des tunnels, accidents et incidents significatifs
3. Taux de risque
4. Violations de la directive 2004/54/CE
5. Mesures de réduction des risques proposées
6. Chronologie des instances menées par les pompiers et les représentations municipales

1. INTRODUCCION

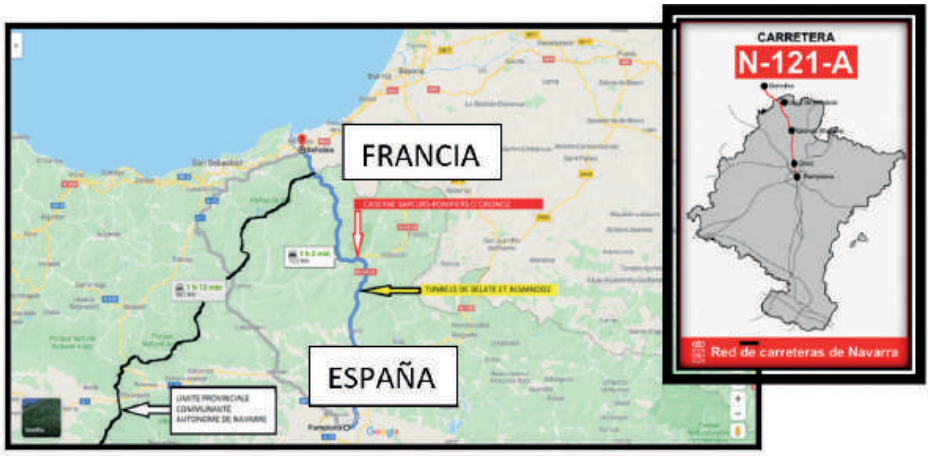
El objeto de esta información no es otro que mostrar de forma documentada nuestra preocupación y denuncia por la pasividad de la administración del Gobierno de Navarra ante la inseguridad que desde hace muchos años vivimos en esta carretera N 121A y sus túneles.

Bomberos de Oronoz (equipo de intervención que atiende la siniestralidad en esta carretera y sus 11 túneles) y la totalidad de los 31 Ayuntamientos de la comarca por la que atraviesa su trazado, han promovido durante más de 13 años todo tipo de acciones y demandas para intentar reforzar su seguridad.

Tramo de carretera de tan solo 68 Km, pero con una histórica alta tasa de mortalidad (más de 200 fallecidos y centenares de heridos graves en los últimos 30 años) y con 2 de sus túneles clasificados de "elevada peligrosidad". Actualmente, tras 18 años de aplicación de la Directiva 2004/54, y con un horizonte lejano de conseguir su adecuación a los mínimos exigidos por esta, el Gobierno de Navarra sigue sin adoptar ni una sola medida preventiva capaz de reducir el actual nivel de riesgo.

Los Análisis de Riesgos realizados para estos de estos 2 túneles en el año 2015, los túneles de Belate y Almandoz, determinaron que el desvío por la paralela e íntegramente desdoblada autovía A-15 del transporte de mercancías de "carácter internacional", es decir, sin origen ni destino en la comarca de la N 121A, sería suficiente para reducir notoriamente su inaceptable nivel de riesgo. Medida que, a su vez sin duda alguna, mejoraría las condiciones de circulación de esta ruta y serviría para la reducción de su tasa de mortalidad.

2. CONTEXTO GEOGRÁFICO Y PROBLEMÁTICA DE LA RUTA (N 121A), CARACTERÍSTICAS DE LOS TÚNELES, ACCIDENTES E INCIDENTES



Carretera nacional de Interés General de la Red de Carreteras de Navarra incluida en la red Global TEN-T.

Tiene una longitud de tan solo 68 km. Comunica Pamplona/Iruña (capital de la Comunidad Foral de Navarra) con la frontera con Francia en Behobia. La práctica totalidad discurre por la Comunidad Foral de Navarra, salvo 7 km en el tramo de Guipúzcoa (País Vasco).

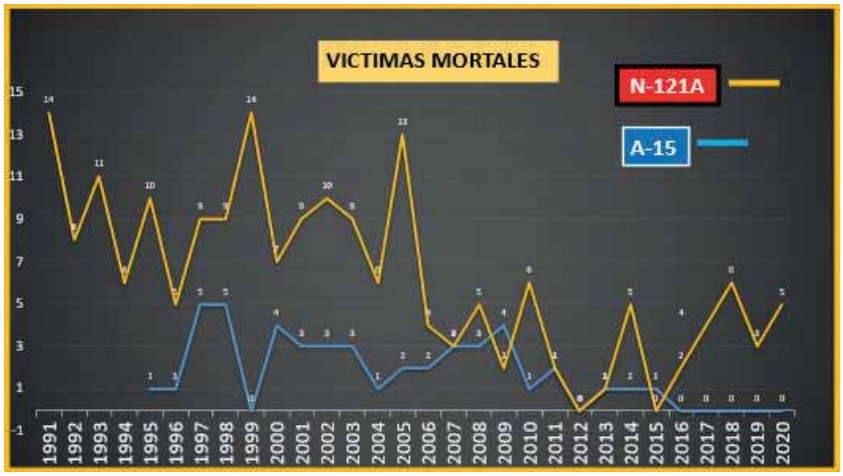
Vía catalogada por el Gobierno "de Altas Prestaciones", es paradójicamente la carretera con mayor índice de mortalidad de la historia de Navarra.

Un recorrido de circulación bidireccional, sinuoso y de climatología atlántica en buena parte, con una IMD de 11.000 vehículos y un alto porcentaje de vehículos pesados (30%). Los túneles de Belate y Almandoz, punto

medio del recorrido, registran índices que superan el 40% de vehículos pesados. Se estima que el 75% del volumen de estos vehículos pesados, son de carácter internacional, es decir sin origen ni destino en la comarca de la N 121A.

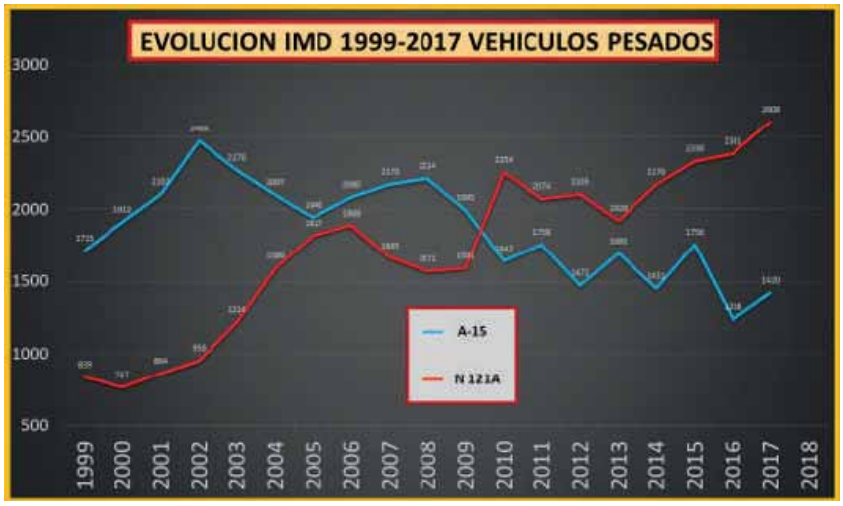
La solución a su alto índice de mortalidad ha hecho que durante décadas haya estado en boca de los distintos gobernantes con diferentes promesas, proyectos y estudios.

En la década de los 90 con la construcción de los túneles de Bera, Sunbilla, y algo más tarde los de Belate y Almandoz (1997) se intenta hacerla más segura y así atajar la altísima mortalidad que la acompañaba. A pesar de todo, cerca de 90 personas fallecieron en esa década con una media anual de 7 víctimas mortales.



La década del 2000 comienza con la construcción de los túneles de Larrakaitz y Arrigaztelu, para luego finalizar en 2009 con los túneles de Oieregi, Basataundi, Amixelaieta, Intxaurreta y Lamiarri, y mejorar así el trazado entre las localidades de Oronoz y la frontera con Francia. Todo ello rebajó la mortalidad, aunque no de la manera esperada, ya que se alcanzó la cifra de 70 fallecidos (media anual de 6 víctimas mortales).

Como fruto de esta mejora del trazado, la década de 2010 arranca con un espectacular trasvase del volumen de tráfico de vehículo pesado desde la A-15 a la N-121A. Trasvase que ha ido aumentando de año en año y en el que seguro que la crisis económica y el hecho de que una vía sea de pago y la otra no, han tenido mucho que ver. Tras la implantación de nuevos peajes en el tramo guipuzcoano de la A-15, en los primeros meses de 2018, el volumen de vehículos pesados de la N-121A casi triplica el de la autovía A-15. No se han reflejado más datos ya que han quedado desvirtuados por el posterior cierre de los túneles de Belate y Almandoz.



Aunque en esta década la siniestralidad en la N 121A parece que va a ser significativamente menor, no lo hace en la medida del resto de carreteras navarras, especialmente en sus homologas "carreteras de interés general", donde ya apenas se dan accidentes mortales.

En 2019 fallecen 3 personas. En 2020, en cuatro accidentes mortales, fallecen 5 vecinos de la comarca. En todos ellos se involucran vehículos pesados. Balances que no refleja del todo la actual situación de la N 121A si se toma en cuenta el potencial de los frecuentemente graves accidentes de que se producen de camiones articulados.

Posiblemente una buena solución para reducir la peligrosidad de este trazado sería su desdoblamiento. Medida que exige un largo plazo de ejecución, de altísimo coste impensable en la actual situación económica y que tal vez tampoco sea la más deseada por los habitantes de estos valles.

Con el fin de canalizar el transporte pesado de mercancías proveniente de y hacia Europa, se construyó en 1995 la paralela Autovía A-15, que comunica también Pamplona con la frontera francesa por un trazado alternativo íntegramente desdoblado.

Es por ello que, ante esta situación entendemos necesarias otros tipos de actuación, tipo gestión del tráfico, que independientemente de la disposición de partidas presupuestarias o de los plazos de realización, sean capaces de reducir la siniestralidad de manera urgente.

Sirvan de muestra las exitosas soluciones que de la mano del Ministerio de Fomento y la Dirección General de Tráfico se han aplicado en vías como las N II, N 240 y N 340 de Cataluña y N 232 de La Rioja desviando el tráfico de vehículos pesados por autovías o autopistas paralelas, siendo el sobrecoste creado para los transportistas bonificado allí donde ha hecho falta. Claros y exitosos ejemplos con una idéntica problemática que la de la N 121A, que hacen ver que muchos de los accidentes mortales se pueden evitar.

Medida que a la vista y según indican los análisis de riesgo, también serviría para reducir notablemente el alto nivel de peligrosidad de sus túneles.

Túneles

En este trayecto existen 11 túneles concentrados en un corto tramo de 40 km. Todos ellos bidireccionales, solo 4 superan los 500 metros. De estos cuatro túneles, dos son particularmente preocupantes, los de Almandoz y Belate. A pesar de su red de abastecimiento de agua (BIES), de su sistema de detección automática de incidentes (DAI), de su circuito cerrado de televisión, de su sistema de megafonía y de su centro de control permanente, sus longitudes de 1.200 y 3.000 metros, la falta de salidas de emergencia, su sistema de ventilación longitudinal simple, el deficiente tiempo de respuesta del servicio de rescate y extinción más próximo y su alto volumen de vehículos pesados, determinaron que ambos fueran catalogados de elevada peligrosidad.

A pesar de haberse llevado a cabo en el año 2018 ciertas modificaciones, el índice de riesgo de estos dos túneles no deja de empeorar. El porcentaje de vehículos pesados que los transitan, su principal factor de peligrosidad, no deja de aumentar respecto al año que fueron analizados (2015). Actualmente, a falta de datos del año 2021, en días laborables, los atraviesan diariamente una media de 4.000 vehículos pesados. Seguramente, los túneles bidireccionales con mayor tránsito de vehículos pesados de toda Europa.

Su acceso a las bocas norte tras una pronunciada pendiente de 7Km, tiene como consecuencia el sobrecalentamiento de los motores de vehículos registrándose un alto nivel de incidentes de carácter particularmente grave cuando se trata de vehículos pesados. Se han producido 2 incendios en su interior (uno de grandes dimensiones), 6 grandes incendios exteriores y más de 37 conatos de incendio interior con pérdida de visibilidad en el túnel por el humo causado.

3. ANALISIS DE RIESGO

Estos Análisis realizados en el año 2015 y ocultos hasta el 2016 (cambio de Gobierno) fueron reiteradamente recomendados, solicitados y reclamados por bomberos y ayuntamientos desde el año 2009.El Gobierno de Navarra se opuso y negó su necesidad.

El índice de riesgo del túnel de BELATE (IR = 3,605) y el de ALMANDOZ (IR= 2,309) también lo rebasa de forma amplia (2,309) rebasan ampliamente el peor de los índices marcado por la Metodología de Análisis de Riesgos española (1,5).

Catalogados de elevada peligrosidad según los criterios de aceptación de la metodología, requerirían la adopción de medidas complementarias para aumentar su seguridad y así poder mantenerse en servicio.

Con un horizonte bastante lejano para la realización del desdoblamiento planteado por el gobierno (2025) y sin partida presupuestaria para ello, hoy, 22 de mayo de 2022, todavía no se ha adoptado ni una sola medida reductora de este alto riesgo.

Deberíamos anotar que los resultados de los citados análisis podían haber sido aún más desfavorables si se hubiesen analizado factores no contemplados como:

- La proximidad entre ellos (2 km entre bocas)
- Su acceso tras una larga y pronunciada pendiente
- Incidentes y accidentes ocurridos
- Tránsito de mercancías peligrosas en invierno

- Ausencia de medidas relacionadas con el funcionamiento como:
  - Planes de respuesta a situaciones de emergencia (Sin modificar ni actualizar desde 2009).
  - Campañas de información para usuarios sobre seguridad y conductas (Ni una sola campaña en 15 años).
  - Las destinadas a reducir los riesgos relativas a todos o alguno de los vehículos que transportan mercancías peligrosas a través de túneles además de su necesario análisis de riesgo (No existen).
  - Realización de ejercicios y simulacros (Solo se han llevado a cabo 2 contra los 16 que marca la Directiva.

4. INCUMPLIMIENTOS DE LA DIRECTIVA 2004/54

En los 18 años de aplicación de esta Directiva, el Gobierno de Navarra no ha cumplido ni una sola de las disposiciones abajo enunciadas, es decir, prácticamente ninguna de las establecidas (salvo los anteriormente citados Análisis de Riesgo). Solo, y a raíz del expediente de infracción emitido por la CE en octubre de 2019, comienza el desarrollo de su adecuación.

Considerandos

(22) Los Estados miembros deben presentar a la Comisión un informe sobre las medidas que piensan adoptar para cumplir los requisitos de la presente Directiva, con el fin de sincronizar las obras a escala comunitaria y poder, de este modo, reducir las perturbaciones del tráfico. NO HUBO INFORMES

Artículo 4 (Autoridad administrativa)

6. La autoridad administrativa garantizará que se realicen las siguientes tareas:

   a) comprobar e inspeccionar los túneles con regularidad y elaborar los requisitos de seguridad pertinentes; NO LO REALIZA

b) establecer los planes de organización y de funcionamiento (incluidos los planes de respuesta a situaciones de emergencia) para la formación y el equipamiento de los servicios de emergencia; PLANES DESFASADOS SIN ACTUALIZAR DESDE 2009

d) poner en práctica las medidas de reducción del riesgo que resulten necesarias NO EXISTEN MEDIDAS REDUCTORAS DE RIESGO

Artículo 5 (El gestor del túnel)

3. Cualquier incidente o accidente significativo que ocurra en un túnel será objeto de un informe de incidencias elaborado por el gestor del túnel. Dicho informe se transmitirá al responsable de seguridad mencionado en el artículo 6, a la autoridad administrativa, así como a los servicios de emergencia, en el plazo máximo de un mes. NO SE TRASMITEN

Artículo 6 (El responsable de seguridad)

2. El responsable de seguridad realizará las siguientes tareas o funciones:

a) asegurar la coordinación con los servicios de emergencia y participar en la preparación de los planes de actuación; NO LO REALIZA

b) participar en la planificación, puesta en práctica y evaluación de las operaciones de emergencia; NO LO REALIZA

d) verificar la formación del personal del túnel y de los servicios de emergencia y participar en la organización de simulacros, que se realizarán periódicamente; NO LO HACE

Artículo 11 (Túneles que ya están en servicio)

1. Por lo que respecta a los túneles que estén abiertos a la circulación pública a más tardar el [...] *, la autoridad administrativa tendrá hasta el [...] ** para valorar si el túnel cumple los requisitos de la presente Directiva, con referencia específica a la documentación de seguridad a que se refiere el Anexo II y basándose en una inspección. NO SE REALIZÓ

2. Si es necesario, el gestor del túnel propondrá a la autoridad administrativa un plan para adaptar el túnel a las disposiciones de la presente Directiva, junto con las medidas paliativas que tenga intención de aplicar. NO HAY PLAN ALGUNO

3. La autoridad administrativa dará su aprobación a las medidas paliativas o pedirá que se modifiquen. NO EXISTEN MEDIDAS PALIATIVAS

4. Posteriormente, si las medidas paliativas incluyen cualquier tipo de modificación sustancial de la construcción o del funcionamiento, una vez tomadas estas medidas, se aplicará el procedimiento que figura en el Anexo II. NO EXISTEN TALES MEDIDAS

5. Los Estados miembros presentarán, a más tardar el [...] *** a la Comisión un informe sobre el modo en que tienen previsto cumplir los requisitos de la presente Directiva, sobre las medidas previstas y, cuando proceda, sobre las consecuencias de la apertura o clausura de las principales vías de acceso a los túneles. A fin de reducir al mínimo las perturbaciones del tráfico a escala europea, la Comisión podrá hacer comentarios sobre el calendario de las obras destinadas a dar cumplimiento a esta Directiva. NO LO PRESENTA

Artículo 12 (Inspecciones periódicas)

1. La autoridad administrativa verificará que el organismo de inspección realiza inspecciones periódicas para asegurarse de que todos los túneles sujetos a la presente Directiva cumplen sus disposiciones. NO SE REALIZAN

2. El período entre dos inspecciones consecutivas de un determinado túnel no será superior a seis años. NO SE REALIZAN

3. Cuando, a tenor de un informe del organismo de inspección, la autoridad administrativa compruebe que un túnel no cumple lo dispuesto en la presente Directiva, comunicará al gestor del túnel y al responsable de seguridad que han de adoptarse medidas para incrementar la seguridad del túnel. La autoridad administrativa determinará las condiciones que deberán aplicarse, hasta que haya concluido la aplicación de las medidas paliativas, para que el túnel siga funcionando o para su reapertura, así como las demás restricciones o condiciones pertinentes. NO SE REALIZA

Artículo 15 (Informes)

1. Cada dos años, los Estados miembros elaborarán informes sobre accidentes e incendios en túneles que claramente afecten a la seguridad de los usuarios, así como sobre la frecuencia y las causas de dichos incidentes, los evaluarán y proporcionarán información sobre la función y eficacia reales de las instalaciones y medidas de seguridad. Remitirán dichos informes a la Comisión antes del fin del mes de septiembre del año siguiente al periodo sobre el que versen. La Comisión pondrá esos informes a disposición de todos los Estados miembros. NO LOS HACE

2. Los Estados miembros establecerán un plan que incluya un calendario para la aplicación por etapas de las disposiciones de la presente Directiva a los túneles que ya estén en servicio, tal como se describe en el artículo 11, y lo comunicarán a la Comisión a más tardar el […] *. Posteriormente los Estados miembros informarán a la Comisión cada dos años acerca del estado de aplicación del plan y de las posibles adaptaciones del mismo, hasta que finalice el período a que se refieren los apartados 6 y 7 del artículo 11. NO LO ESTABLECE

Artículo 18 (Incorporación al Derecho nacional)

1. Los Estados miembros adoptarán las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas necesarias para dar cumplimiento a lo establecido en la presente Directiva a más tardar el [...] *. Comunicarán de inmediato a la Comisión el texto de estas disposiciones, así como un cuadro de correspondencias entre estas disposiciones y la presente Directiva. NO LO REALIZA

1. BASES PARA DECIDIR LAS MEDIDAS DE SEGURIDAD (Anexo 1)

1.1.3 Cuando un túnel tenga características especiales en lo que se refiere a los parámetros antedichos, deberá llevarse a cabo un análisis del riesgo de conformidad con el artículo 13 para establecer si son necesarias medidas adicionales de seguridad o equipamiento complementario para garantizar un alto nivel de seguridad del túnel. Dicho análisis del riesgo tomará en consideración los posibles accidentes que afecten claramente a la seguridad de los usuarios de los túneles y que puedan ocurrir durante la fase de funcionamiento, así como la naturaleza y magnitud de sus posibles consecuencias. NO SE REALIZAN HASTA 2015

1.3.2 Cuando el número de camiones de más de 3,5 toneladas supere el 15 % de la media anual de tráfico diario, o cuando un tráfico diario de temporada supere significativamente la media anual de tráfico diario, el riesgo adicional se evaluará y se tendrá en cuenta incrementando la cifra de volumen de tráfico en el túnel para la aplicación de los puntos siguientes. NO SE EVALUA

2.9.3 La ventilación longitudinal se utilizará únicamente en los túneles con circulación bidireccional o unidireccional congestionada si un análisis del riesgo conforme al artículo 13 muestra que es aceptable, o si se toman medidas específicas, tales como una apropiada gestión del tráfico, una reducción de la distancia entre salidas de emergencia y la colocación de extractores de humo a intervalos. NO SE TOMAN MEDIDAS

3.2 Planificación de emergencia. Deberá haber planes de respuesta a situaciones de emergencia para todos los túneles. Respecto de los túneles que empiezan y terminan en distintos Estados miembros, ambos países participarán en un único plan binacional de respuesta a situaciones de emergencia. CADUCO Y DESFASADO DESDE 2009

3.4 Respuesta a accidentes e incidentes

El tiempo de acceso de los servicios de emergencia en caso de incidente dentro de un túnel será lo más breve posible y se medirá en ejercicios periódicos. Podrá, además, medirse durante los incidentes. En túneles bidireccionales importantes con gran volumen de tráfico, se determinará, mediante un análisis del riesgo conforme al artículo 13, si deben situarse servicios de emergencia en los dos extremos del túnel. NO SE REALIZA

3.7 Transporte de mercancías peligrosas

- realizar un análisis del riesgo de conformidad con el artículo 13 antes de definir o modificar la reglamentación y los requisitos relativos al transporte de mercancías peligrosas a través de un túnel; NO SE REALIZAN

- estudiar medidas específicas de funcionamiento destinadas a reducir los riesgos relativas a todos o alguno de los vehículos que transportan mercancías peligrosas a través de túneles, como una declaración antes de entrar en los mismos o la formación de convoyes con vehículos de escolta, teniendo en cuenta cada caso particular, además del mencionado análisis del riesgo. NO SE ESTUDIAN

4. Campañas de información

Periódicamente, se organizarán y llevarán a la práctica conjuntamente con las partes interesadas campañas de información sobre la seguridad en los túneles, tomando como base los trabajos armonizados de las organizaciones internacionales. NO SE ORGANIZA NI UNA SOLA

APROBACIÓN DEL PROYECTO, DOCUMENTACIÓN DE SEGURIDAD, AUTORIZACIÓN DE UN TÚNEL, MODIFICACIONES Y SIMULACROS PERIÓDICOS (ANEXO II)

5. Simulacros periódicos

El gestor del túnel y los servicios de emergencia organizarán, en cooperación con el responsable de seguridad, simulacros periódicos conjuntos para el personal del túnel y los servicios de emergencia. NO SE ORGANIZAN

a) Se efectuarán simulacros en cada túnel a escala natural en las condiciones más realistas posible al menos cada cuatro años. Sólo se requerirá el cierre del túnel si pueden adoptarse medidas aceptables para desviar el tráfico. Se efectuarán ejercicios parciales y/o de simulación todos los años intermedios. En las zonas en que existan túneles próximos unos a otros, se deberá efectuar el simulacro a escala natural en al menos uno de esos túneles. SOLO UN SIMULACRO SIN CASO A SUS PROPUESTAS

5. MEDIDAS REDUCTORAS DE RIESGO PROPUESTAS

Tal y como señalaron los análisis y los estudios de ventilación llevados a cabo en el año 2013, las actuales medidas de seguridad, es decir, el tiempo de respuesta de las dotaciones del Parque de Oronoz y Pamplona, y todo el conjunto de medidas dispuestas por las instalaciones y los equipamientos de los túneles así como las actuaciones proporcionadas desde sus centros de control, hoy por hoy no garantizan el control de los daños que se puedan producir en la infraestructura ni de la situación a la que se pueden enfrentar los usuarios ante los riesgos que se puedan derivar principalmente en caso de incendios de grandes proporciones.

Dado que las condiciones de circulación y seguridad en estos han variado con respecto a las determinadas por los estudios, (aumento del número de vehículos, obras de adecuación realizadas en 2018, etc.) y que las medidas que a continuación se proponen no se prevén suficientes para garantizar el elevado nivel de seguridad requerido, parece conveniente y necesario reanalizar el actual nivel de seguridad de estos túneles y analizar otras posibles alternativas que se puedan poner en práctica a corto plazo a tal fin.

- Actualizar el Plan de Emergencias de Túneles de Carreteras de Navarra

  El Plan de Emergencias para los túneles de carretera de Navarra debe actualizarse. Los cambios introducidos en las estrategias de ventilación en caso de incendio, la autoprotección dirigida a los usuarios, la puesta en servicio de nuevos túneles en la N 121A y la A-21, las reformas y mejoras llevadas a cabo en otros tantos, los cambios en la gestión de las emergencias, etc., todavía no se han incorporado al plan anterior. No se ha actualizado desde el año 2009.

- Mejorar la respuesta de los servicios de emergencia

  Se debería analizar si deben situarse servicios de emergencia en los extremos de los túneles.

  En el caso de incendios en túneles, ser recomienda que la actuación de los equipos de extinción esté por debajo de los 10 primeros minutos. Según las isócronas establecidas en 2009 en el simulacro llevado a cabo en el túnel de Belate, la actuación de las dotaciones más cercanas no rebaja los 20 minutos.

- Establecer sistemas que procuren la distancia de seguridad entre vehículos y reducir la velocidad a 70 km/h

  Se trata de reducir el número de vehículos expuestos al incendio, lo que puede tener otra lectura: el túnel es seguro hasta una determinada intensidad de tráfico, particularmente si funciona en régimen bidireccional.

- Realizar un análisis del riesgo y estudiar medidas específicas de funcionamiento destinadas a reducir los riesgos relativas a todos o alguno de los vehículos que transportan mercancías peligrosas a través de estos túneles
- Organizar y divulgar campañas de información dirigidas a los usuarios sobre la mejor manera de actuar en un túnel
- Analizar el riesgo del volumen y tipo de tráfico, particularmente el de pesados.

  Como medida que puede reducir a corto plazo el nivel de alto riesgo determinado, los análisis indicaron que bastaría con desviar los camiones de carácter internacional" a la paralela autopista A-15 para aproximarse significativamente al nivel de seguridad exigido por la normativa europea Sólo con esta medida se reduciría la tasa de riesgo de manera que la inseguridad del túnel de Almandoz sea provisionalmente soportable, y al alcance la de Belate en caso de complementar con otras pequeñas medidas comunes en otros túneles europeos.

  Este desvío del transporte internacional propuesto no sólo reduciría ese nivel de peligro de manera inminente. A su vez, y sin duda alguna, aliviaría y reduciría el tráfico y la alta siniestralidad en el resto del trazado. Medida reiteradamente y de forma unánime reclamada por los habitantes de la comarca a través de sus ayuntamientos.

- Canales de radio para transmitir mensajes de emergencia.
- Establecer un programa de realización de ejercicios y simulacros dirigido a la mejora de la coordinación de los distintos servicios implicados y a la evaluación de la efectividad de las medidas de seguridad y los protocolos de actuación establecidos.

6. CRONOLOGIA Y ACCIONES LLEVADAS A CABO POR BOMBEROS Y AYUNTAMIENTOS

Toda la información y acciones que se enuncian a continuación están rigurosamente documentadas en un dossier que recopila 43 archivos. Quedan a disposición de cualquier interesado a través del correo mikeu@hotmail.es

AÑO1997

Se ponen en servicio los túneles de Belate y Almandoz

Personas fallecidas en la carretera N 121A: 9

AÑO 1999

IMD vehículos en los túneles: 4261 (19 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 14

AÑO 2004

IMD vehículos en los túneles: 6343 (25,1 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 6

AÑO 2005

IMD vehículos en los túneles: 6781 (26,8 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 13

AÑO 2006

IMD vehículos en los túneles: 6874 (27,5 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 4

El Gobierno de España aprueba el RD 635/2006 de 26 de mayo para regular los requisitos mínimos de seguridad para los túneles de la Red de Carreteras del Estado.

Mientras, el Gobierno de Navarra*, titular y de cuya competencia es toda la red viaria de su territorio, no adopta ninguna base jurídica reguladora de mínimos de seguridad.

*Con arreglo a su régimen foral (Ley Foral 5/2007 de 23 de marzo), la Comunidad Foral de Navarra, es titular, con facultades y competencias plenas sobre toda la red de carreteras que discurre por su territorio.

En acuerdo a lo dispuesto por la Directiva 2004/54/CE, el Gobierno de Navarra si aprueba por un periodo de 3 años, 2006-2009, el Plan de Emergencias para Túneles de la Red de Carreteras de Navarra (PETNA).

AÑO2007

IMD vehículos en los túneles: 6266 (26,6 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 4

AÑO 2008

IMD vehículos en los túneles: 6591 (23,8 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 5

A los ya existentes 7 túneles bidireccionales de la N 121A, se van a sumar otros 4 nuevos túneles debido a las obras de mejora de su trazado.

En virtud de los dispuesto en la Directiva 2004/54 así como en el PETNA (Plan de Emergencias para Túneles), el 25 de mayo, el jefe del Servicio de Bomberos de Oronoz solicita

al Departamento de Obras Públicas y Transportes del GN la realización de un simulacro, visitas y revisiones de las instalaciones, hasta entonces nunca realizadas. El mes de setiembre se permitió a Bomberos de Oronoz la visita de los sistemas de extinción del túnel de Belate.

AÑO 2009

IMD vehículos en los túneles: 7176 (22,2 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 2

Año en el que se prevé el fin de las obras de mejora de trazado de la N 121A y con ello un significativo aumento del tráfico, particularmente el de vehículos pesados.

En el mes de junio, Bomberos de Oronoz solicita poder probar de los equipos de extinción del túnel de Belate.

Ante las deficiencias detectadas en los sistemas extinción del túnel de Belate, Bomberos de Oronoz solicita su subsanación e insiste en la conveniencia de realizar un simulacro en este túnel. Esta vez se solicita a la Dirección de la ANE (Agencia Navarra de Emergencias del Gobierno de Navarra).

Tras diversas reuniones entre las direcciones de la ANE, del Departamento de Obras Públicas y de la empresa explotadora SICE, el simulacro se lleva a cabo en octubre en el túnel de Belate, pocos días antes de la inauguración del nuevo trazado de la N 121A.

A pesar de existir otros 10 túneles, hasta la fecha de hoy (mayo 2022) no se ha vuelto a realizar ningún otro simulacro ni ejercicio conjunto con otros servicios.

En las conclusiones del simulacro la Agencia Navarra de Emergencias y Bomberos de Oronoz proponen entre otras las necesidades de:

- Modificación del PETNA 2006 (Plan de Emergencias Túneles de Navarra) y sus pautas de ventilación
- Establecer medidas encaminadas a la protección de los usuarios por parte de la empresa explotadora
- Disponer medidas especiales para el tránsito de vehículos con transporte de mercancías peligrosas (MMPP)
- Realizar campañas divulgativas para usuarios del comportamiento a adoptar ante situaciones de emergencia
- Realización de Análisis de Riesgos que determinen el nivel de seguridad de estos túneles

Salvo los Análisis de Riesgo (realizados 6 años más tarde), ninguna de las otras propuestas se ha llevado a cabo en los posteriores 10 años.

Se adjuntan también las conclusiones aportadas por el Departamento de Obras Públicas y Transportes, la empresa explotadora SICE, y la empresa SEOPRIN encargada de realizar las pruebas de ventilación.

De estas cabría destacar la necesidad de:

- Modificar la forma en que se viene actuando con el sistema y la estrategia de ventilación en caso de incendio
- Incluir el uso de la megafonía dentro del Plan de Actuación en caso de incendio

AÑO 2010

IMD vehículos en los túneles: 7966 (26,2 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 6

Se confirma el aumento de vehículos pesados que transitan por la "nueva" N 121A. Según el aforo de la estación de los túneles de Belate, en el mes de abril se registra un tránsito diario de 2.400 vehículos pesados por sus dos túneles (Belate y Almandoz). La media anual de los años 2007, 2008 y 2009 no superaba los 1.600 vehículos pesados diarios.

Repunta la siniestralidad en esta carretera. Seis personas fallecen en distintos accidentes. En 5 de ellos se vieron involucrados vehículos pesados.

También aumentan los incidentes en las cercanías e interiores de los túneles en los que se ven implicados este tipo de vehículos. Debido a la pronunciada pendiente de acceso a estos, el sobrecalentamiento de sus motores produce frecuentes conatos de incendio en sus interiores, generalmente por la rotura de los turbos de sus motores. Sin llegar a derivar en incendios, las situaciones son de gravedad debido a la densa nube de humo producida capaz de anular la visibilidad de los usuarios. En estas incidencias no se alarma a bomberos.

Ante esta situación y al no haber adoptado el Departamento de Obras Públicas del Gobierno ninguna de las medidas propuestas tras el simulacro, el mes de mayo Bomberos de Oronoz muestra su preocupación a su Dirección quien solicita una reunión al Departamento de Obras Públicas.

Esta se realiza el mes de julio con el responsable de seguridad de la empresa explotadora de los túneles SICE. Como resumen del acta de esta reunión cabe destacar:

- SICE no modificará las pautas de ventilación salvo que se modifique el PETNA (Plan de Emergencias Túneles de Navarra)
- Compromiso de SICE para:
    - Subsanar deficiencias materiales
    - Estudiar mejoras de equipamientos propuestas
    - En adelante alertar al 112 (centro de coordinación de emergencias) para incidencias que afecten al trafico
- SICE no estima necesarias otras medidas ni actuaciones previas a la finalización del plazo dictado por la Directiva 2004/54/CE
- Imposibilidad técnica del uso de la megafonía desde CCCC Pamplona

AÑO 2011

IMD vehículo en los túneles: 7188 (28,8 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 3

El 8 de julio se produce el incendio de un vehículo pesado en el interior del túnel de Belate (a 150 metros de la entrada norte). Incendio de grandes dimensiones cuyas circunstancias favorecieron la ausencia de víctimas, pero sí grandes daños materiales y colaterales. Más de dos meses de desvío de tráfico y 1.150.000 euros de reparaciones.

A pesar de que celebraron reuniones en el intento de analizar las actuaciones de los distintos servicios en el incendio, Bomberos de Oronoz entiende que el análisis, la valoración y propuestas de mejora ante un incendio de tal magnitud quedaron casi sin realizar. No se analizaron las imágenes grabadas por el CC de TV, no hubo informes de las actuaciones realizadas por los operarios de los Centros de Control de Belate y Pamplona, ni de otras circunstancias como las actuaciones de usuarios y asistencia del explotador, causas y consecuencias del incendio, el tiempo de resistencia de los distintos sistemas y materiales, etc.

Ante la alarma e inquietud generada por el incendio entre los habitantes de la zona y ante la falta de organización de campañas de información sobre seguridad en túneles que aborden el correcto comportamiento de los usuarios, en el mes de septiembre Bomberos de Oronoz entregan a todos los Ayuntamientos de la comarca, un informe de riesgos y seguridad junto con una guía de conductas.

El interés mostrado por los consistorios hace que convoquemos una reunión para el mes de noviembre con el fin presentar la misma información, pero de manera más gráfica y poder aclarar dudas al respecto.

En un comunicado recibido el jueves 10 noviembre, la Gerencia de la Agencia Navarra de Emergencias (ANE), desautorizó a Bomberos de Oronoz a llevar a cabo esta reunión invitándonos a desconvocarla. Por evitar enfrentamientos y expedientes de la Dirección, se decidió desconvocar la reunión con los Ayuntamientos.

AÑO 2012

IMD vehículos en los túneles: 6992 (30,1 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 0

En respuesta a la desconvocatoria de la reunión con Bomberos, en el mes de enero distintos Ayuntamientos solicitan a la Dirección de la Agencia Navarra de Emergencias (ANE) autorización expresa para reunirse con los Bomberos del parque de Oronoz con objeto de conocer su opinión respecto a las medidas de seguridad en los túneles de Belate y Almandoz.

Desde la ANE se accede a la solicitud y son varias las reuniones que se producen entre representantes de las administraciones locales y distintos responsables de Bomberos.

Como fruto de estas reuniones, se acuerda el promover las acciones necesarias para la edición y divulgación de una guía informativa de comportamientos adecuados.

AÑO 2013

IMD vehículos en los túneles: 6520 (29,5 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 2

A lo largo del año se siguen produciendo distintas reuniones entre el Servicio de Bomberos y los Ayuntamientos con el objetivo de editar guías de conductas en túneles. A estas se incorporan responsables de Protección Civil. Se propone la realización de un tríptico.

El Gobierno de Navarra encarga un estudio para el diseño de algoritmos de ventilación para los túneles de Belate, Almandoz y su propuesta de incorporación al PETNA.

El estudio de la empresa Idom revela que salvo que se implante el algoritmo al completo descrito en su escenario 4, "no existirían garantías de que, una vez el incendio alcance su situación estable (aproximadamente 7 minutos desde el inicio), estos humos se mantengan estratificados".

AÑO 2014

IMD vehículos en los túneles: 7425 (29,2 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 7

Repunte de la siniestralidad en la carretera. Fallecen 7 personas.

El Servicio de Protección Civil elabora un tríptico de equipamientos de seguridad y conductas a adoptar por los usuarios para los túneles de la N 121A. Este no cuenta con la conformidad ni de Bomberos de Oronoz ni de los Ayuntamientos.

Se registran diversas comparecencias del consejero de Fomento del Gobierno de Navarra ante el Parlamento para tratar la siniestralidad de la N 121A y las diferentes medidas de seguridad de los túneles de Belate y Almandoz.

Fueron numerosas las declaraciones erróneas, confusas e incongruentes que se hicieron al analizar las medidas de seguridad de los túneles. Estas provocaron la reacción de la casi práctica totalidad de los municipios de la comarca (29 Ayuntamientos).

De las declaraciones del consejero cabría destacar:

- En cuanto a la carretera sí reconoció su alta siniestralidad y la sobrecarga de tráfico pesado. Se comprometió al estudio y análisis de posibles medidas.
- Respecto a los túneles:
  - Mal interpretó y obvió la obligación de muchos de los artículos de la Directiva 2004/54, entre otros las obligadas evaluaciones, inspecciones e informes de los artículos 11 y 12 así como la necesaria realización de análisis de riesgos (Anexo I, 1.1.3) dadas las particulares características de estos túneles
  - Erró en datos relevantes como tiempos de respuesta de los servicios de emergencia, funcionamiento de los sistemas de seguridad del túnel.

En una reunión celebrada en el mes de setiembre, los 29 Ayuntamientos deciden solicitar al Departamento de Fomento la realización de una evaluación de riesgos de los túneles Belate, Almandoz, Oieregi y Sunbilla, para determinar la necesidad de adopción de mayores medidas de seguridad.

AÑO 2015

IMD vehículos en los túneles: 7966 (29,3 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 0

Transcurridos 3 meses sin obtener respuesta alguna del Departamento de Fomento a la requerida evaluación de riesgos de los túneles, en el mes de febrero los 29 ayuntamientos vuelven a registrar una instancia recordando lo solicitado.

Días más tarde, el consejero de Fomento responde afirmando que los Análisis de Riesgos de los túneles de Belate y Almandoz ya se han realizado y convocando a los Ayuntamientos a una próxima reunión.

Esta se celebra el 24 de marzo en el Palacio de Navarra. Como resumen citaremos,

Respecto a la siniestralidad de la carretera:

- El Departamento muestra alternativas de los estudios realizados para la mejora de la funcionalidad del trazado de la N 121 A (2+1).
- Los Ayuntamientos entregan un informe que recoge 35 propuestas de actuación para mejorar la funcionalidad de la carretera en 23 puntos.

Respecto a los túneles:

- El Departamento reconoció NO haber realizado ni las evaluaciones, ni las inspecciones, ni los informes exigidos por la Directiva.

A pesar de la afirmación realizada por el consejero en su escrito de febrero, el Departamento no aporta los Análisis de Riesgos.

Valorada la reunión, y ante el incumplimiento entre otros de los artículos 11, 12, y 15 de la Directiva 2004, los 29 ayuntamientos convocan el 20/04 una rueda de prensa y registran dos nuevas instancias (túneles y carretera) ante el Departamento de Fomento. Se solicita de nuevo una urgente evaluación y determinación del nivel de seguridad de estos túneles, y el estudio de otras alternativas de desdoblamiento distintas a la optada por el Departamento.

En las publicaciones de prensa que se hicieron al día siguiente, el consejero de Fomento, negó falta de seguridad en los túneles de Belate.

Se realiza otra nueva instancia (4 de mayo), para volver a solicitar la información que dispone el Departamento de los análisis de riesgos anunciados.

A pesar de haber sido registrada en la misma forma que instancias anteriores, el 18 de mayo se me notifica personalmente la NO admisión a trámite de dicha solicitud, ante la falta de acreditación como representante de los ayuntamientos suscribientes.El 28 de mayo se registra de nuevo la instancia con sello y firma de los 29 ayuntamientos.

Finalmente, una vez concurridas las elecciones autonómicas en España del 24 mayo (elecciones que propiciaron el cambio de Gobierno de Navarra), con fecha el 23 de junio, el Departamento de Fomento pone a disposición de los Ayuntamientos los resultados de los Análisis de Riesgos.

Según los criterios de aceptación de la Metodología del Ministerio de Fomento, en los citados Análisis de Riesgo, los túneles de Almandoz y Belate se clasificaron como:

"Túneles con peligrosidad elevada: presentan un valor del índice de riesgo superior a 1,50 y no se consideran seguros. Estos túneles requieren la adopción de medidas complementarias para aumentar su seguridad y poder mantenerse o ponerse en servicio"

En los meses de setiembre y octubre los Ayuntamientos hicieron entrega al nuevo equipo de Gobierno de Navarra de un informe resumen de la situación y acciones llevadas a cabo hasta entonces entorno a la N 121A y la prensa publicó los resultados de los Análisis de Riesgo de Belate y Almandoz.

AÑO 2016

IMD vehículos en los túneles: 8055 (29,6 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 2

El Gobierno de Navarra anuncia y aprueba un gasto extraordinario de 100.000 euros para redacción de 2 proyectos en los túneles de Belate y Almandoz y 114.000 euros para otros 2 en los de Oieregi y Sunbilla. No se contemplan otro tipo de actuaciones.

En el mes de junio, tras dar un año de margen al nuevo Gobierno de Navarra, los 30 Ayuntamientos de la comarca se dirigen a los distintos departamentos del ejecutivo anunciándoles su irresponsabilidad ante la falta de medidas reductoras del alto nivel de peligrosidad confirmado por los Análisis de Riesgo.

Ninguno de los departamentos implicados responde ni toma contacto con los representantes municipales en los dos años siguientes.

AÑO 2017

IMD vehículos en los túneles: 8473 (30,77 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 7

En el intento de procurar la modificación y actualización del PETNA (2006), Bomberos de Oronoz retoman conversaciones con la Dirección del Servicio de Protección Civil.

AÑO 2018

IMD vehículos en los túneles: 7242 (34,13 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 5

Mes de enero:

- Entran en funcionamiento nuevos peajes en la paralela A-15. Aumento significativo del tránsito de vehículos pesados en la N 121A. Nuevo repunte de la siniestralidad. Fallecen 5 personas.

- Bomberos de Oronoz entrega al Servicio de Protección Civil una propuesta de modificación y actualización completa del PETNA
- El Gobierno de Navarra anuncia por prensa la contratación de obras por un valor de 4.912.000 euros para adecuar los túneles de Belate y Almandoz a la directiva 2004/54. Estas obras obligarán al cierre de los túneles por un periodo de 7 meses.

Anuncio de obras del Gobierno sin contacto previo alguno con los representantes municipales a pesar de la afección al tráfico que van a suponer y las repercusiones que estas van a tener en el día a día para los vecinos de la zona.

Dos semanas más tarde, 28 Ayuntamientos solicitan al Gobierno una reunión con carácter urgente a fin de poder trasmitir un análisis y valoración del acuerdo adoptado por el Gobierno para la realización de las citadas obras.

Los Ayuntamientos debaten en su seno la conveniencia de estas obras (de dudosa necesidad) dado su baja repercusión sobre el nivel de riesgo de los túneles y que compensen las molestias, perjuicios y riesgo que va suponer la circulación durante 7 meses por la NA 1210 (carretera vieja del puerto de Belate). En todo caso exigen y así lo reflejan en un comunicado público que en su realización todo el tránsito de vehículos pesados con carácter internacional, unos 1.600 camiones diarios, sea desviado por la paralela y desdoblada autovía A-15.

En sesión celebrada el 6 marzo en el Parlamento de Navarra, el vicepresidente del Gobierno recalca la necesidad de llevar a cabo estas obras para poder cumplir con lo dictado por la Directiva 2004/54/CE.

La fecha de la reunión con los Ayuntamientos se fija para el 19 de marzo. En dicha reunión a la que acuden representantes municipales de 31 consistorios, se muestran entre otras los siguientes análisis y valoraciones.

En cuanto a la carretera:

- Constante trasvase de VP de carácter internacional que abandonan la autovía A-15 y sus peajes para transitar por la N 121A. El 6 de marzo (según datos del propio Gobierno), por el túnel de Belate transitaron 8.946 vehículos de los cuales el 43% (3.837) eran VP.
- Aumento de la siniestralidad en la N 121A: 8 fallecidos en los últimos 9 meses, 75% en choques frontales, 65% se involucra VP. Se producen otros numerosos graves incidentes de camiones (incendios, tijeras y vuelcos con barrido de calzada…)
- Se muestran y exigen alternativas como las desarrolladas en Cataluña y La Rioja donde el transporte T.I.R obligatoriamente circula por las autovías.

En cuanto a los túneles:

- La Directiva 20004 /54/CE no requiere las obras anunciadas por el Gobierno para estos túneles.
- Se reprocha al Gobierno la falta de:
    - Planificación de estas obras y el no haber adoptado "ni una sola de las señaladas y necesarias medidas de prevención" en los túneles de Belate y Almandoz (Análisis de Riesgos de 2015)
    - Análisis de Riesgos del transporte de MMPP que se produce en estos túneles y en los de Oieregi y Sunbilla.
    - Organizar y llevar a la práctica periódicamente campañas de información sobre la seguridad y el comportamiento de los usuarios en túneles.

Finalmente se realizan las obras y se mantienen los túneles cerrados durante 6 meses.

En reunión celebrada el mes de octubre, 10 días antes de la reapertura de los túneles, los Ayuntamientos solicitan a los representantes del Gobierno presentes, el resultado de los anunciados "nuevos" análisis de riesgos realizados con motivo de las obras llevadas a cabo. A pesar del compromiso personal del vicepresidente del Gobierno de que se harían públicos, a fecha de hoy, estos no se han entregado.

También se solicitaron nuevas reuniones al Gobierno en el intento de procurar medidas reductoras de riesgo en los túneles. Están fueran denegadas por el vicepresidente acusando falta de tiempo en la agenda de cara a las nuevas elecciones autonómicas del mes de mayo de 2020.

AÑO 2019

IMD vehículos en los túneles: 8720 (30 ,94 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 3

Durante este año, 22 Ayuntamientos aprobaron una moción por la que se instaba al Gobierno de Navarra a "adoptar las medidas y convenios necesarios que procuren el desvío por otras rutas alternativas del transporte de mercancías que no tengan origen ni destino en la N-121A".

Sigue sin modificación ni actualización alguna desde el año 2006 el Plan de Emergencias de Túneles de Carreteras de Navarra (PETNA).

En el mes de mayo de producen nuevas elecciones autonómicas en España. En navarra se produce un nuevo cambio de Gobierno.

En el mes de noviembre, el nuevo consejero de Gobierno para el Departamento de Obras Públicas anuncia el recibo de la Comisión Europea de un expediente de infracción por el incumplimiento de la Directiva 2004/54 de los túneles de Belate y Almandoz.

El consejero preocupado por las sanciones económicas (no por el riesgo para los usuarios) responde y anuncia en prensa que los túneles cumplirán con la Directiva para el año 2025. No plantea medida reductora de riesgo alguna.

Con fecha 28 de noviembre, nos dirigimos a la Dirección General de Movilidad y Transporte de la CE (MOVE C2) para mostrar nuestra queja y preocupación por la negligencia del Gobierno de Navarra ante el constatado del nivel de riesgo de los túneles.

El 13 de diciembre, la jefa de la Unidad de Seguridad Vial de la Dirección General de Movilidad y Transporte de la CE, la Sra. Fotini IOANNIDOU, responde a nuestro correo emplazándonos a enviar nuestras observaciones, informes, documentación, análisis de riesgo o propuestas de medidas preventivas ante el nivel de riesgo de estos túneles.

AÑO 2020

IMD vehículos en los túneles: 7225 (35,02 % VP) Personas fallecidas en la carretera N 121A: 5

Con fecha 5 de enero enviamos a la Unidad de Seguridad Vial de la Dirección General de Movilidad y Transporte de la CE, una copia de lo expuesto en esta comunicación que hoy presentamos a la que adjuntamos los 43 archivos que acreditan y documentan lo expuesto en la cronología de las acciones llevadas a cabo por los Bomberos de Oronoz y los Ayuntamientos de la comarca. Y con fecha 6 de marzo, firmada y sellada por 29 Ayuntamientos adjuntamos una instancia/propuesta de desvío del tránsito de mercancías de carácter internacional por la paralela A-15 como medida realizable a corto plazo capaz de reducir el nivel de peligrosidad de estos túneles.

La Sra. Fotini IOANNIDOU acusa recibo de nuestra documentación, nos recuerda el procedimiento de infracción iniciado por la Comisión el 10 de octubre de 2019 contra los túneles Belate y Almandoz por incumplimiento de las disposiciones de la Directiva 2004/54/CE y agradece "nuestro continuo compromiso e iniciativas para garantizar un alto nivel de seguridad en las carreteras de la Unión Europea".

También, solicita permiso "para compartir oficialmente con las autoridades españolas la información facilitada "y nos emplaza a hacerle llegar nuestras recomendaciones o cualquier otra observación útil que podamos plantear en sus conversaciones con las autoridades españolas ("no sólo las medidas correctivas definitivas, si-

no también toda medida intermedia y temporal que pueda aplicarse de inmediato para garantizar un nivel de riesgo justificable hasta la realización de los trabajos definitivos").

Entretanto, en un pequeño intervalo de 3 meses, 5 vecinos de la comarca pierden la vida en 4 accidentes mortales. En 3 de ellos se involucran vehículos pesados. Los vecinos vuelven a reclamar medidas al Gobierno en una gran manifestación celebrada el 28 de febrero en Bera. Los ayuntamientos solicitan a la presidenta del Gobierno una reunión urgente e instan al consejero de Cohesión Territorial a desviar a la paralela autopista A-15 del transporte de mercancías internacional que no tiene origen ni destino en esta comarca. Ambas solicitudes quedan sin respuesta alguna.

AÑO 2021

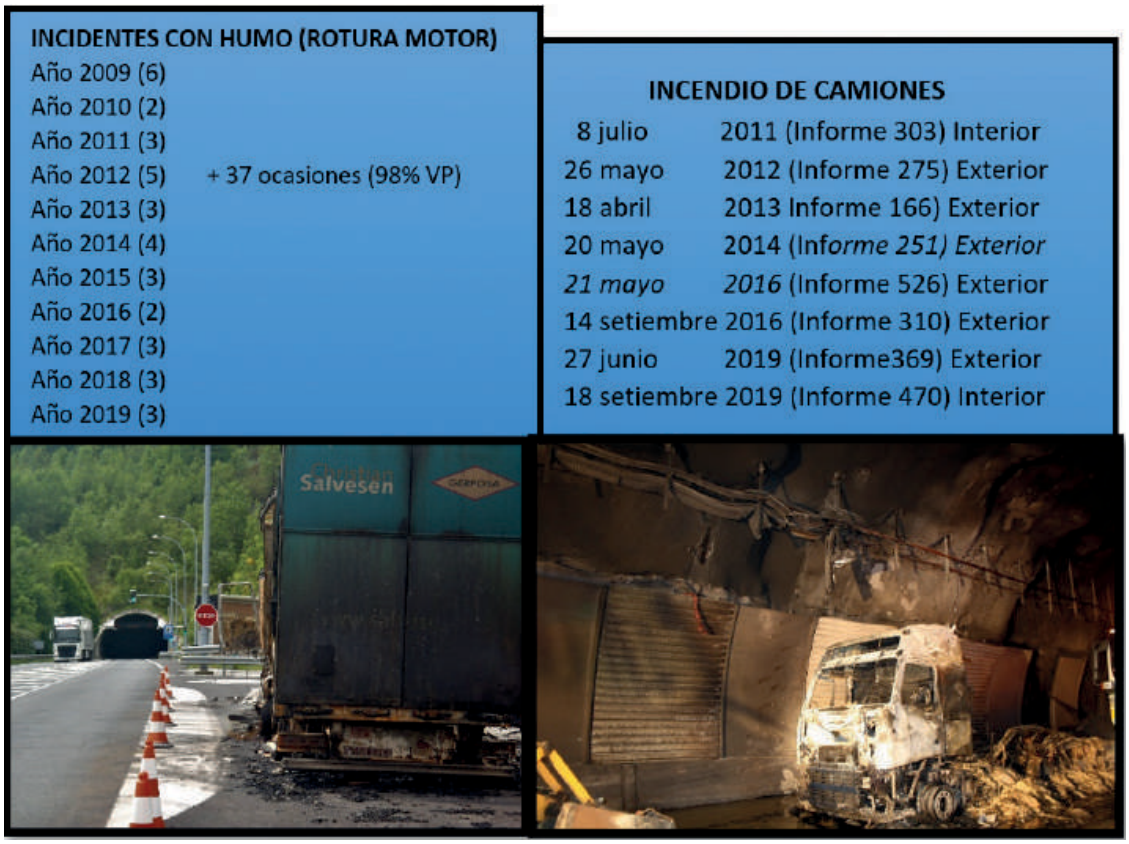
IMD vehículos en los túneles: _____VP_____ Personas fallecidas en la carretera N 121A: 2

Las declaraciones públicas del Gobierno, más preocupado por la sanción económica que puedan imponer los tribunales europeos que por la seguridad de los usuarios en el uso diario de estos túneles, provocaron la ira y la realización de una nueva instancia. Esta vez registrada por más de 70 alcaldes de la región y 34 bomberos del Parque de Oronoz, solicitamos al consejero de Cohesión Territorial "la adopción de medidas complementarias urgentes capaces de garantizar la reducción a corto plazo de su actual nivel de peligrosidad".

El 16 de marzo, Bomberos de Oronoz cortan el tráfico en el túnel de Belate.

En el mes de junio se crea una plataforma vecinal que recoge más de 3.000 firmas exigiendo el desvío del tráfico pesado internacional por la paralela A-15.

UNA VEZ MAS, NO HAY RESPUESTA ALGUNA



ADECUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE TÚNELES EN COLOMBIA A LA NORMATIVA EUROPEA. EJEMPLOS DE LAS CONCESIONES PACÍFICO 1, PACÍFICO 2 Y PACÍFICO 3.

Antonio O. Martín Crisenti
Director de Transportes y Comunicaciones COMSA INDUSTRIAL, S.A.U
Carlos Ernesto Diaz Acevedo
Jefe de proyectos COMSA INDUSTRIAL, S.A.U

La normativa de túneles europea del 2.004 clasifica los túneles en 5 categorías en función de su longitud y el tráfico diario que soportan, y a partir de estas categorías define los sistemas necesarios de control y las medidas de seguridad mínimas requeridas para cada categoría.

En marzo del 2.022 se ha publicado el manual de túneles de Colombia, que también clasifica en 5 categorías los túneles, y una vez analizado es más exigente y detallado que la normativa europea.

Las concesiones Pacífico 1, 2 y 3, mejoran las conexiones entre Antioquia con el Valle del Cauca, conectando dos de las principales capitales de Colombia, Medellín y Cali, además del principal puerto del Pacífico colombiano, Buenaventura. Siendo Antioquia un departamento en medio de la cordillera occidental, presenta una gran cantidad de montañas y cañones. Las 3 autopistas cuentan con los túneles descritos a continuación:

Pacífico 1 cuenta con los túneles de Sinifaná de 1.400 m y de Amagá de 3.600 m de longitud.

Pacífico 2 cuenta con los túneles de Mulatos de 2.500 m de longitud.

Pacífico 3 cuenta con los túneles de Tesalía de 3.500 m e Irra de 450 m de longitud.

Total 18.95 Km de túneles.

Todos los túneles cuentan con iluminación normal, de seguridad y de evacuación, ventilación mecánica, estaciones de emergencia, extinción de incendios, señales viales, centro de control, sistemas de videovigilancia, detección automática de incidentes, detección de incendios, equipos para el cierre de túnel, semáforos, transmisión por radio para los servicios de emergencia, megafonía, suministro eléctrico de emergencia, SOS y los equipos cumplen con la normativa de resistencia de equipos ante el fuego. Tal y como especifica la normativa europea. Adicionalmente, como especifica el Manual de Túneles de Colombia, cuentan con anemómetros, detectores de visibilidad, detectores de Co y NOx, estaciones meteorológicas, barreras exteriores, controladores de gálibo, sistemas de detección de vehículos, red de comunicaciones, alarmas manuales y automáticas de incendios, grupos electrógenos, SAI, salidas de emergencia peatonales y vehiculares y extintores.

Todos los túneles cumplen la normativa europea y colombiana en cuanto a instalaciones de control.

ADAPTATION OF TUNNEL CONTROL SYSTEMS IN COLOMBIA TO EUROPEAN REGULATIONS. EXAMPLES OF THE PACIFIC 1, PACIFIC 2 AND PACIFIC 3 CONCESSIONS.

The 2004 European tunnel regulations classifies tunnels into 5 categories based on their length and the daily traffic they support. Based on these categories they define the required control systems and the minimum safety measures required for each category.

In March 2022, the Colombian tunnel manual was published, which also classifies tunnels into 5 categories. Once analysed, this handbook is more demanding and detailed than European regulations.

The Pacifico 1, Pacifico 2 and Pacifico 3 concessions begin in the outskirts of Medellin and reach Pereira and Manizales in the Coffee Belt.

Pacífico 1 includes the 1,500 m long Sinifaná tunnel and the 3,500 m long Amagá tunnel.

Pacífico 2 includes the 2,500 m long Mulatos tunnels.

Pacífico 3 includes the 3,500 m long Tesalía tunnel and the 450 m long Irra tunnel.

Total 18.95 km of tunnels.

All the tunnels have regular, security and evacuation lighting, mechanical ventilation, emergency stations, firefighting mechanisms, road signs, a control centre, video surveillance systems, automatic incident detection, fire detection, equipment for tunnel closure, traffic lights, radio transmission for emergency services, public address systems (PA systems) and emergency power supplies. Furthermore, the equipment complies with the regulations on fire resistance. as specified by European regulations.

ADAPTATION DES SYSTÈMES DE CONTRÔLE DES TUNNELS EN COLOMBIE À LA RÉGLEMENTATION EUROPÉENNE. EXEMPLES DE CONCESSIONS PACIFIC 1, PACIFIC 2 ET PACIFIC 3.

La réglementation européenne des tunnels de 2004 classe les tunnels en 5 catégories en fonction de leur longueur et du trafic quotidien qu'ils supportent. Sur la base de ces catégories, elle définit les systèmes de contrôle nécessaires et les mesures de sécurité minimales requisés pour chaque catégorie.

En mars 2022, le manuel colombien des tunnels a été publié.Il classe également les tunnels en 5 catégories, et une fois analysé, il est plus exigeant et détaillé que la réglementation européenne.

Les concessions Pacífico 1, 2 et 3 améliorent les liaisons entre Antioquia et Valle del Cauca, soit les principales capitales de Colombie Medellin et Cali, ainsi que le principal port du Pacifique colombien Buenaventura. Antioquia étant un département situé au milieu de la chaîne de montagnes occidentale, on y trouve beaucoup de montagnes et de canyons. Ces trois autoroutes comportent des tunnels, qui sont décrits ci-dessous:

Pacífico 1 comprends le tunnel Sinifaná de 1.500 m de long et le tunnel Amagá de 3.500 m de long.

Pacífico 2 comprends les tunnels Mulatos de 2.500 m de long.

Pacífico 3 comprends le tunnel Tesalía de 3.500 m de long et le tunnel Irra de 450 m de long.

Total 19 km de tunnels.

Tous les tunnels disposent d'un éclairage normal, de sécurité et d'évacuation, d'une ventilation mécanique, de postes d'urgence, des intallations de lutte contre l'incendie, de signalisation routière, d'un centre de contrôle, de systèmes de vidéosurveillance, de détection automatique d'incidents, de détection d'incendie, d'équipements de fermeture du tunnel, de feux de signalisation, de transmission radio pour les services d'urgence, des haut-parleurs et d'alimentation électrique de secours. Tout l'équipement est conforme à les réglementations sur la résistance au feu telles que spécifiées par les normes européennes.

1. INTRODUCCIÓN

Los retos del siglo 21, en Latinoamérica y en especial Colombia están en ser competitivos en el mercado globalizado. Colombia en los últimos 20 años ha generado un plan de transformación de infraestructura, carretera, aeroportuaria, marítima, fluvial y férrea. Plan que conlleva trazos en la geografía propia del país, salida a 2 océanos Pacífico y Atlántico, cruzando 3 cordilleras que atraviesan su superficie de sur a norte con alturas desde 0 msnm hasta más de 5000 msnm, 246 ríos de más de 1.000 kilómetros de longitud, de los cuales hay 90 que llegan hasta el océano. La manera de afrontar las características orográficas es mediante la construcción de grandes túneles y puentes.

Implementar los túneles carreteros, cumplimiento los estándares nacionales, e internacionales, garantizan la seguridad a los usuarios, así como la facilidad para la explotación y mantenimiento de los mismos, permitiendo así, mejorar la competitividad de las ciudades capitales y la comunicación con puertos y aeropuertos.

Los túneles que vamos a analizar comunican Medellín con Cali y con el puerto de Buenaventura.

2. NORMATIVA EUROPEA

La normativa europea clasifica los túneles en 5 categorías según la longitud de los túneles y el tráfico en vehículos por carril, según sea mayor o menor el tráfico de 2.000 vehículos por carril y la longitud esté entre 500 y más de 3.000 m.

En función de ello, considera obligatorio, obligatorio con excepciones, no obligatorio o recomendado cada uno de los subsistemas que especifica:

Tabla 1. Resumen informativo de los requisitos mínimos según normativa europea 2004/54/CE.

RESUMEN INFORMATIVO DE LOS REQUISITOS MÍNIMOS			Tráfico ≤ 2 000 vehículos por carril		Tráfico > 2 000 vehículos por carril			Otras condiciones para que la aplicación sea obligatoria, o comentarios
			500-1 000 m	> 1 000 m	500-1 000 m	1 000-3 000 m	> 3 000 m	
Sistemas de comunicación	Transmisión por radio para los servicios de emergencia	§2.16.1	○	○	○	●	●	
	Mensajes de emergencia por radio para los usuarios del túnel	§2.16.2	●	●	●	●	●	Obligatorio si hay transmisiones por radio destinadas a los usuarios del túnel y se dispone de un centro de control
	Altavoces en los refugios y las salidas	§2.16.3	●	●	●	●	●	Obligatorio si los usuarios que evacuan el túnel deben esperar antes de poder llegar al exterior
Suministro de electricidad de emergencia		§2.17	●	●	●	●	●	Para garantizar el funcionamiento del equipo de seguridad indispensable al menos durante la evacuación de los usuarios del túnel
Resistencia de los equipos al fuego		§2.18	●	●	●	●	●	Tendrá como finalidad mantener las necesarias funciones de seguridad

RESUMEN INFORMATIVO DE LOS REQUISITOS MÍNIMOS			Tráfico ≤ 2 000 vehículos por carril		Tráfico > 2 000 vehículos por carril			Otras condiciones para que la aplicación sea obligatoria, o comentarios
			500-1 000m	> 1 000m	500-1 000m	1 000-3 000m	> 3 000m	
Iluminación	Iluminación normal	§2.8.1	●	●	●	●	●	
	Iluminación de seguridad	§2.8.2	●	●	●	●	●	
	Iluminación de evacuación	§2.8.3	●	●	●	●	●	
Ventilación	Ventilación mecánica	§2.9	○	○	○	●	●	
	Disposiciones especiales respecto de la ventilación transversal o semitransversal	§2.9.5	○	○	○	○	●	Obligatorio en los túneles bidireccionales dotados de un centro de control
Estaciones de emergencia	Cada 150 m como mínimo	§2.10	*	*	*	*	*	Equipadas con un teléfono y 2 extintores. En los túneles existentes se permite un intervalo máximo de 250 m
Abastecimiento de agua	Cada 250 m como mínimo	§2.11	●	●	●	●	●	Si no se dispone de suministro, es obligatorio conseguir otro tipo de abastecimiento de agua suficiente
Señales viales		§2.12	●	●	●	●	●	Para todos los equipos de seguridad que estén a disposición de los usuarios del túnel (véase el anexo III)
Centro de control		§2.13	○	○	○	○	●	La vigilancia de varios túneles podrá estar centralizada en un único centro de control
Sistemas de vigilancia	Vídeo	§2.14	○	○	○	○	●	Obligatorio si hay un centro de control
	Detección automática de incidentes y/o de incendios	§2.14	●	●	●	●	●	Al menos uno de los dos sistemas es obligatorio en los túneles dotados de un centro de control
Equipos para el cierre del túnel	Semáforos antes de las entradas	§2.15.1	○	●	○	●	●	
	Semáforos dentro del túnel cada 1 000 m como mínimo	§2.15.2	○	○	○	○	●	Recomendado si se dispone de un centro de control y la longitud es superior a 3 000 m

Iluminación normal, de seguridad y de evacuación, ventilación mecánica y los dispositivos especiales que requiere para su control, estaciones de emergencia con postes SOS y 2 extintores, abastecimiento de agua, señalización vial, centro de control, sistema de video vigilancia, detección automática de incidentes, equipos para el cierre de túnel con como mínimo semáforos exteriores e interiores, sistemas de comunicaciones compuestos como mínimo por transmisión de radio para los servicios de emergencia, mensajes de emergencia por radio para los usuarios de túnel y altavoces en los refugios y en las salidas de los túneles.

3. MANUAL DE TÚNELES DE COLOMBIA

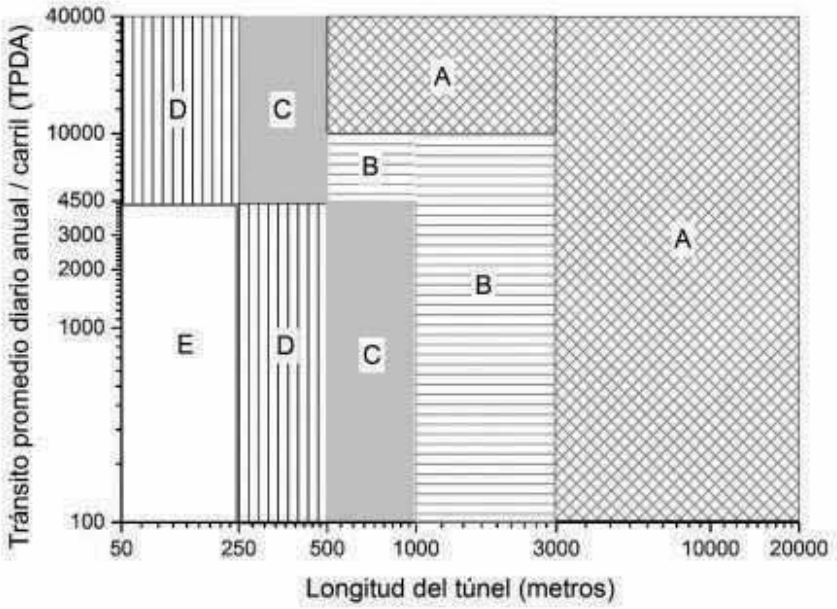
El Manual de túneles de Colombia publicado en última versión en marzo del año 2.022 recoge una clasificación similar, en función de la longitud del túnel y del número de vehículos y también clasifica los túneles en 5 categorías.

Las principales diferencias con la normativa europea son:

Clasificación de los Túneles: La Normativa Colombiana realiza los mismos escalones de clasificación, 5, en función del Transito Promedio Diario Anual (TPDA) y de la longitud de los Túneles. La Directiva Europea únicamente lo clasifica según Intensidad Media Diaria menores o iguales a 2000 Veh/Carril o mayores a 2000 Veh/Carril con 5 clasificaciones. En la normativa europea los túneles con menos de 500 m no tienen obligatoriedad de tener ninguna instalación de control. Los equipamientos electromecánicos mínimos para túneles, en la Normativa Colombiana son más exigentes, obligando a instalar equipamiento eléctrico, iluminación permanente y controles de gálibo, también recomienda instalar sistemas para detección de accidentes y de Incendios para cualquier túnel de más de 50 m.

Equipamiento de los túneles: La Normativa Colombiana establece a partir de longitudes de 250 m con alta densidad de vehículos o a partir de 500 m independientemente de la IMD, la recomendación de instalar ventilación mecánica, sistemas de control centralizados y detección de incendios para minimizar el daño a los usuarios en casos de incendio y poder dar una respuesta rápida de los servicios de emergencia. La Normativa Europea obliga a disponer de estos sistemas cuando los túneles cuentan con longitudes de más de 1000 m o disponen de centro de control.

Tabla 2. Clasificación de túneles, Manual de Túneles de Carretera Invias 2021.



En la Directiva Europea no se incluye una categorización para instalar o no equipos como Controladores Redundantes, un Sistema de Control (SCADA), UPS, Grupos Electrógenos, Detectores de CO, Nox, Anemómetros, Aforadores, etc… La Directiva es más generalista para la categorización de los sistemas a incluir sin entrar al detalle dentro del equipamiento que conforma cada subsistema.

Tabla 3. Requisitos mínimos según la clase de túneles. Manual de Túneles de Colombia.

EQUIPOS ELECTROMECÁNICOS						
CATEGORÍA	TIPO	A	B	C	D	E
ILUMINACIÓN	Permanente	●	●	●	●	●
	De seguridad	●	●	●	O	O
	Para evacuación	●	●	●	◐	O
VENTILACIÓN	Mecánica	●	●	◐	O	O
	Anemómetros	●	●	◐	O	O
	Sensores de visibilidad	●	●	◐	O	O
	Detectores CO	●	●	◐	O	O
	Detectores NOX	O	O	O	O	O
COMUNICACIÓN	Altavoces y Megafonía	●	●	●	◐	O
	Radio	●	●	◐	◐	O
	Emisora	●	O	O	O	O
	Estaciones metereológicas	●	◐	O	O	O
	Teléfonos de emergencia SOS	●	●	●	O	O
CONTROL DE TRÁFICO	Barreras exteriores	●	●	●	◐	◐
	Semáforos exteriores	●	●	◐	O	O
	Semáforos interiores	●	O	O	O	O
	Sistema de control de gálibo	●	●	●	●	●
	CCTV (Circuito Cerrado de TV)	●	●	◐	O	O
	Centro de Control	●	●	O	O	O
	Sistema de detección de vehículos (aforadores)	●	●	●	O	O

Tabla 4. Requisitos mínimos según la clase de túneles. Manual de Túneles de Colombia.

EQUIPOS ELECTROMECÁNICOS						
CATEGORÍA	TIPO	A	B	C	D	E
AUTOMATIZACIÓN	SCADA	●	●	◐	O	O
	MC redundante	●	●	●	O	O
	Red de conectividad	●	●	◐	O	O
DETECCIÓN DE INCIDENTES	Detección automática de incidentes	●	●	◐	O	O
	Detección de incendios	●	●	●	O	O
	Alarma manual	●	●	O	O	O
	Alarma automática	●	●	●	O	O
ENERGÍA ELÉCTRICA - RESPALDO	Plantas eléctricas	●	●	●	◐	O
	Doble circuito eléctrico	●	◐	O	O	O
	UPS	●	●	●	O	O
ESTRUCTURA DE EMERGENCIA	Salidas de emergencia peatonal	●	●	◐	◐	O
	Andenes	●	●	●	●	●
	Nichos SOS o centros remotos de emergencia	●	●	●	◐	◐
	Galería de evacuación vehicular (acceso emergencia)	●	●	O	O	O
DETECCIÓN DE INCIDENTES	Detección automática de Incidentes	●	●	●	●	◐
	Detección de Incendios	●	●	●	●	◐
	Alarma Manual	●	●	●	●	◐
	Alarma Automática	●	●	●	●	◐
CONTROL DE INCENDIOS	Conexiones de manguera Clase I (NFPA14)	●	●	●	●	◐
	Extintores Portátiles	●	●	●	●	◐
	Teléfonos de Emergencia SOS	●	●	●	●	◐
	Red Hidráulica de Extinción de Incendios.	●	●	●	●	◐
	Sistemas Fijos de Extinción de Incendios.	●	●	●	◐	◐
● Obligatorio ◐ Recomendado O Opcional						

Centros de control: En la normativa colombiana se requieren centros de control a menos de 15 Km de la boca del túnel. En la europea el centro de control puede estar a cualquier distancia. Esta quizá sea la diferencia más importante, y consideramos que con las comunicaciones por fibra óptica y radio tan fiables, lo único imprescindible que esté a menos de 15 km de la boca, es el centro de primera intervención, pero el centro de control puede estar a cualquier distancia.

4. CONCESIONES PACÍFICO 1, PACÍFICO 2 Y PACÍFICO 3

Las tres concesiones conectarán el sureste antioqueño y el puerto de Buenaventura. En la Fig. 5 se aprecia las diferentes concesiones y sus trazados.

4.1. Pacífico 1

A lo largo de 50 kilómetros esta concesión permitirá una salida eficiente entre Medellín y el río Cauca, a la altura del corregimiento de Bolombolo (Suroeste antioqueño), yendo desde Bolombolo, Camilo Cé, Primavera y terminando en Ancón Sur.

En este proyecto, se construyen dos grandes túneles dobles: Amagá de 3.6 kilómetros y Sinifaná de 1.4 kilómetros, claves para afrontar la geografía montañosa de la región.

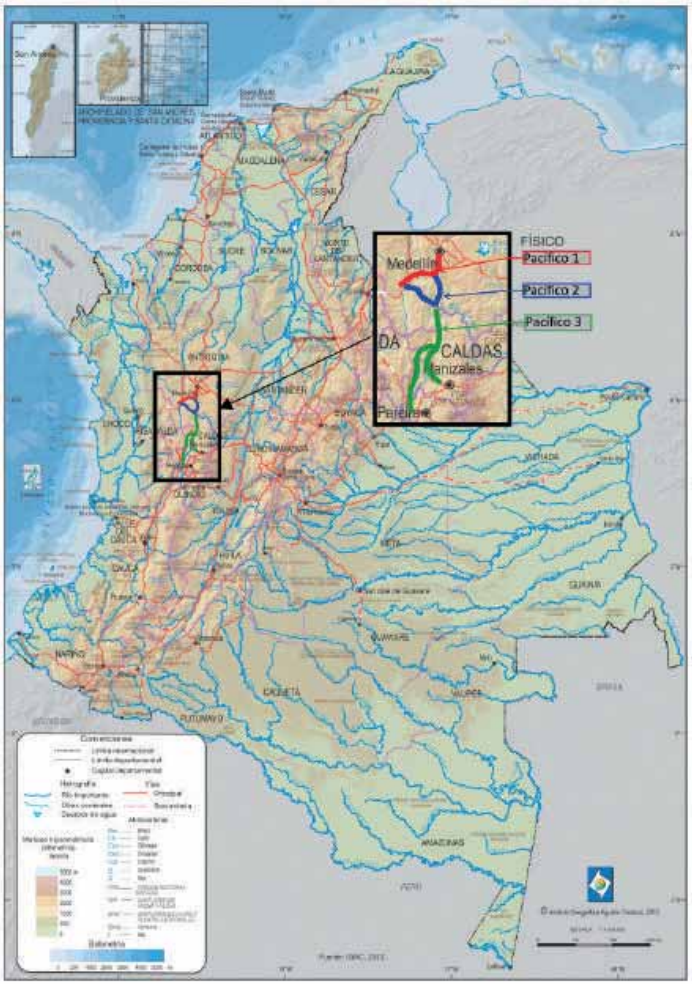


Fig. 5 Ubicación geográfica de los Concesiones Pacífico 1, 2 y 3. (INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, 2012)

Este proyecto vial también incluye la construcción de 56 puentes en todo el trayecto y tres intercambiadores a desnivel en Sinifaná, Titiribí y Camilo Cé.

Pacífico 1 tiene influencia directa sobre los municipios de Amagá, Titiribí, Venecia, y Caldas en Antioquia. Además, permitirá que estos puntos estén mejor conectados con los principales centros económicos, dentro y fuera de Antioquia.

4.1.1. Los Túneles de Sinifaná

Fueron inaugurados el pasado 10 de junio de 2.021, se pueden clasificar como túneles con tráfico mayor de 2.000 vehículos por carril y de entre 1.000 y 3.000 metros y como túneles tipo B según el Manual de Túneles de Colombia, pudiendo alcanzar el tipo A si el tráfico rebasa los 10.000 vehículos día por carril.

PROYECTO	SOS	Switch L2/L3	Subestaciones	Ventiladores	Cámaras DAI / CCTV	PMV Interior / exterior
Túnel Sinifaná Tünel Doble 2 galerías 1,4 km longitud	21	2 / 22	2	Longitudinal 34	33 / 29	6 / 1

Fig. 6 Túneles Sinifaná.

Estos túneles cuentan con los equipamientos descritos a continuación:

- Iluminación normal de leds bilateral, iluminación de seguridad e iluminación de evacuación y balizamiento.
- Ventilación mecánica longitudinal formada por 34 ventiladores jet fan, 6 anemómetros y 6 detectores combinados de Opacidad, CO y NO2 y 1 estación meteorológica. La resistencia de los ventiladores al fuego es de 2 horas a 400º centígrados.
- 22 Estaciones de emergencia cada 150 metros equipadas con 1 postes SOS y 2 extintores en cada 1 de ellas.
- Bocas de incendio equipadas cada 50 metros con grupo de presión equipado con bomba principal, bomba de reserva, bomba jockey para mantener la presión y aljibe de almacenamiento de agua en boca de túnel.

- Señalización vial formada por:
  - 1 paneles de mensaje variable de exterior con 2 gráficos y 3 líneas de 12 caracteres.
  - 8 paneles de mensaje variable de interior con 2 líneas de 16 caracteres.
  - 16 señales aspa flecha
  - 12 señales de limitación de velocidad.
- Señales de led para todos los equipamientos de túnel (Postes SOS, hidrantes, paradas de emergencia, longitud restante, conserve distanciamiento, camiones a la derecha, salida de evacuación)
- Centro de control totalmente equipado y centro de control provisional en boca.
- Sistema de video vigilancia compuesto por 33 cámaras fijas, 8 mini domo y 8 cámaras PTZ (pan tilt zoom).
- Detección automática de incidentes con 33 cámaras DAI.
- Detección de incendios compuesto por:
  - 2 controladores de incendio y 2800 m de cable sensorizado para detección lineal.
  - 2 centralitas de incendio, 52 pulsadores manuales, 2 sirenas y 12 detectores de humo para los locales técnicos.
- Equipos para cierre de túnel compuestos por 4 semáforos RAV en bocas y 6 barreras de cierre de túnel y 34 semáforos en el interior.
- Radio comunicaciones con sistemas de cable radiante con 2 estaciones maestras y 2400 metros de cable.
- Megafonía a lo largo de todo el túnel con 12 amplificadores y 140 altavoces.
- La electricidad se suministra por dos acometidas diferenciadas contando con: 2 subestaciones eléctricas, 2 grupos electrógenos y 2 SAI para alimentar los equipos de emergencia.
- 2 sistemas de control de gálibo.
- 6 estaciones de toma de datos o aforadores.
- El SCADA de control supervisa todos los sistemas integrados del túnel.
- La red de PLC está compuesta por 2 PLC redundantes STAND ALONE, 20 módulos recolectores de señales MRS, 2 pantallas HMI y 16 Gateway MODBUS.
- La red de comunicaciones en anillo está compuesta por 2 switch Core, 4 switch de backbone y 16 switch de campo.
- 2 galerías de emergencia presurizadas.

Con todos estos equipamientos, los túneles de Sinifaná cumplen con todos los requisitos de su categoría e incluso de la de los túneles con más de 3.000 metros con excepción de las medidas de ventilación transversal o semi transversal que no son necesarias para este tipo de túneles.

Así mismo, cumple todas las medidas para los túneles Tipo B del Manual de Túneles de Colombia.

4.1.2. Los Túneles de Amagá

Los túneles de Amagá, cuya inauguración está prevista para el segundo semestre de 2.022, se pueden clasificar como túneles con tráfico mayor de 2.000 vehículos por carril y de más de 3.000 metros según la normativa europea y como túneles tipo A según el Manual de Túneles de Colombia.

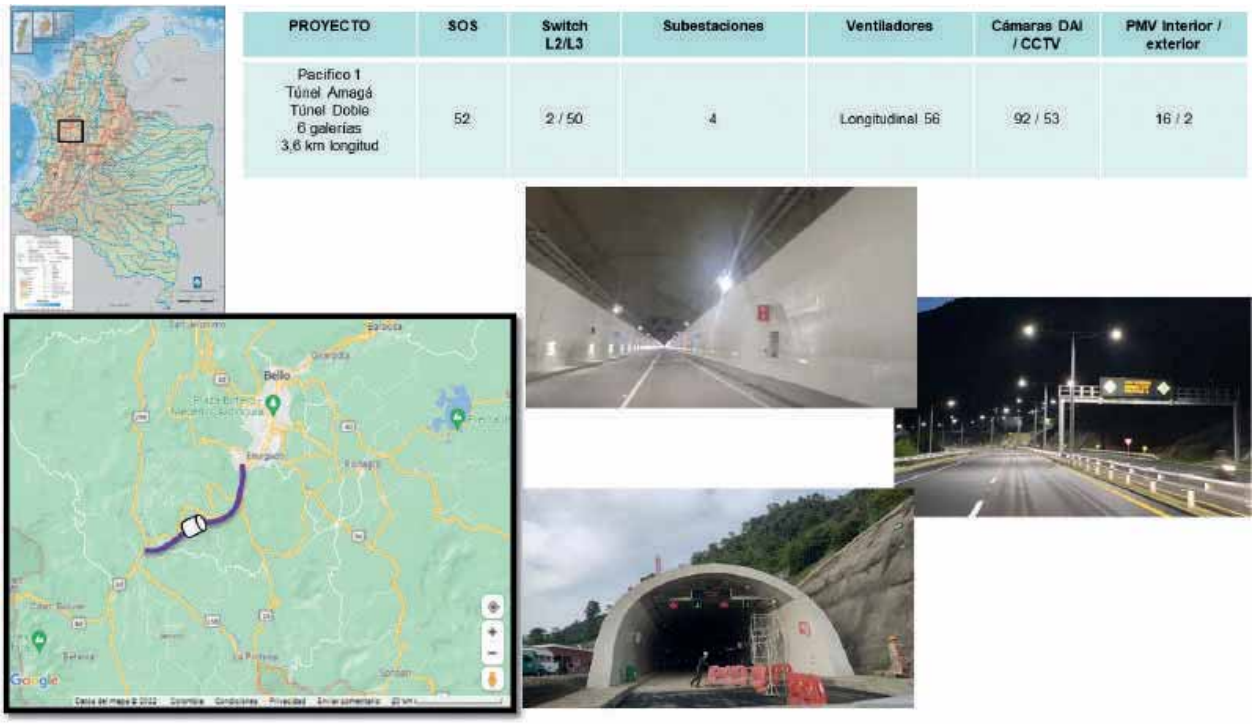


Fig. 7 Túneles Amagá.

Estos túneles cuentan con los equipamientos descritos a continuación:

- Iluminación normal de leds bilateral, iluminación de seguridad e iluminación de evacuación.
- Ventilación mecánica longitudinal formada por 56 ventiladores jet fan, 14 anemómetros y 14 detectores combinados de Opacidad, CO y NO2 y 1 estación meteorológica. La resistencia de los ventiladores al fuego es de 2 horas a 400º centígrados.
- 52 estaciones de emergencia cada 150 metros equipadas con 1 poste SOS y 2 extintores en cada 1 de ellas.
- Bocas de incendio equipadas cada 50 metros con un grupo de presión compuesto por bomba principal, bomba de reserva, bomba jockey para mantener la presión y aljibe de almacenamiento de agua en boca de túnel.
- Señalización vial formada por:
  - 2 paneles de mensaje variable de exterior con 2 gráficos y 3 líneas de 12 caracteres.
  - 14 paneles de mensaje variable de interior con 2 líneas de 16 caracteres.
  - 28 señales aspa flecha
  - 21 señales de limitación de velocidad.
  - Señales de led para todos los equipamientos de túnel (Postes SOS, hidrantes, paradas de emergencia, longitud restante, conserve distanciamiento, camiones a la derecha, salida de evacuación)

- Centro de control totalmente equipado y centro de control provisional en boca.
- Sistema de video vigilancia compuesto por 99 cámaras fijas, 28 mini domo y 6 cámaras PTZ (pan tilt zoom).
- Detección automática de incidentes con 99 cámaras DAI.
- Detección de incendios compuesto por:
  - 6 controladores de incendio y 6.600 m de cable sensorizado para detección lineal.
  - 4 centralitas de incendio, 62 pulsadores manuales, 4 sirenas y 24 detectores de humo para los locales técnicos.
- Equipos para cierre de túnel compuestos por 4 semáforos RAV en bocas y 6 barreras de cierre de túnel y 38 semáforos en el interior.
- Radio comunicaciones con sistemas de cable radiante con 2 estaciones maestras y 2 esclavas y 7000 metros de cable.
- Megafonía a lo largo de todo el túnel con 12 amplificadores y 340 altavoces.
- El sistema eléctrico está distribuido en 4 subestaciones eléctricas, 2 exteriores y 2 interiores, las subestaciones exteriores cuentan con conexión a media tensión y cada una cuenta con 2 grupos electrógenos. Las subestaciones internas son alimentadas por una red de media tensión. Esta configuración permite la alimentación por cada uno de los extremos del túnel, por media tensión o por los grupos electrógenos. Al interior de cada subestación se cuenta con 3 SAI, uno para el respaldo de iluminación de emergencia y evacuación en cada túnel y el otro para los sistemas ITS.
- 2 sistemas de control de gálibo.
- 14 estaciones de toma de datos o aforadores.
- El SCADA de control supervisa todos los sistemas integrados del túnel.
- La red de PLC está compuesta por 2 PLC redundantes STAND ALONE, 41 módulos recolectores de señales MRS, 4 pantallas HMI y 16 Gateway MODBUS.
- La red de comunicaciones en anillo está compuesta por 4 switch core, 4 switch de backbone y 50 switch de campo.
- 6 galerías de emergencia presurizadas, 4 peatonales y 2 vehiculares.

4.1.3. Centro de control y centros de gestion local

Este proyecto contara con un centro de control centralizado con un anillo troncal a cada uno de los extremos del túnel, y con redundancia punto a punto. Además, cuenta con 2 centros de gestión local, desde los cuales se operan los túneles de Sinifaná y Amagá, permitiendo la redundancia.

Con todos estos equipamientos, los túneles cumplen con todos los requisitos de su categoría según normativa europea, con excepción de las medidas de ventilación transversal o semi transversal que no son necesarias según el estudio específico, realizado para estos túneles.

Asimismo, cumple todas las medidas para los túneles Tipo A del Manual de Túneles de Colombia.

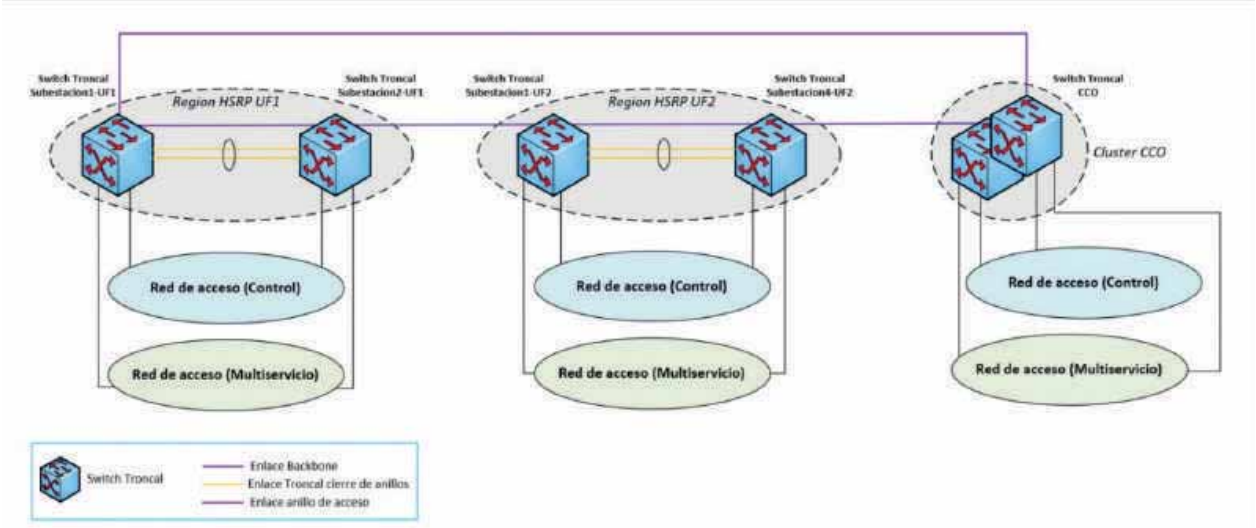


Fig. 8 Topología general de proyecto Pacífico 1 con redundancia.

4.2. Pacífico 2

Es un activo estratégico, que comprende el tramo Bolombolo-La Pintada-Primavera, de los cuales 37 kilómetros son en doble calzada: (La Pintada – Puente Iglesias: 14 km); (Puente Iglesias – Túnel de Mulatos: 19,8 km); y (Túnel Mulatos – Bolombolo: 3,2 km). Además, cuenta con tres kilómetros en calzada sencilla, 2,5 kilómetros del túnel de Mulatos y 48 puentes. Incluye también la rehabilitación de 54 Km de la vía de La Pintada a Primavera.

De esta manera, se brinda a las zonas norte, del centro y oriente del país una salida más competitiva al Pacífico colombiano, garantizando su conectividad.

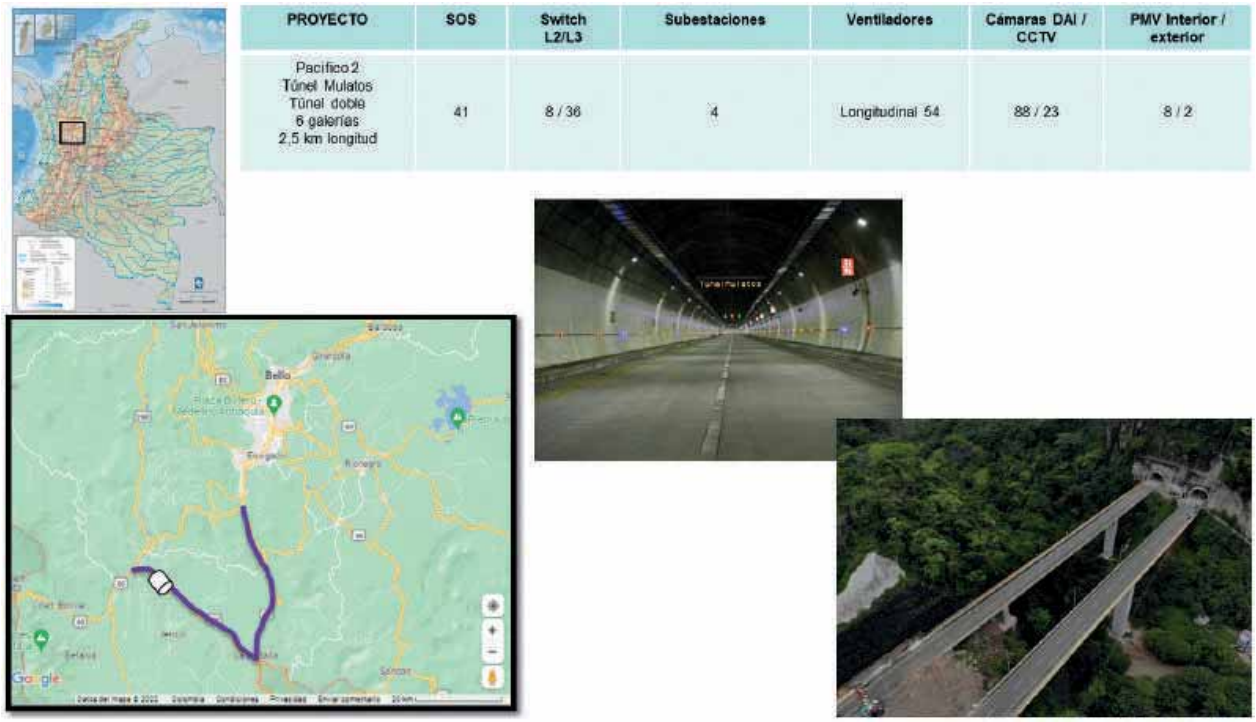
Esta concesión une Bolombolo con La Pintada, y proyecta recibir todo el tráfico que viene desde Medellín y la zona norte del país, dándole continuidad a Pacífico 1. Actualmente esta vía tiene una influencia directa sobre los municipios de Venecia, Tarso, Jericó, Támesis, La Pintada y Valparaíso.

4.2.1. Los Túneles de Mulatos

De 2.500 m de longitud, inaugurados el pasado 10 de junio de 2.021 simultáneamente con los de Sinifaná, se pueden clasificar como túneles con tráfico mayor de 2.000 vehículos por carril y de entre 1.000 y 3.000 metros y como túneles tipo B según el Manual de Túneles de Colombia, pudiendo alcanzar el tipo A si el tráfico rebasa los 10.000 vehículos día por carril.

Estos túneles cuentan con los equipamientos descritos a continuación:

- Iluminación normal de leds bilateral, iluminación de seguridad e iluminación de evacuación.
- Ventilación mecánica longitudinal formada por 54 ventiladores jet fan, 6 anemómetros y 23 detectores combinados de Opacidad, CO y NO2 y 2 estaciones meteorológicas. La resistencia de los ventiladores al fuego es de 2 horas a 400º centígrados.
- Estaciones de emergencia cada 150 metros equipadas con 41 postes SOS y 2 extintores en cada 1 de ellas.
- Bocas de incendio equipadas cada 75 m con grupo de presión compuesto por bomba principal, bomba de reserva, bomba jockey para mantener la presión y aljibe de almacenamiento de agua en boca de túnel.



PROYECTO	SOS	Switch L2/L3	Subestaciones	Ventiladores	Cámaras DAI / CCTV	PMV Interior / exterior
Pacífico 2 Túnel Mulatos Túnel doble 6 galerías 2,5 km longitud	41	8 / 36	4	Longitudinal 54	88 / 23	8 / 2

Fig. 9 Túneles Mulatos.

- Señalización vial formada por:
  - 2 paneles de mensaje variable de exterior con 2 gráficos y 3 líneas de 12 caracteres.
  - 8 paneles de mensaje variable de interior con 1 líneas de 16 caracteres.
  - 36 señales aspa flecha
  - 18 señales de limitación de velocidad.
  - Señales de led para todos los equipamientos de túnel (Postes SOS, hidrantes, paradas de emergencia, Longitud restante, conserve distanciamiento, camiones a la derecha, salida de evacuación)
- Centro de control totalmente equipado y centro de control provisional en boca.
- Sistema de video vigilancia compuesto por 88 cámaras fijas, 18 mini domo y 5 cámaras PTZ (pan tilt zoom).
- Detección automática de incidentes con 88 cámaras DAI.
- Detección de incendios compuesto por:
  - 2 controladores de incendio y 5000 m de cable sensorizado para detección lineal.
  - 4 centralitas de incendio, 62 pulsadores manuales, 62 sirenas y 12 detectores de humo en los locales técnicos.
- Equipos para cierre de túnel compuestos por 4 semáforos RAV en bocas y 4 barreras de cierre de túnel.
- Radio comunicaciones con sistemas de cable radiante con 2 estaciones maestras y 5.000 metros de cable.

- Megafonía a lo largo de todo el túnel con 22 amplificadores y 175 altavoces.
- La electricidad se suministra por una acometida y un grupo electrógeno en media tensión, una red en media tensión conectando las 4 subestaciones, 2 internas y 2 externas, cada subestación con un SAI, para el respaldo de iluminación y equipos ITS.
- 2 sistemas de control de gálibo.
- 4 estaciones de toma de datos o aforadores.
- 4 teléfonos operativos, en cada subestación para la comunicación con el Centro de Control y Operaciones.
- El SCADA de control supervisa todos los sistemas integrados del túnel.
- La red de PLC está compuesta por 2 PLC redundantes STAND ALONE, 28 módulos recolectores de señales MRS, 4 pantallas HMI y 16 Gateway MODBUS.
- La red de comunicaciones en anillo está compuesta por 8 switch core, 4 switch de backbone y 37 switch de campo.
- 6 galerías de emergencia presurizadas.

Con todos estos equipamientos, los túneles cumplen con todos los requisitos de su categoría e incluso de la de los túneles con más de 3.000 metros con excepción de las medidas de ventilación transversal o semi transversal que no son necesarias en este tipo de túneles.

Asimismo, cumple todas las medidas para los túneles Tipo A del Manual de Túneles de Colombia.

4.3. Pacífico 3. La salida al mar Pacífico

Pacífico 3 es la más extensa de las tres, ya que la concesión cuenta con una longitud total de 146 km. Si bien tiene una gran influencia en Caldas, también beneficia a Antioquia y Risaralda, pues se construye para fortalecer la conexión con el occidente del país y la salida al Puerto de Buenaventura.

Esta vía recorre 12 municipios de Caldas, 4 de Risaralda y 3 de Antioquia. Este proyecto contempla la intervención de 58 puentes, ocho intersecciones viales, la construcción de dos túneles, uno de ellos en Tesalia con una longitud total de 3.5 kilómetros, que por su dimensión es una de las grandes obras de infraestructura en Colombia. Asimismo, cuenta con una galería de salida de emergencia de la misma longitud. El túnel de Irra tiene 450 metros de longitud por lo que no vamos a analizarlo en esta comunicación por no estar tipificado en la normativa europea, siendo de tipo D para el Manual de túneles de Colombia, y está dotado de los sistemas requeridos para este tipo de túneles.

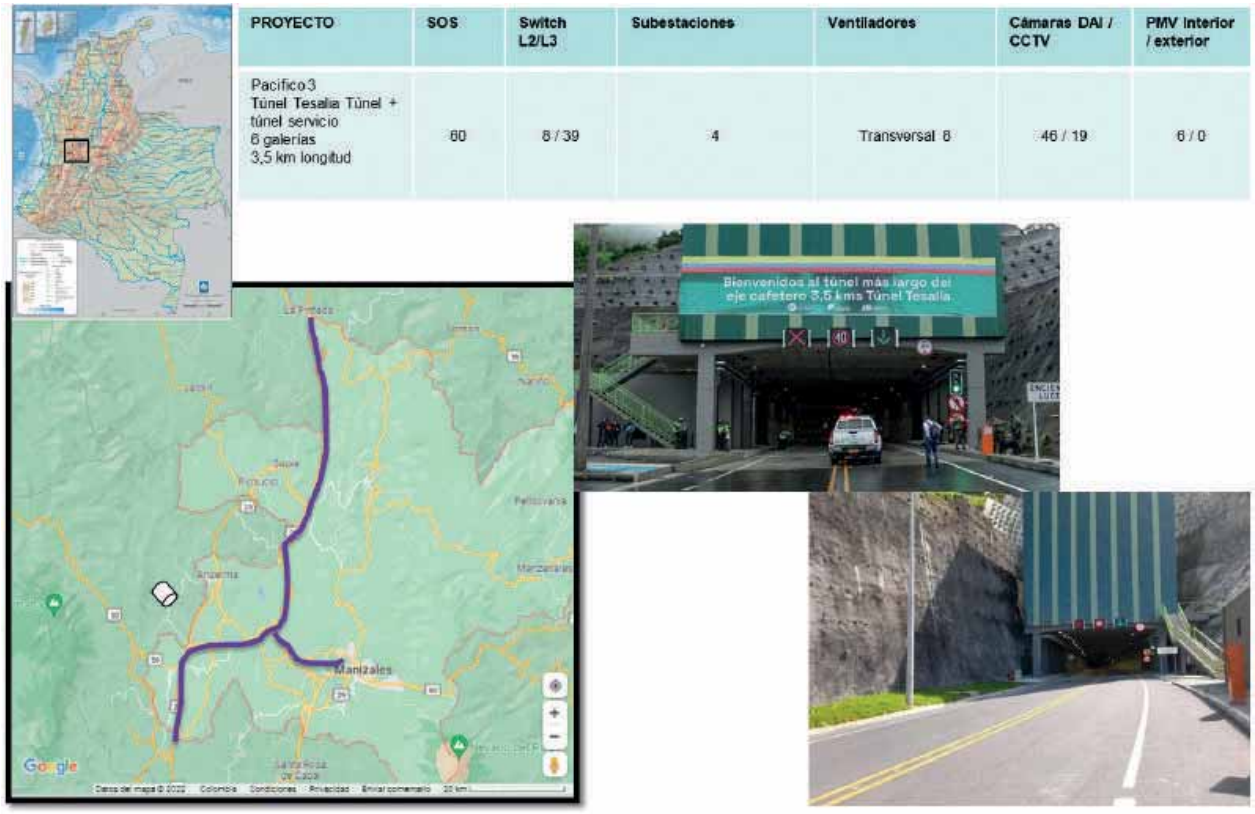
4.3.1. El Túnel de Tesalia

Inaugurado el pasado 21 de diciembre de 2.021, se puede clasificar como túneles con tráfico mayor de 2.000 vehículos por carril y de más de 3.000 metros de longitud y como túnel tipo A según el Manual de Túneles de Colombia.

Estos túneles cuentan con los equipamientos descritos a continuación:

- Iluminación normal de leds bilateral, iluminación de seguridad e iluminación de evacuación.
- Ventilación mecánica transversal formada por 8 ventiladores, 34 parejas de dámperes al interior, 4 anemómetros y 16 detectores combinados de Opacidad, CO y NO2 y 2 estaciones meteorológicas.
- 60 Estaciones de emergencia cada 65 metros equipadas con 1 postes SOS y 2 extintores en cada 1 de ellas.

- Bocas de incendio equipadas cada 75 metros con grupo de presión compuesto por bomba principal, bomba de reserva, bomba jockey para mantener la presión y aljibe de almacenamiento de agua en boca de túnel.
- Señalización vial formada por:
  - 2 paneles de mensaje variable de exterior con 2 gráficos y 3 líneas de 12 caracteres.
  - 6 paneles de mensaje variable de interior con 2 líneas de 16 caracteres.
  - 16 señales aspa flecha
  - 18 señales de limitación de velocidad.
- Señales de led para todos los equipamientos de túnel (Postes SOS, hidrantes, paradas de emergencia, …)



PROYECTO	SOS	Switch L2/L3	Subestaciones	Ventiladores	Cámaras DAI / CCTV	PMV interior / exterior
Pacífico 3 Túnel Tesalia Túnel + túnel servicio 6 galerías 3,5 km longitud	60	8 / 39	4	Transversal 8	46 / 19	6 / 0

Fig. 10 Túnel Tesalia

- Centro de control totalmente equipado y centro de control provisional en boca.
- Sistema de video vigilancia compuesto por 46 cámaras fijas, 17 mini domo y 2 cámaras PTZ (pan tilt zoom).
- Detección automática de incidentes con 46 cámaras DAI.

- Detección de incendios compuesto por:
  - 4 controladores de incendio y 3500 m de cable sensorizado para detección lineal.
  - 4 centralitas de incendio, 66 pulsadores manuales, 66 sirenas y 13 detectores de humo para los locales técnicos.
- Equipos para cierre de túnel compuestos por 6 semáforos RAV en bocas y 2 barreras de cierre de túnel.
- Radio comunicaciones con sistemas de cable radiante con 1 estación maestra y 3 esclavas y 7000 metros de cable, en túnel principal y galería.
- Megafonía a lo largo de todo el túnel con 22 amplificadores y 164 altavoces.
- La electricidad se suministra por dos acometidas diferenciadas contando con: 4 subestaciones eléctricas, 4 grupos electrógenos y 7 SAI para alimentar los equipos de emergencia.
- 1 sistema de control de gálibo.
- 4 teléfonos operativos.
- El SCADA Wonderware de control supervisa todos los sistemas integrados del túnel.
- La red de PLC está compuesta por 2 PLC redundantes STAND ALONE, 29 módulos recolectores de señales MRS, 4 pantallas HMI y 4 Gateway MODBUS.
- La red de comunicaciones en anillo está compuesta por 4 switch core, 4 switch de backbone y 30 switch de campo.
- 6 galerías de emergencia presurizadas.

Con todos estos equipamientos, el túnel de Tesalia cumple con todos los requisitos de su categoría de túneles con más de 3.000 metros incluyendo las medidas de ventilación transversal que son necesarias para este tipo de túneles.

Asimismo, cumple todas las medidas para los túneles Tipo A del Manual de Túneles de Colombia.

5. CONCLUSIONES

Estos 4 grupos de túneles tienen más de 1000 metros cada uno, disponen de un alto porcentaje de vehículos pesados y están en todos los casos en las categorías de máxima peligrosidad o la inmediata anterior, tanto en la normativa europea como en la normativa colombiana.

Todos ellos están bien equipados y cumplen tanto la normativa europea como todas las medidas para los túneles Tipo A previstas en el Manual de Túneles de Colombia en todo lo referente a instalaciones y sistemas de control de túneles.

Estos túneles están al mismo nivel y en algunos aspectos por encima de los estándares medios de equipamientos de los túneles en Europa.

6. BIBLIOGRAFÍA

DIRECTIVA 2004/54/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO, (2.004). Consejo sobre requerimientos Mínimos de seguridad en túneles de Red Transeuropea de Carreteras 20 de Abril de 2.004.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, INVIAS, (2021). Manual para el Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera para Colombia. Edición diciembre 2.021.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, (2012). Mapa Oficial Físico Político-2.012.

INCIDENTES Y ACCIDENTES SIGNIFICATIVOS EN TÚNELES DE CARRETERA. EL CASO DEL TÚNEL DE SOMPORT

Íñigo Pérez Martínez[1,2]
Carmen María Martínez Cebollada[3]
Rafael López Guarga[1,4]

1. Comité de Seguridad del túnel de Somport
2. Responsable de Seguridad del túnel de Somport (iperez@prointec.es)
3. Túnel de Somport (directoradjunto@tunelsomport.com)
4. Demarcación de Carreteras del Estado en Aragón (rlguarga@mitma.es)

La Directiva Europea 2004/54/CE sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras prescribe que la documentación de seguridad de un túnel en servicio debe incluir los informes y análisis de los incidentes y accidentes significativos elaborados por el Gestor en el plazo máximo de un mes, pero en la Directiva no se incluye una definición de lo que se considera como tal.

En el túnel de Somport a raíz de la última actualización realizada del Dosier de Seguridad se ha creado un grupo de trabajo multidisciplinar entre España y Francia para desarrollar esta cuestión. En concreto se ha concluido con una definición exacta de los incidentes y accidentes considerados significativos sobre los que es necesario elaborar un informe, se ha establecido una clasificación de estas incidencias para diferenciarlas en varios tipos, se han definido dos formatos para estos informes identificando en qué casos es preciso aplicar cada uno de ellos y por último se ha establecido el procedimiento de difusión de estos documentos entre los diferentes órganos de decisión y autoridades del túnel (CTS, CS y CIG).

Los principales datos registrados a raíz de los incidentes y accidentes significativos ocurridos en el túnel se recogen en unas tablas resumen que sirven para presentar y analizar estas incidencias. De esta forma se detallan el número de incidentes y accidentes clasificados por tipos, el número de vehículos implicados, el número de víctimas y los tiempos de cierre.

En el presente artículo se incluyen los datos correspondientes al túnel de Somport y a otros túneles europeos de similares características para analizarlos con el objetivo de establecer posibles similitudes o conclusiones extrapolables.

SIGNIFICANT INCIDENTS AND ACCIDENTS IN ROAD TUNNELS. THE CASE OF THE SOMPORT TUNNEL

Directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network prescribes that the safety documentation of a tunnel in service must include the reports and analyses of significant incidents and accidents drawn up by the Tunnel Manager within a maximum period of one month, but the Directive does not include a definition of what is considered as such.

In the Somport tunnel, as a result of the latest update of the Safety Dossier, a multidisciplinary working group was set up between Spain and France to develop this issue. Specifically, a precise definition has been established of the incidents and accidents considered to be significant on which it is necessary to draw up a report, a classification of these incidents has been enacted to differentiate them into various types, two formats have been defined for these reports, identifying in which cases each of them should be applied and, finally, the procedure for disseminating these documents to the different decision-making bodies and authorities in the tunnel (CTS, CCS and CIG) has been set up.

The main data recorded as a result of significant incidents and accidents occurring in the tunnel are collected in summary tables which are used to present and analyse these incidents. These tables detail the number of incidents classified by type, the number of vehicles involved, the number of victims and the closure times.

This article includes the data corresponding to the Somport tunnel and other European tunnels with similar characteristics in order to analyse them with the aim of establishing possible similarities or transferrable conclusions.

LES INCIDENTS ET ACCIDENTS SIGNIFICATIFS DANS LES TUNNELS ROUTIERS. L'AFFAIRE DU TUNNEL DU SOMPORT

La Directive Européenne 2004/54/CE concernant les exigences de sécurité minimales applicables aux tunnels du réseau routier transeuropéen prévoit que la documentation de sécurité d'un tunnel en service doit inclure les rapports et l'analyse des incidents et accidents significatifs élaborés par le Gestionnaire du tunnel dans un délai maximum d'un mois, mais la Directive ne comprend pas de définition de ce que l'on considère comme tel.

Au tunnel du Somport, suite à la dernière actualisation du Dossier de Sécurité, un groupe de travail multidisciplinaire entre l'Espagne et la France a été créé afin de travailler sur cette question. Concrètement ce travail s'est conclu sur une définition exacte des incidents et accidents considérés comme significatifs et pour lesquels l'élaboration d'un rapport est nécessaire; une classification de ces incidents a été établie afin de les différencier en plusieurs types; deux formats ont été définis pour ces rapports, identifiant dans quels cas chacun d'eux doit être appliqué, et la procédure de diffusion de ces documents auprès des différents organes de décision et autorités du tunnel (CTS, CS et CIG) a également été établie.

Les principales données enregistrées à la suite des incidents et accidents significatifs survenus dans le tunnel sont incluses dans des tableaux récapitulatifs qui servent à présenter et analyser ces incidents. Ainsi, le nombre d'incidents est classé par type, nombre de véhicules impliqués, nombre de victimes et temps de fermeture.

Cet article reprend les données correspondant au tunnel du Somport et à d'autres tunnels européens de caractéristiques similaires pour les analyser en vue d'établir d'éventuelles similitudes ou des conclusions extrapolables.

1. EL TÚNEL DE SOMPORT

El túnel de Somport es un túnel transfronterizo España- Francia ubicado en la zona central de la cordillera de los Pirineos, y tiene una longitud total de 8.608m, 5.759 metros se encuentran en el lado español y 2.849 metros en el lado francés.

Este túnel pertenece al itinerario europeo E-7 Pau (Francia) – Zaragoza (España), integrado a su vez en los ejes Madrid-Zaragoza-Pau-Toulouse y Valencia-Zaragoza-Pau-Bordeaux influyendo por un lado en las comunicaciones entre Europa del Este y del Sur con España y Portugal y por otro en las correspondientes desde Europa del Norte y del Oeste hacia España.

En 1988 los Gobiernos español y francés acordaron estudiar la viabilidad de un túnel dentro de la planificación viaria de la frontera pirenaica. Las obras del túnel de Somport comenzaron en enero de 1994 y tras 9 años el túnel se puso en servicio el 17 de enero de 2003.

Se trata de un túnel bidireccional con un carril por sentido de 3,50m separados por una mediana central de 1,0m, con arcenes de 0,50m y aceras de 0,75m, que dispone de un gálibo vertical de 4,55m.

El antiguo túnel ferroviario se emplea actualmente como galería de evacuación paralela y además dispone de 19 galerías de evacuación (2 galerías con salida al exterior) dotadas con 19 refugios peatonales, que son locales seguros frente a incendios. También existen 9 galerías de retorno y 5 apartaderos, además de 86 puestos de emergencia repartidos por el túnel que permiten la comunicación con el centro de control.

Las instalaciones con la que está dotado esta infraestructura fueron diseñadas conforme a las normativas de los dos países afectados , a pesar de que su concepción y construcción es anterior a la Directiva Europea 2004/54/CE cumpliendo con sus prescripciones. A continuación se resumen las características principales:

- Ventilación: La ventilación es de tipo semitransversal reversible. El túnel está zonificado en 7 cantones de ventilación y dispone de 3 estaciones de ventilación (una en cada boca y una en el interior) desde las que se extrae humo (incendio) o se insufla aire fresco (explotación o incendio),
- Iluminación: Iluminación normal, iluminación de seguridad e iluminación de balizamiento con lámparas de vapor sodio.
- Alimentación eléctrica: el túnel cuenta con 4 acometidas (2 francesas y 2 españolas) que alimentan 6 estaciones eléctricas repartidas a lo largo del túnel donde se encuentran los transformadores, SAI's y cuadros de distribución. La red interior del túnel está diseñada para conmutar automáticamente en caso de que el sistema detecte una falta de suministro eléctrico por una de las dos compañías (francesa o española).
- Red de protección contra incendios: hay hidrantes situados cada 200m que están alimentados por una tubería de agua ø250 desde sendos depósitos situados en ambas bocas de 125m^3 y 150m^3 respectivamente.
- Puestos de emergencia: el túnel dispone de 43 parejas de nichos enfrentados en ambos hastiales con postes SOS, extintores e hidrantes (hastial este) y también de 19 refugios que cuentan con postes SOS, extintores y megafonía.
- Señalización: hay colocadas barreras en las bocas, semáforos interiores (ámbar y rojo + PMV de STOP), paneles de mensaje variable (exteriores e interiores), así como carteles y señales interiores iluminados.
- Circuito cerrado de televisión y DAI: las cámaras están instaladas cada 100m en el interior del túnel, así como en refugios y apartaderos, y además en cada boca se dispone de una cámara móvil. Las cámaras del interior están asociadas a un sistema Detección Automática de Incidentes que genera alarmas en caso de detectar comportamientos anómalos en la circulación.
- GTC: el sistema de gestión técnica centralizada facilita la labor en el Centro de Control automatizando las secuencias más habituales y jerarquizando las alarmas y datos de los equipamientos.

- Radiocomunicaciones y mensajes vía FM: además de los postes SOS es posible la comunicación en el interior del túnel a través de 4 canales de radiocomunicaciones. También se pueden insertar mensajes en los canales de radio.

En cuanto a los órganos de decisión del túnel cabe señalar que al tratarse de un túnel transfronterizo ha sido necesario la creación de varios organismos para desempeñar las funciones de toma de mando, de asesoramiento y de gestión de cara al buen funcionamiento de la explotación del túnel. De esta manera la Autoridad Administrativa del túnel es la Comisión Intergubernamental (CIG), que fue creada el 11 de octubre de 2001. El Comité de Seguridad (CS heredero de la Comisión Técnica Mixta hispano-francesa durante las obras) cumple un papel de asesoramiento a la CIG. A su vez la Comisión Técnica de Seguimiento (CTS) es la entidad que gestiona la aplicación del Plan de Socorro Binacional y coordina a los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad de ambos países. Por último el papel de Gestor del túnel recae sobre el Ministerio de Fomento.

Por otro lado, en cuanto a la organización de la explotación y a los medios disponibles de cara a una intervención en caso de necesidad, el túnel cuenta de manera continua con un jefe de turno, un operador, seis agentes de explotación y una persona de mantenimiento. Los agentes de explotación se sitúan en las bocas realizando controles a todos los vehículos pesados antes de su entrada en el túnel y son los equipos de primera intervención en caso de incidente o accidente. Están repartidos en dos equipos de tres agentes por boca y tienen a su disposición un camión de bomberos por equipo, además de medios para la intervención en caso de riesgo NRBQ. En caso de que se produzca un incidente de especial gravedad (accidente, incendio, fuga MMPP…) o que durante el desarrollo del mismo se prevea que los medios propios del túnel puedan ser insuficientes se activa el Plan de Socorro Binacional (PSB) que supone la intervención de medios exteriores (bomberos, sanitarios y fuerzas de seguridad) de ambos países.

2. NORMATIVA DE REFERENCIA

Este túnel se sitúa en la red transeuropea de transporte (RTE-T) y por tanto, dada su longitud, entra en el ámbito de aplicación de la Directiva Europea 2004/54/CE del 29 de abril 2004 sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras.

En esta Directiva se hace referencia a los incidentes significativos y se indica que serán objeto de un informe elaborado por el Gestor y trasladado al Responsable de Seguridad, que deberá transmitirse en el plazo máximo de un mes a la autoridad administrativa, a los servicios de emergencia y al Responsable de Seguridad. Sin embargo no se precisa que acontecimientos se consideran como tales.

En la normativa española, el tratamiento dado a los incidentes significativas en el Real Decreto 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado es el mismo que en la Directiva, no existiendo más normativa al respecto.

Por el contrario en Francia sí se dispone de una definición de incidentes y accidentes significativos incluida en el artículo 2 del Decreto de 18 de abril de 2007 de transposición de la Directiva Europea 2004/54/CE a la normativa francesa (Arrêté du 18 avril 2007 portant application des dispositions des articles R. 118-3-9 et R. 118-4-4 du code de la voirie routière et relatif à la composition et la mise à jour des dossiers préliminaire et de sécurité et au compte rendu des incidents et accidents significatifs).

3. INCIDENTESY ACCIDENTES SIGNIFICATIVOS

En la reunión del 3 de diciembre de 2020 el Comité de Seguridad aceptó una primera definición de los incidentes significativos, tomando como referencia la normativa francesa, es decir aquellos que incluían heridos, incendios o cierres no programados del túnel.

Asimismo el Comité de Seguridad decidió que se crease un grupo de trabajo para precisar los criterios definitivos de lo que se debía considerar un incidente significativo, el contenido de los informes de estos eventos y el modo de difusión de estos informes y de su análisis por parte del Explotador, del Gestor y del Responsable de Seguridad.

El grupo de trabajo estaba compuesto por un miembro del Ministerio del Interior francés, un miembro de los bomberos franceses, un miembro de protección civil español, un representante de la empresa explotadora y por el Responsable de Seguridad. Tras varios contactos previos, el grupo de trabajo se reunió el 18 de marzo de 2021, concluyendo con las siguientes propuestas que fueron validadas en junio de 2021 por la Comisión Integubernamental:

- Definición de incidente significativo

  Se consideran incidentes y accidentes significativos los siguientes:

  - Todos los accidentes con heridos
  - Todos los incendios ocurridos en el interior del túnel
  - Cualquier evento que implique el cierre no programado del túnel, a excepción de aquellos vinculados a la gestión del tráfico en el exterior del túnel

- Informes detallados e informes de síntesis

  El modelo de explotación del túnel de Somport, con la presencia de tres agentes de primera intervención en cada boca, implica que la forma de actuación ante cualquier incidente en el túnel sea la de intervención de estos agentes ante cualquier incidencia en el túnel que pueda suponer un riesgo para la seguridad. El desplazamiento de este personal al interior del túnel supone de facto el cierre automático del túnel en aplicación de las condiciones mínimas de explotación. Así incidentes habituales en el interior del túnel, como vehículos lentos o paradas de vehículos, que en muchos casos podrían haberse resuelto por sí mismos o por los propios usuarios sin necesidad de cierre del túnel, han supuesto la actuación de los agentes y por tanto el cierre del túnel, pasando a considerarse como incidente significativo.

  Esta particularidad del túnel de Somport hizo que el grupo de trabajo distinguiese entre incidentes y accidentes significativos que debían ser objeto de un informe detallado y aquellos para los que era suficiente un informe de síntesis, considerando que el primer grupo estaba conformado por los siguientes eventos:

  - Todos los accidentes con heridos
  - Todos los incendios ocurridos en el interior del túnel

Foto incendio de un vehículo ligero

- Cualquier evento que implique el cierre no programado del túnel, a excepción de aquellos vinculados a la gestión del tráfico en el exterior del túnel,
  - o de más de una hora de duración
  - o en el que resulte implicado un vehículo pesado o un autobús
  - o en el que resulte implicado un transporte de mercancías peligrosas

Foto fuga de MMPP en plataforma de entrada francesa

En cualquier caso, se acordó que el contenido de los informes debe incluir los siguientes datos:

a) Fecha y hora del incidente o accidente, su ubicación y el tubo involucrado;

b) Tipo de incidente o accidente;

c) Fecha y hora en que se restableció el tráfico normal en el túnel;

d) Número de heridos leves; de heridos graves y de víctimas mortales;

e) Número de vehículos implicados distinguiendo entre vehículos ligeros, vehículos de dos ruedas, vehículos todoterreno, autobuses, otros vehículos y, en su caso, el transporte de mercancías peligrosas;

f) Daños en el túnel;

g) Condiciones de circulación durante el tratamiento del incidente o accidente;

h) Condiciones en las que se detectó el incidente o accidente;

i) Causas del incidente o accidente;

j) Medios y equipamiento empleados en la resolución;

k) Información dada a los usuarios y los medios para su difusión;

l) Comportamientos de los usuarios;

m) Otras medidas adoptadas.

Para el caso del informe detallado se adoptó el modelo de la Base de datos de inventario, incidencias e inspecciones en túneles de la Red de Carreteras del Estado (BIT 2.1) del Ministerio de Fomento. Mientras que para el informe detallado se elaboró un formato con más detalle añadiendo cronología de los hechos y tiempos de respuesta de los medios internos y exteriores, fotos, espacios para observaciones, análisis del funcionamiento del equipamiento, comprobación de los vehículos detenidos en el interior del túnel y análisis de la gestión de los usuarios en los refugios.

Para la elaboración de estos informes se decidió clasificar los incidentes y accidentes significativos en los siguientes tipos:

A - Heridos;

B - Incendios;

C - Cierre de túnel no programado.

C.1: Motivos técnicos

C.2: Intervención de equipos internos de socorro:

C2.1: Vehículos lentos o parada de usuarios

C2.2: Avería o accidente sin humo

C2.3: Evento con humo

C2.4: Evento con transporte de materiales peligrosos

C2.5: Evento en plataformas

C2.6: Evento con autobús

C3: Varios

- Modo y plazos de difusión

En el caso de los informes detallados, se fijó un plazo máximo de un mes, tal y como estipula el artículo 6 de la Directiva Europea 2004/54/CE, para su transmisión a la Comisión Intergubernamental, el Comité de Seguridad y la Comisión Técnica de Seguimiento a través de sus secretarios. Estos informes se incluyen a partir de entonces en la documentación enviada para las reuniones semestrales de estos organismos y se exponen en dichas reuniones, salvo en la Comisión Intergubernamental donde es suficiente con los resúmenes presentados en los informes trimestrales y con las opiniones al respecto del Comité de Seguridad y la Comisión Técnica de Seguimiento.

Por el contrario los informes de síntesis no es necesario distribuirlos a los órganos de decisión del túnel (CIG, CS y CTS). Para informar de estas incidencias se estableció que los informes trimestrales tanto del Explotador como del Responsable de Seguridad eran suficientemente detallados e informaban adecuadamente de los incidentes y accidentes significativos. Únicamente se consideró necesario completar la información añadiendo una tabla resumen que detallase su número y tipología y si ha sido necesaria la activación del Plan de Socorro Binacional.

4. INCIDENTES SIGNIFICATIVOS EN EL TÚNEL DE SOMPORT

A continuación se muestran en tablas y gráficos los datos correspondientes a los incidentes y accidentes significativos registrados en el túnel de Somport desde el año 2016 hasta el 2021:

INCIDENTES Y ACCIDENTES SIGNIFICATIVOS. T. SOMPORT	2016	2017	2018	2019	2020	2021
A. ACCIDENTE CON HERIDOS	0	0	0	0	0	1
B. INCENDIO	0	1	0	0	0	0
C. CIERRE NO PROGRAMADO	23	29	32	33	15	7
C.1 MOTIVO TÉCNICO	5	2	0	2	2	0
C.2 INTERVENCIÓN EQUIPOS INT.	15	25	29	31	11	6
C.2.1 Veh. lento/parada	6	11	10	20	5	1
C.2.2 Avería/accidente	6	13	16	10	5	3
C.2.3 Incidente con humo	2	1	0	0	0	0
C.2.4 MMPP	0	0	1	0	1	2
C.2.5 Evento en plataf.	0	0	2	0	0	0
C.2.6 Evento con autobús	1	0	0	1	0	0
C.3 VARIOS	3	2	3	0	2	1
TOTAL	23	30	32	33	15	8
ACTIVACIÓN PSB	0	0	1	0	0	0

Tabla de incidentes y accidentes significativos por tipología y año

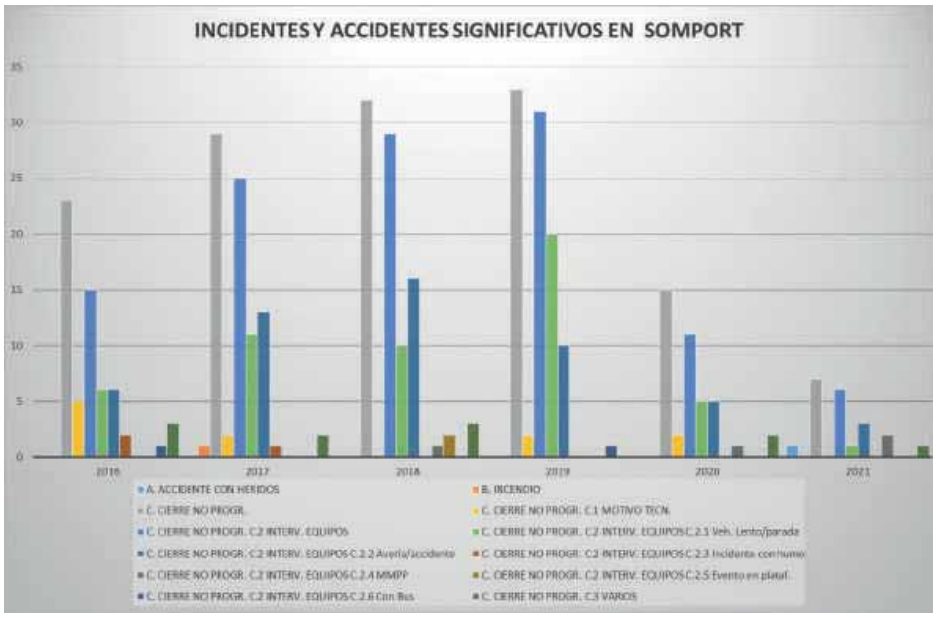


Gráfico de incidentes y accidentes significativos por tipología y año

Las conclusiones que se pueden extraer respecto al número de incidentes que se han producido estos últimos años en el túnel son las siguientes:

- Afortunadamente no se han producido prácticamente accidentes con heridos ni incendios, por lo que prácticamente el 99% de los incidentes significativos son motivados por cierres no programados.
- La mayor parte de estos cierres no programados son motivados por incidentes que requieren la intervención de los equipos de socorro del túnel, siendo el 75% del total producidos por vehículos lentos, paradas de usuarios en el túnel o por averías, los cuales en general se resuelven con relativa facilidad y con rapidez en gran parte gracias a la disponibilidad de estos equipos en las bocas del túnel.
- El número de intervenciones por eventos con presencia de humo (roturas de turbo u otros), que inicialmente se trata como si fuera un incendio, es también bajo. Aunque estos eventos sirven para evaluar la actuación del personal y el funcionamiento de las instalaciones, especialmente de la ventilación.
- En los últimos años solamente se ha activado una vez el Plan de Socorro Binacional (intervención de medios exteriores) debido a una fuga de mercancías peligrosas en una de las plataformas.
- La peculiaridad de que el túnel de Somport cuente con equipos de agentes de explotación en las bocas, realizando controles a todos los vehículos pesados y autobuses antes de su entrada al túnel, probablemente sea la causa de que el número de incidentes registrados sea relativamente pequeño y que las consecuencias de los mismos sean leves.
- El número de eventos significativos se ha reducido notablemente en los 2 últimos años, con mayor evidencia en el año 2021. El descenso producido en la IMD desde el máximo de 1.405 v/d del 2019 hasta aproximadamente los 900 v/d del 2020 (pandemia) y 2021 explica en parte pero no por completo esta reducción en el número de acontecimientos. El descenso de la intensidad del tráfico ha sido más importante para el caso de los vehículos ligeros, mientras que el número de vehículos pesados se ha mantenido en niveles similares. Teniendo en cuenta que la mayor parte de vehículos implicados en los incidentes y accidentes significativos son vehículos ligeros (73%) y en menor medida vehículos pesados (20%), de los cuales un porcentaje muy bajo se corresponden con MMPP (3%).

TIEMPOS DE CIERRE	2016	2017	2018	2019	2020	2021
A. ACCIDENTE CON HERIDOS	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
B. INCENDIO	0:00	2:14	0:00	0:00	0:00	0:00
C. CIERRE DEL TÚNEL NO PROGRAMADO	10:18	7:27	10:00	8:43	4:04	1:56
C.1 Razones técnicas	3:43	0:18	0:00	0:30	0:13	0:00
C.2 Intervención equipos internos	6:23	6:27	9:44	8:13	3:38	1:46
C.2.1 Vehículos lentos o parada de usuarios	0:56	1:18	1:13	4:22	0:55	0:07
C.2.2 Avería o accidente sin humo	3:04	4:51	5:12	3:14	2:21	0:57
C.2.3 Incidente con humo	1:46	0:18	0:00	0:00	0:00	0:00
C.2.4 MMPP implicado	0:00	0:00	3:10	0:00	0:22	0:42
C.2.5 Incidente en plataformas	0:00	0:00	0:09	0:00	0:00	0:00
C.2.6 Autobús implicado	0:37	0:00	0:00	0:37	0:00	0:00
C.3 Varios	0:12	0:42	0:16	0:00	0:13	0:10
TOTAL TIEMPOS DE CIERRE	**10:18**	**9:41**	**10:00**	**8:43**	**4:04**	**1:56**

Tabla de tiempos de cierre por tipología y año

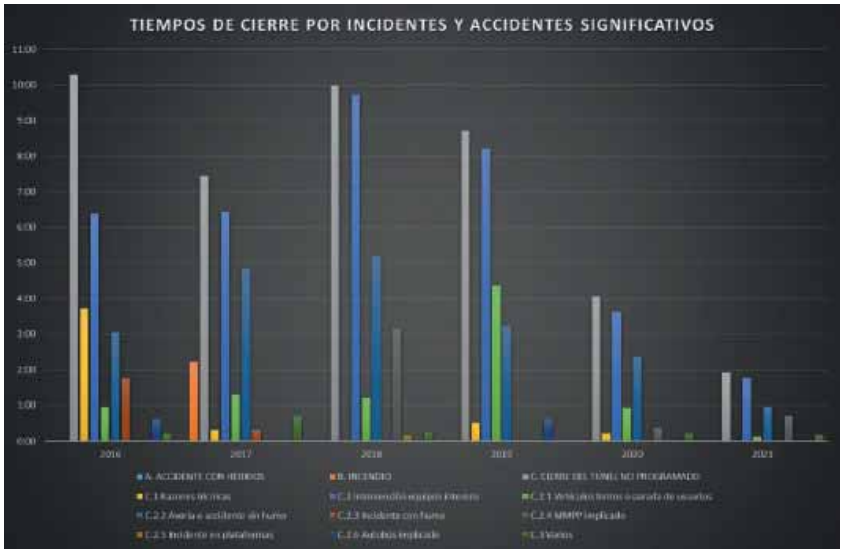


Gráfico de tiempos de cierre por tipología y año

En cuanto a los tiempos de cierre, las conclusiones que se pueden extraer son similares pero con algunos matices:

- Los cierres no programados también implican el mayor tiempo de cierre del túnel (95%).
- No obstante se observa que el tiempo de cierre ocasionado por los incendios es proporcionalmente mayor en el cómputo global, aunque sigue manteniéndose en porcentajes pequeños, lo cual por otra parte es lógico dado los tiempos de intervención que requieren este tipo de incidente.
- Por el contrario los tiempos de cierre motivados por vehículos lentos, paradas de usuarios en el túnel o por averías, aun suponiendo un 64% del total reducen su impacto en duración total de cierre al tratarse de incidentes con plazos de resolución en general mucho menores.
- Igualmente cuando se ha visto implicado un transporte de mercancías peligrosas, los tiempos de cierre aumentan, aunque debido al bajo número de este tipo de incidentes porcentualmente tampoco tienen excesiva repercusión.
- En el periodo 2016-2019 el tiempo medio de cierre estaba en el entorno de 9 horas, superando algunos años las 10 horas. En los dos últimos años los tiempos medios han bajado notablemente hasta el entorno de las 3 horas y media. Como ya se ha indicado la razón seguramente se encuentre en el descenso de la IMD en estos años, especialmente en la correspondiente a los vehículos ligeros que son los que en mayor medida se ven implicados en estos eventos.

De todos los incidentes y accidentes significativos registrados en el túnel se han realizado los correspondientes informes de retorno de la experiencia tanto por parte de la empresa explotadora como por parte del Responsable de Seguridad del túnel que han sido remitidos al Gestor para su análisis. Las conclusiones obtenidas son que las medidas de seguridad del túnel y los protocolos de actuación establecidos (Plan de Actuación ante Emergencias: PAE/PIS y Plan de Socorro Binacional: PSB) funcionan correctamente y que las intervenciones llevadas a cabo por el personal del centro de control y por los agentes de explotación de la empresa explotadora fueron adecuadas y conformes a dichos protocolos. No obstante siempre es posible la mejora y por ello, tras el análisis de los incidentes producidos por fugas de mercancías peligrosas detectadas durante los controles rutinarios en las plataformas, se estableció que para la resolución de este tipo de incidencias, no era necesaria la activación del Plan de Socorro Binacional y por tanto de un número muy importante de medios exteriores de ambos países, ya que se trataba de pequeñas fugas por goteo del material transportado que hasta la fecha se han podido resolver con los medios del túnel o con la actuación de los propios chóferes de los camiones. Por ello se estableció un anexo al PAE/PIS con un procedimiento específico para las "Fugas de MMPPP en

plataformas" con el objetivo de descartar la activación del PSB y de medios exteriores excesivos en el caso de que la fuga detectada fuera de pequeña entidad y no representase un problema grave de seguridad, minimizando además con ello los tiempos de cierre y las afecciones innecesarias al resto de usuarios.

5. INCIDENTES SIGNIFICATIVOS EN OTROS TÚNELES EN EUROPA

Se han seleccionado los túneles bidireccionales de características similares al túnel de Somport más importantes de Europa:

- Túnel de Montblanc: túnel situado entre Francia e Italia de 11.611m de longitud.
- Túnel de Gran San Bernardo: túnel situado entre Suiza e Italia con una longitud de 5.798m.
- Túnel de San Gotardo: túnel más largo de Europa con 16.942m situado en Suiza. Actualmente se está construyendo el segundo tubo.
- Túnel de Arlberg: túnel situado en Austria tiene una longitud de 13.972m.
- Túnel de Fréjus: situado entre Francia e Italia tiene una longitud de 12.985m y el segundo tubo actualmente se encuentra en construcción.
- Túnel Maurice-Lemaire: túnel bidireccional más largo completamente en Francia con una longitud de 6.950m.
- Túnel San Bernardino: túnel situado en Suiza de 6.656m de longitud.
- Túnel Mappo Morettina: túnel también situado en Suiza con una longitud de 5.500m.

Los datos recopilados entre el año 2016 y 2020 de incidentes y accidentes significativos ocurridos en estos túneles se muestran a continuación de forma resumida en tablas y gráficos:

TÚNEL	TOTAL	ACCIDENTE CON HERIDOS	INCENDIO	NO PROGR.
S. GOTARDO	545	22	14	509
		4,00%	2,60%	93,40%
ARLBERG	431	9	2	420
		2,10%	0,50%	97,40%
FREJUS	1.421	1	3	1.417
		0,10%	0,20%	99,70%
MONTBLANC	969	0	0	969
		0,00%	0,00%	100,00%
MAURICE LEMAIRE	307	1	0	306
		0,30%	0,00%	99,70%
S. BERNARDINO	966	2	5	959
		0,20%	0,50%	99,30%
GRAN S. BERNARDO	698	0	0	698
		0,00%	0,00%	100,00%
MAPPO MORETTINA	427	13	0	414
		3,00%	0,00%	97,00%
SOMPORT	133	0	1	132
		0,00%	0,80%	99,20%

Tabla por tipología en túneles europeos

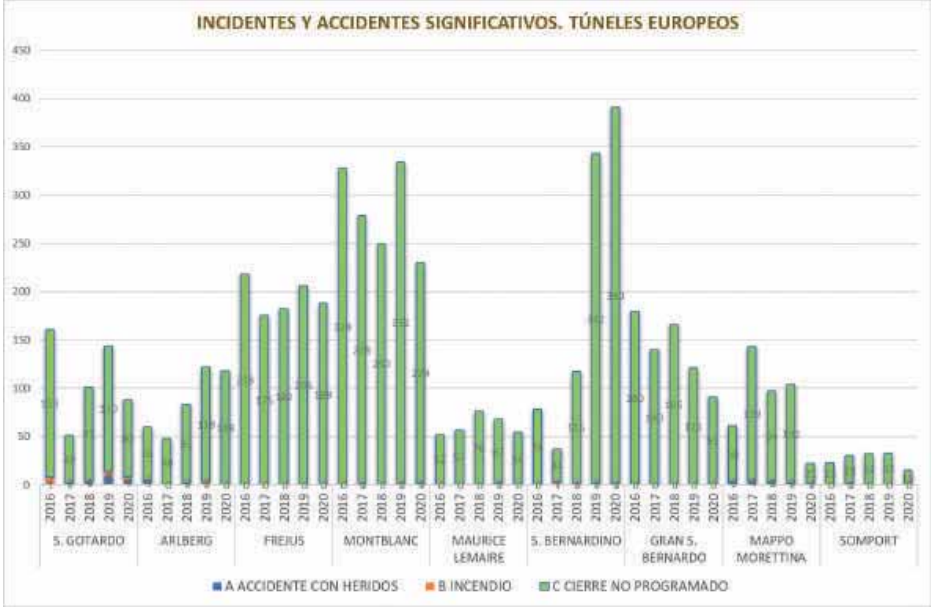


Gráfico por tipología y año en túneles europeos

Al igual que en el caso del túnel de Somport se observa que el número de accidentes con heridos y de incendios es muy inferior al resto de cierres no programados, siendo el porcentaje de éstos superior al 99% en la mayoría de los túneles. Solamente en el caso del túnel de San Gotardo, del túnel de Arlberg y en el de Mappo-Morettina el número de accidentes con heridos y/o de incendios es algo superior al resto de túneles (1-5%). Cabe señalar que en el caso de los túneles de San Gotardo y de Mappo-Morettina la intensidad de tráfico es muy superior a la del resto de túneles con una IMD de 12.450 v/d y 22.000 v/d respectivamente.

No se observa relación directa entre el número total de incidentes y la IMD de los túneles, ya que los túneles con mayor número de eventos registrados son Montblanc (media de 284) y Fréjus (media de 194), junto con el túnel de San Bernardino cuyos registros han crecido exponencialmente los dos últimos años, mientras que los niveles de tráfico más elevados se corresponden con San Gotardo (IMDpromedio: 16.250 v/d) y Mappo-Morettina (IMDpromedio: 24.600 v/d). Tampoco se encuentra relación con el volumen de vehículos pesados.

La tendencia general parece más o menos estable o con ligera tendencia al descenso en los últimos años, posiblemente debido al descenso generalizado en la IMD del 2020, salvo en el caso ya comentado del túnel de San Bernardino donde muestra una clara evolución al alza.

En el caso de los túneles de Montblanc y del Gran San Bernardo se dispone de un desglose más detallado de los cierres no programados que permite un análisis más exhaustivo y una comparación más precisa respecto al túnel de Somport:

		INCIDENTES Y ACCIDENTES SIGNIFICATIVOS											TIEMPOS DE CIERRE (h.min.)
		A	B	C									
				CIERRE NO PROGR.									
		ACCIDENTE CON HERIDOS	INCENDIO	C.1 MOTIVO TÉCN.	C.2 INTERV. EQUIPOS SOCORRO						C.3 VARIOS	TOT. A+B+C	
					C.2.1 Veh. Lento/parada	C.2.2 Avería/Accidente	C.2.3 Incidente con humo	C.2.4 MMPP	C.2.5 Evento en plataf.	C.2.6 Evento con bus			
MONTBLANC	2016	0	0	31	134	104	1		1		11	328	52:00
	2017	0	1	29	109	82	6		2		2	279	61:43
	2018	0	0	21	89	94	2		2		5	250	53:28
	2019	0	2	33	141	78	6		3		10	334	76:09
	2020	1	0	38	96	58	2		1		3	230	58:46
G. S. BERNARDO	2016	0	0	17	125	18	1	0	15	0	4	180	20:01
	2017	0	0	4	107	17	2	0	10	0	0	140	2266:23
	2018	0	0	13	114	20	0	0	18	0	1	166	17:57
	2019	0	0	5	97	10	0	0	8	0	1	121	13:19
	2020	0	0	9	58	9	0	0	8	0	7	91	12:22
SOMPORT	2016	0	0	5	6	6	2	0	0	1	3	23	10:18
	2017	0	1	2	11	13	1	0	0	0	2	30	9:41
	2018	0	0	0	10	16	0	1	2	0	3	32	10:00
	2019	0	0	2	20	10	0	0	0	1	0	33	8:43
	2020	0	0	2	5	5	0	1	0	0	2	15	4:04

Tabla por tipología y año en tres túneles europeos

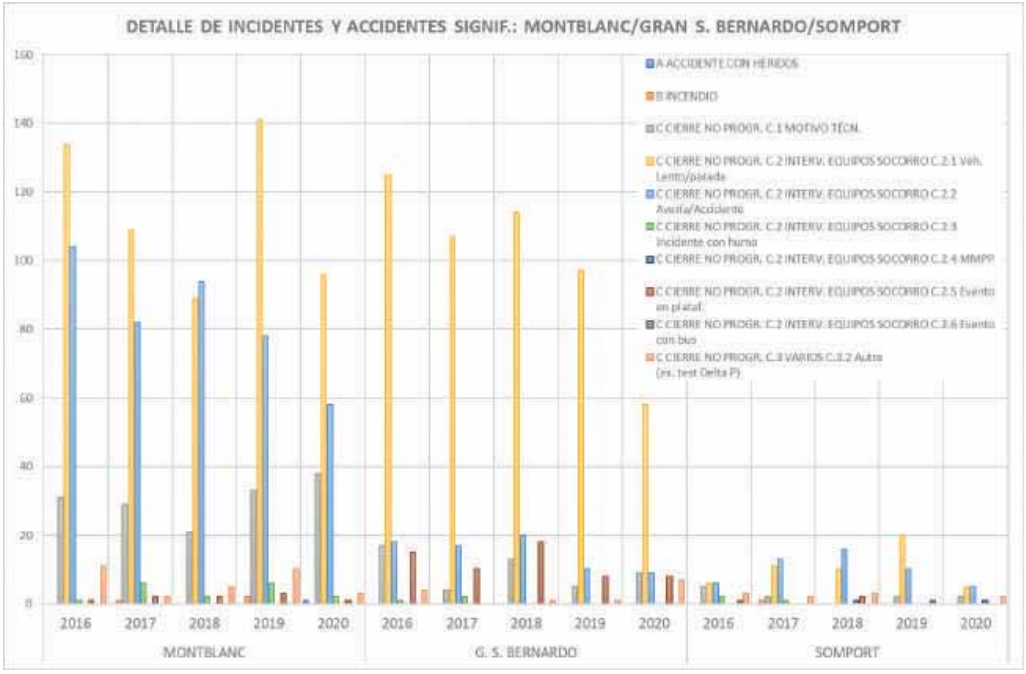


Gráfico por tipología y año en tres túneles europeos

Del análisis de estos datos se deducen conclusiones para estos dos túneles europeos similares a las del túnel de Somport:

- Como ya se ha indicado no se han producido prácticamente accidentes con heridos ni incendios en estos túneles.
- La mayor parte de los cierres no programados son motivados por vehículos lentos, paradas de usuarios en el túnel o por averías: 82% en ambos túneles frente al 78% en el túnel de Somport.
- El número de eventos con presencia de humo también es bajo.
- El número total de incidentes y accidentes significativos es considerablemente superior en el túnel de Montblanc. Hay que tener en cuenta que la IMD de este túnel (3.552 v/d) es entre 3 y 4 veces superior a la del túnel Gran San Bernardo (1.160 v/d) y a la del túnel de Somport (915 v/d).
- Los motivos técnicos representan entre el 7% y el 11% de los cierres de túnel. Es importante realizar un adecuado mantenimiento preventivo y correctivo para intentar reducir el número de estos cierres y los tiempos de afección a los usuarios lo máximo posible.

6. INCIDENTES SIGNIFICATIVOS EN OTROS TÚNELES EN ESPAÑA

De los túneles españoles de características similares al túnel de Somport sólo se han podido obtener datos de los túneles del Cadí y de Bielsa-Agagnouet. A continuación se muestra un resumen de los mismos:

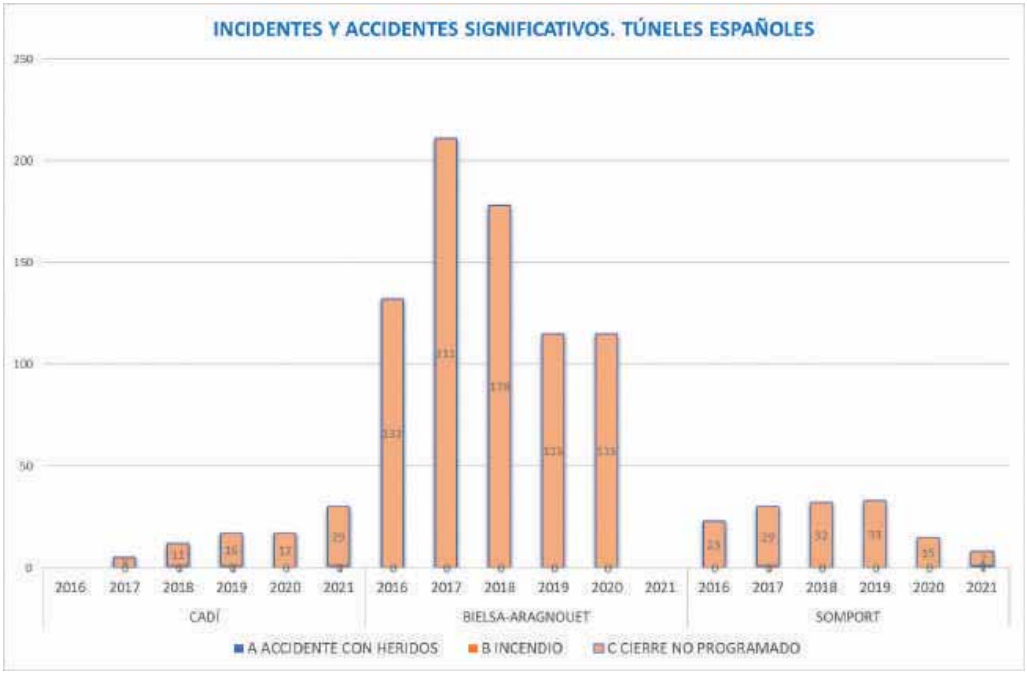


Gráfico de incidentes y accidentes en túneles españoles por tipología principal y año

En primer lugar cabe señalar que al igual que en los casos anteriores el número de incidentes graves en estos túneles es muy bajo y que las consecuencias de los mismos en general han sido leves, únicamente en el túnel del Cadí se ha producido 1 herido grave y 1 muerto en estos últimos años. Aunque no se muestra en el gráfico tampoco se han producido apenas incidentes con humos. En este gráfico destaca el número de cierres no

programados registrados en el túnel de Bielsa respecto a los otros dos túneles analizados, si bien en los últimos dos años se observa un descenso en los mismos. En el caso de los túneles españoles tampoco se observa una relación directa entre la intensidad de tráfico y el número de incidentes ocurridos.

Los datos obtenidos del túnel del Cadí permiten realizar una comparativa algo más detallada al disponer de una clasificación más desglosada de los incidentes, sin embargo la casuística de este túnel no se parece demasiado a la del túnel de Somport. La mayor parte de los eventos registrados en este túnel son debidos a conceptos varios: excesos de gálibo, peatones y ciclistas (76%), que no obstante sólo representa el 35% de los tiempos de cierre. Por otro lado los accidentes e incendios registrados suponen el 7% del total de incidentes pero representan el 45% del tiempo de cierre.

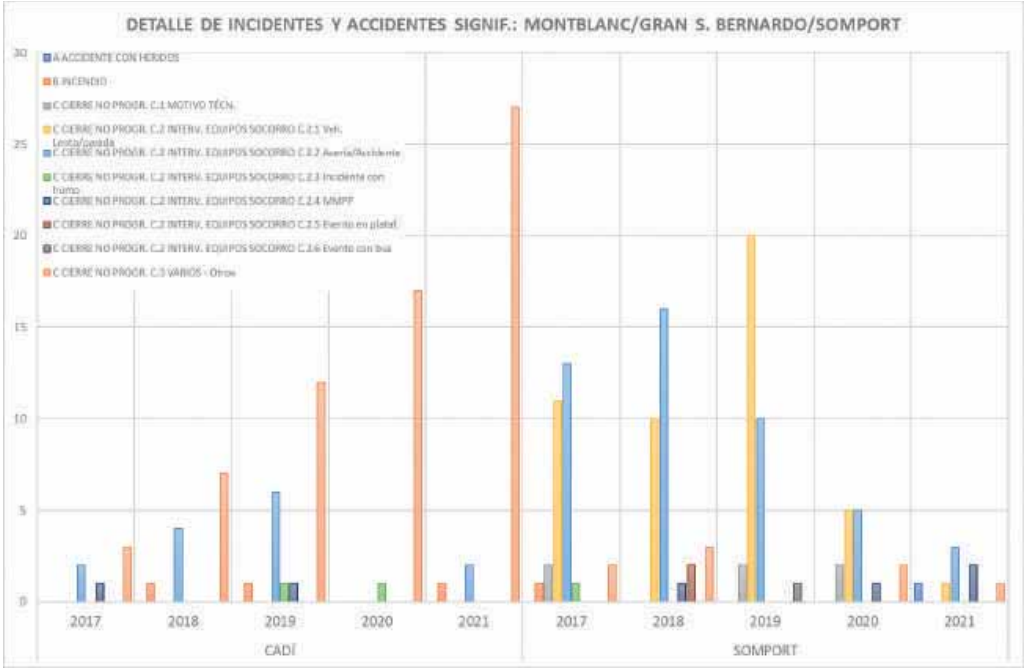


Gráfico de incidentes y accidentes en túneles españoles por tipología desglosada y año

7. CONCLUSIONES

La Directiva Europea 2004/54/CE sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras prescribe que la documentación de seguridad de un túnel en servicio debe incluir los informes y análisis de los incidentes y accidentes significativos elaborados por el Gestor en el plazo máximo de un mes, pero en la Directiva no se incluye una definición de lo que se considera como tal.

En el túnel de Somport se creó un grupo de trabajo específico para su definición concluyendo que se consideran incidentes y accidentes significativos los siguientes:

- Todos los accidentes con heridos
- Todos los incendios ocurridos en el interior del túnel
- Cualquier evento que implique el cierre no programado del túnel, a excepción de aquellos vinculados a la gestión del tráfico en el exterior del túnel

Para la elaboración de los informes que deben elaborar tanto la empresa explotadora como el Responsable de Seguridad se decidió clasificar los incidentes y accidentes significativos en los siguientes tipos:

A - Heridos;

B - Incendios;

C - Cierre de túnel no programado.

C.1: Motivos técnicos

C.2: Intervención de equipos internos de socorro:

C2.1: Vehículos lentos o parada de usuarios

C2.2: Avería o accidente sin humo

C2.3: Evento con humo

C2.4: Evento con transporte de materiales peligrosos

C2.5: Evento en plataformas

C2.6: Evento con autobús

C3: Varios

Es importante que en la redacción de estos informes de retorno de la experiencia se realice un análisis de las causas y de la actuación llevada a cabo, con el objetivo de buscar posibles medidas de mejora en las medidas de seguridad y en los protocolos de actuación. En Somport, aun cuando la resolución de los incidentes y la intervención del personal del túnel han sido correctas, se ha seguido trabajando en actualizar y mejorar los planes de seguridad. Por ejemplo se han complementado los procedimientos de intervención con un anexo para "Fugas de MMPPP en plataformas" con el objetivo de descartar la activación del Plan de Socorro Binacional y de medios exteriores excesivos en caso de que la fuga detectada sea de pequeña entidad y no represente un problema grave de seguridad, minimizando además los tiempos de cierre y las afecciones innecesarias al resto de usuarios.

El análisis de los incidentes ocurridos entre 2016 y 2021 en el túnel de Somport muestra que el número de incidencias graves (accidentes con heridos e incendios) es muy bajo, por lo que se puede considerar que el túnel es una infraestructura segura. Esto no implica que los actores responsables de la seguridad del túnel deban relajarse en la aplicación de los procedimientos y en las medidas de seguridad del túnel, ya que siempre hay margen de mejora.

La mayor parte de estos eventos se corresponden con cierres no programados que han requerido la intervención de los equipos de socorro del túnel, siendo en su gran mayoría incidentes producidos por vehículos lentos, paradas de usuarios en el túnel o por averías, los cuales en general se resuelven con relativa facilidad y con rapidez.

La disponibilidad de agentes de explotación en las bocas de entrada del túnel, que realizan inspecciones a todos los vehículos pesados y autobuses y que se convierte en los equipos de primera intervención en caso de incidente en el túnel suponen una gran ayuda para la resolución de la mayor parte de las incidencias registradas, mayor cuanto mayor es la gravedad del evento.

El número de eventos significativos en el túnel de Somport se ha reducido notablemente en los 2 últimos años, con mayor evidencia en el año 2021. El descenso producido en la IMD desde su máximo, 1.405 v/d en 2019, hasta aproximadamente los 900 v/d del 2021, descenso que se ha producido principalmente en el tráfico de vehículos ligeros y no así en el de pesados, puede ser la causa.

Las conclusiones obtenidas para el túnel de Somport son también extrapolables en su mayoría a los túneles europeos estudiados: el número de accidentes con heridos e incendios es muy inferior al resto de cierres no

programados y la mayoría de estos cierres son ocasionados por vehículos lentos, paradas de usuario o averías (al menos en los túneles que se han podido analizar al tener desglose detallado).

La tendencia general a nivel europeo parece estable o con ligera tendencia al descenso en los últimos años, posiblemente debido al descenso generalizado en la IMD del 2020, salvo en el caso del túnel de San Bernardino donde hay una clara evolución al alza.

En los túneles españoles igualmente el número de incidentes graves en los túneles analizados es muy bajo y las consecuencias de los mismos en general han sido leves, sin que apenas se hayan producido heridos graves o muertos

OPTIMIZATION OF ROAD TUNNEL FACILITY COMPOSITIONS TO MINIMIZE OPERATING COSTS BASED ON ONTOLOGICAL MODEL

Vladimír Faltus, Pavel Přibyl, Tomáš Tichý
Czech Technical University in Prague, Faculty of Transportation Sciences

The widely accepted body, The World Road Association (PIARC), has published research that up to 60% of future road tunnel operating costs can be saved by optimizing the tunnel design at an early stage of project implementation [1]. The paper shows the paradigm of recent years – more and more innovative technologies for tunnels do not necessarily mean that the functions for which tunnels are built are performed more efficiently. A road tunnel is a complex system created as a pragmatic alliance of several subsystems and many devices from different suppliers. Tunnel documentation usually has several hundred pages prepared by specialists in ventilation, lighting, safety, etc., and it is difficult for the investor or administrator to optimize the equipment without a detailed model of this complex system. There are two models for describing a complex system: a process model and a knowledge model. The paper shows that a more suitable model for describing a tunnel system is an ontology-based knowledge model and gives an example of such a model.

OPTIMIZACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE LAS INSTALACIONES DE TÚNELES DE CARRETERA PARA MINIMIZAR LOS COSTOS OPERATIVOS SEGÚN EL MODELO ONTOLÓGICO

Respetada autoridad general, La Asociación Mundial de la Carretera (PIARC), ha publicado una investigación que indica que se puede ahorrar hasta un 60 % de los costos futuros de operación de túneles de carretera optimizando el diseño del túnel en una etapa temprana de ejecución del proyecto [1]. El documento muestra el paradigma de los últimos años: cada vez más tecnologías innovadoras destinadas a los túneles no significan necesariamente que las funciones para las que se construyen los túneles se cumplan de manera más eficiente. El túnel de carretera es un sistema complejo formado como una alianza pragmática de más subsistemas y muchas instalaciones de diferentes proveedores. La documentación de los túneles suele tener varios cientos de páginas elaboradas por especialistas en ventilación, iluminación, seguridad, etc., y es difícil para el inversor o administrador optimizar el equipo sin un modelo detallado de este complejo sistema. Hay dos modelos para la descripción de sistemas complejos: modelo de proceso y modelo de conocimiento. El documento muestra que el modelo más adecuado para la descripción de un sistema de túneles es un modelo de conocimiento basado en ontología y aquí se presenta un ejemplo de dicho modelo.

OPTIMISATION DES COMPOSITIONS DES INSTALLATIONS DES TUNNELS ROUTIERS POUR MINIMISER LES COÛTS D'EXPLOITATION SUR LA BASE D'UN MODÈLE ONTOLOGIQUE

L'organisme largement accepté, L'Association mondiale de la Route (PIARC), a publié des recherches selon lesquelles jusqu'à 60 % des futurs coûts d'exploitation des tunnels routiers peuvent être économisés en optimisant la conception du tunnel à un stade précoce de mise en œuvre du projet [1]. L'article montre le paradigme de ces dernières années – des technologies de plus en plus innovantes pour les tunnels ne signifient pas nécessairement que les fonctions pour lesquelles les tunnels sont construits sont exécutées plus efficacement. Un tunnel routier est un système complexe créé comme une alliance pragmatique de plusieurs sous-systèmes et de nombreux dispositifs de différents fournisseurs. La documentation du tunnel compte généralement plusieurs centaines de pages préparées par des spécialistes de la ventilation, de l'éclairage, de la sécurité, etc., et il est difficile pour l'investisseur ou l'administrateur d'optimiser l'équipement sans un modèle détaillé de ce système complexe. Il existe deux modèles pour décrire un système complexe: un modèle de processus et un modèle de connaissances. L'article montre qu'un modèle plus approprié pour décrire un système de tunnel est un modèle de connaissances basé sur une ontologie et donne un exemple d'un tel modèle.

1. INTRODUCTION

The paper presents the need for road tunnel system models as models of a complex tunnel system, and shows creation of a knowledge model of road tunnel systems based on ontology. A methodology for creating an ontological model of a road tunnel facility compositions proposed in the Czech Republic is presented. An ontological model is developed for tunnels of categories TA, TB and TC and for the first two stages of project documentation (up to the building permit). The aim of this effort is to unify the form of project documentation of various road tunnels, which enables the simplification of the creation and control of project documentation. A manual is also created with the model, which clearly explains all items of the model.

1.1. Tunnel as a specific part of the transport network

Road tunnel is a specific part of the transport network, not only in terms of investments, but also due to operating costs over a century of life. Achieving the same level of safety as on an open road is more expensive for tunnel work.

Road tunnels are undoubtedly the critical points of road network. Disasters, mainly fires, occur in road tunnels from time to time and the public very negatively perceives them. After every such event, people start to think how and what to do to increase safety. Questions such as "Is there a sufficient level of safety provided in this tunnel?" and also "Is the tunnel not equipped too poorly?" annoy very frequently the investors and tunnel administrators.

Tunnel System (TS) consists of technological equipment realizing the transport and safety functions of the tunnel. Tunnel technologies form a complex system (CS) in a sense of how CS are perceived and defined in engineering informatics and systems theory. Actually, it is necessary to approach the design of the tunnel with this awareness.

In literature, a road tunnel is often described as a complex system. Even the PIARC in its Road Tunnels Manual [2] dedicated an entire chapter to the topics of complexity. It is called "Tunnel: A Complex System". The authors claim that a tunnel constitutes a "complex system" which is the result of the interaction of very many parameters. These parameters can be gathered by subsets, the principal ones of which are represented in the diagram below in Fig. 1. All these parameters are variable and interactive, within each subset, and between the subsets themselves [2].

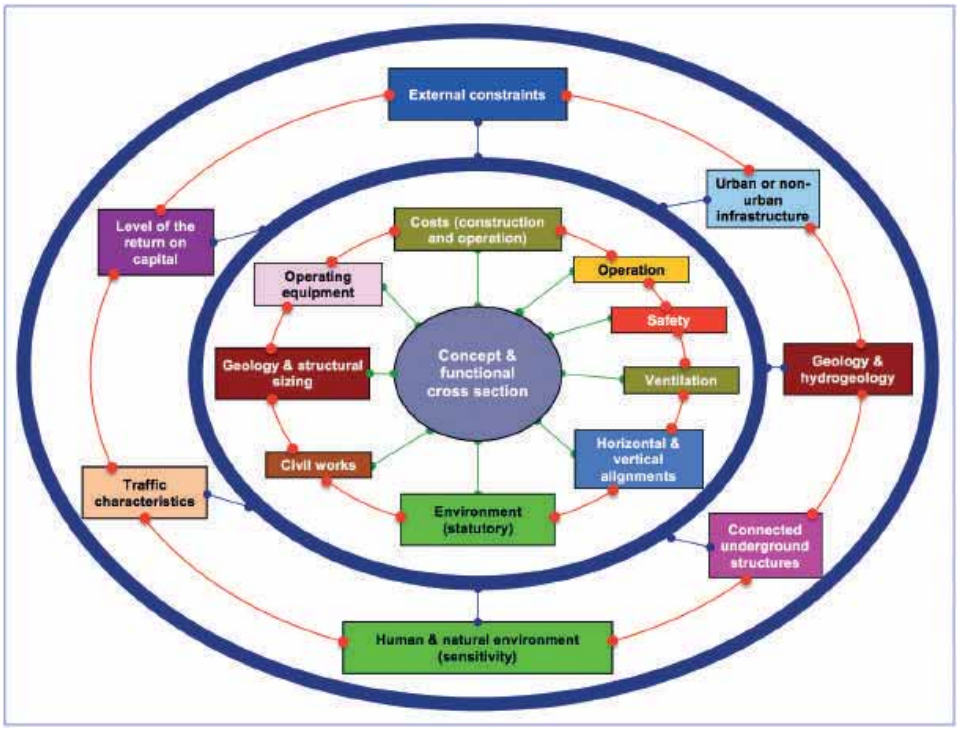


Fig. 1: Tunnel complex system, ref. [4]

For a good understanding of a complex system, such as a holistic system, it is appropriate to model it in a user-friendly, preferably graphic, form, what is a topic in this paper.

2. TUNNEL TECHNOLOGY AS A COMPLEX SYSTEM

Tunnel system can be considered complex, because it contains several subsystems (also named as agents), which are pragmatically unified, see in Fig. 3, in order to implement the given target function defined below.

Complex system and what is typical for it:

- The system is designed to implement a specific target function.
- The system includes many interacting components (subsystems and devices whose aggregated behaviour cannot be simply derived from the sum of the behaviour of the individual components).
- Each component does not have an overview of the fulfilment of the target function, but it works effectively in its own environment.
- The system may have a structure with different variations. This means that there may be a certain degree of entropy and disorder before structure optimization.
- To fulfil the target function Ψ, see Chap. 2.1, the system does not have to have "the best structure", but it should have the optimal structure.
- It is necessary to find a tool – a model that will allow to assess that such diverse devices will converge to a single target and the structure is optimal.

2.1. Target function of the tunnel system

Road tunnels are built to realize the transport performance expressed in [veh.km]. This is shown schematically in Fig. 2, where in the centre of gravity of an equilateral triangle is traffic.

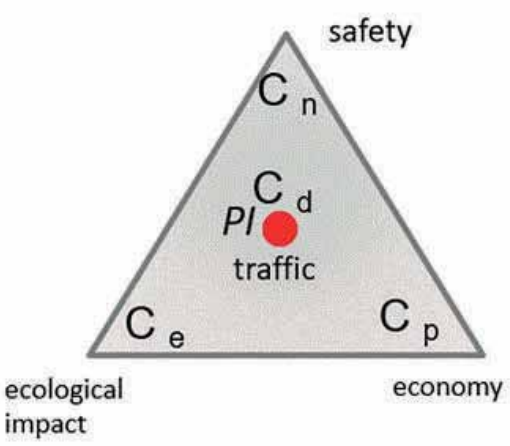


Fig. 2: Representation of the target function of the tunnel system

The target function of the tunnel system Ψ seeks a minimum of the qualitative Performance Index (PI) in financial units (EUR). PI has four summands, see Eq. 1, and is expressed in financial equivalent:

$$\Psi = \min PI;\ PI=(C_d+C_e+C_p+C_{n)} \quad (1)$$

Where:

- C_d is the price for transport – it is minimal if the vehicles run smoothly in synchronized flow and at nominal speed; if the vehicles have to brake or stop and start due to jam, the price for transport increases, because fuel consumption grows.
- C_e is the price for environmental impacts, which includes, for example, the price for protection against air pollution flowing from the portal to the surroundings of the tunnel due to piston effect.
- C_p is the tunnel operation cost. The decisive item is usually the price for energy for ventilation and lighting, but it also includes service costs and costs for replacement of equipment at the end of its life, labour costs of staff, etc.
- C_n is the price for traffic accidents, which consists of material damage, the price for personal injury and death.

2.2. Target function implementation using alliance of tunnel subsystems

To implement the target function according to Eq. 1, the road tunnel must form at least the following subsystems in Fig. 3:

- Traffic system;
- Lighting;
- Ventilation;
- Real-time communication with users;
- Safety system;
- Firefighting equipment;
- Power supply system;
- Control system.

Each subsystem is designed and equipped according to the designer's experience, according to practice, tests, mathematical and physical models and/or national and international standards and regulations. There is no mandatory prescription how to further divide the subsystem and how many processes it must implement. For example, the road tunnel safety system involves at least the following subsystems: SOS boxes; identification of dangerous goods through ADR and code recognition; PA speakers, video detection of pedestrians, detection of accident and smoke, section speed control etc.

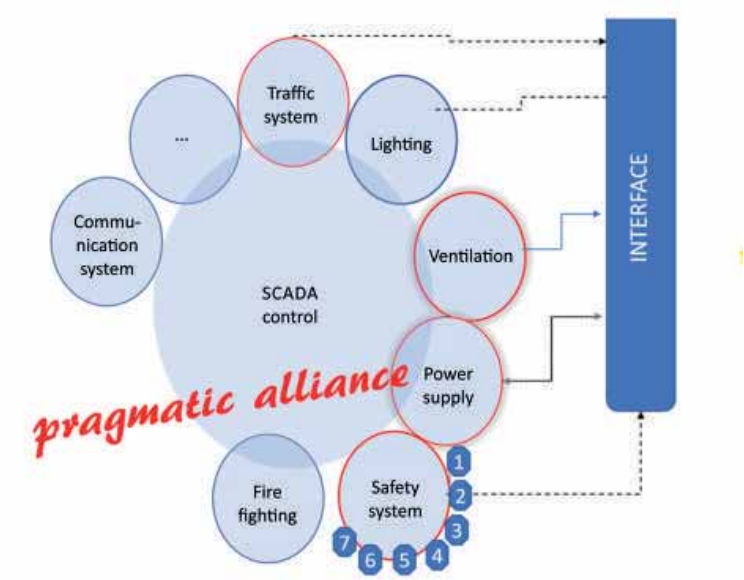


Fig. 3: Bundle of subsystems and many facilities creating pragmatic alliance ensuring optimal tunnel operation

2.3. Methods of selecting tunnel equipment

We can categorize tunnel equipment in four levels:

- 1st category: The set of equipment that is mandatory by technical standards: national and EU regulation, etc. This is for example distance and form of exits, escape pathways, traffic lights. Design of road tunnel equipment and systems is being firstly based on national or European standards. In practice, it means that the system designer follows requirements of national standards. Nevertheless, these standards cannot be state of the art.
- 2nd category: Devices and systems whose design is based on mathematical and physical models, as ventilation system, lighting system, evacuation system – tunnel technologies that affect evacuation time [8].
- 3rd category: Systems designed according to the designer's experience, according to practice, tests. It is commonly agreed that these systems are an important part of the global safety. This category includes fire sensors, smoke detectors, video system, loudspeakers, sound sources, information displays, VMS, radio inputs.
- 4th category: A wealth of knowledge is also contained in the PIARC documents, which contain the essence of the best that is invented in tunnels and practically the latest state of development around the world. This includes, for example, a new type of acoustic beacon to facilitate orientation in the event of a fire [3].

3. THE NEED FOR ROAD TUNNEL SYSTEM MODELS

Road tunnel model creation has a dual purpose:

1. The model is created in order to optimize the tunnel equipment and save costs, see Chap. 3.1.
2. With regard to the integration of the tunnel into the transport system of the region, state or Smart city, it is necessary to create a knowledge system on a comprehensive tunnel system accessible and understandable to transport designers and administrators, and also to lay people about tunnels, see chap. 3.2.

3.1. Minimization of operating costs of tunnels according to PIARC recommendations

The PIARC Technical Committee C3.3 "Road Tunnel Operation" considers the minimization of operating costs to be a prerequisite for the tunnel to be built at all. The concept of sustainability in the intentions of this article means that the tunnel work is operated ecologically, safely and with minimal operating costs throughout its century life.

The PIARC has published the results at which stage of the preparation and construction of the tunnel can be saved on future operating costs and how much [1]. In the initial stage of the project (in the Czech Republic labelled as "proposal document" or "design study") it can be a saving of up to 60-80% of future operating costs by design optimization, see Tab. 1. In the implementation stage, it is up to 10-30%, which can be saved during the process of optimization during implementation. Additional resources can be saved by optimizing the tunnel operation itself, for example by monitoring and evaluation of operating parameters and using RAMS method, for preventive service and thus prolonging the life of the equipment [1].

Tab. 1: Impact of the stages of tunnel realization on future operating costs

Design / study	60 – 80 %
Building / construction	10 – 30 %
Operation / tunnel lifespan	10 – 30 %

3.2. The importance of the knowledge systems

The main problems of integration a tunnel into Smart City concept is are the large number of processes, their specific features and the complicated relationship between them, which all leads to increased complexity and creates a high dimensionality problem, which makes it difficult to share all important information hidden in the tunnel project or actual changes between all model users.

The term "information" is very frequently used in this article. The concept of "information" is usually related to the process of reducing systems uncertainty, because information is being transformed into knowledge. With increasing knowledge, the orderliness of the system is growing, while entropy decreases. Entropy is a measure of the number of a specific ways in which a system may be arranged, often taken to be a measure of disorder.

In terms of interoperability between two systems, the following must be created:

1. Physical interface: either wired or wireless connection;
2. Data interface: the data exchange will be clearly legible;
3. Semantic interface: the knowledge contained in each subsystem will have an unambiguous meaning for the second subsystem

With regard to the integration of the tunnel into the transport system of the region, state or city (even Smart City), it is necessary to create a knowledge system above described in detail knowledge hidden in hidden in hundreds of project pages prepared by ventilation, lighting, safety or other specialists. It is hard to expect that even the investor will be a specialist in many specific technologies designed for the tunnel. Nevertheless, its task is to optimize the tunnel equipment already in the initial stage of the project as follows from both previous points, it is necessary to have a tunnel complex system described in the project stage, described by a knowledge model, which will be shared by third parties.

In terms of knowledge systems, the 70's started to separate two directions in the IT environment describing surrounding world and processes in it. The first branch has crystallized in object-oriented modelling using classes and the Universal Modelling language (UML) as a tool. The second one describes the same objective reality in a form of ontology using concepts and taxonomy.

3.3. Variability of tunnel systems composition – practical examples

It turns out that the tunnel is a complex system and although it is designed in accordance with all regulations, it cannot be designed in a uniform style. An original approach to the design of the technological system is required, which is designed and presented below, and has a number of structure variants. The Directorate of Roads and Motorways of the Czech Republic has ordered the ITA AITES National Committee to check the documentation of the first stage of the prepared tunnels. These were three tunnels 575, 756 and 3960 m long, safety categories TA and TB.

Although the same standard was used for the design of road tunnels, the tunnel documentation contained 21 to 57 specific technological subsystems (STS), see Fig. 4 (each column is a different tunnel documentation). This is a common possibility and not the fault of the designer, but the differences may be due to his creativity and understanding of what the target function is. The difference in the number of STS just points to the need to have a tunnel model so that the investor can check or optimize the technological design.

Fig. 4: Amount of specific subsystems in 3 road tunnels design examples in Czech Republic

Fig. 4 shows that the most can be saved by a reasonable and understandable project in the first level of documentation.

3.4. The role of investor and model description possibilities

Investor has a difficult position in optimizing the structure of technological components based on documentation numbering hundreds of pages. It cannot be a mandatory fixed universal structure in standards. Inaccurate terminology then contributes to the deterioration, when, for example, section speed measurement is incorrectly included in a video detection system, although this technology uses different principles. Optimizing the equipment of the tunnel on the basis of processed documentation having hundreds of pages, with different variability of the structure design is a relatively difficult task, due to the complexity of the design.

A complex tunnel system is a system with several possible functional and design variations, and therefore it is difficult to verify whether the technology is optimally designed. For this reason, it is appropriate to create a structural model at least before moving to the second level of documentation.

There are a number of models to describe all the processes that the tunnel technology implements, but visual models are preferred. To create a process model, the procedure for modelling traffic telematics systems can be used, which is presented in the following Chap. 3.5. However, the ontological model described in Chap. 3.6 is closer to user thinking, because the categorization of knowledge is typical of human thinking. Therefore, this article recommends it for modelling complex tunnel systems.

3.5. Process model based on ITS system architecture for TS modelling

Process model based methodologically on ITS system architecture, which is performed according to the principle of European project FRAME and regards of European standardization committee CEN TC278. The principle of the approach to modelling is schematically shown in Fig. 5. In the first step, the TS is divided into n-subsystems (lighting, ventilation, etc.).

Each subsystem implements a macro function (MF), in the figure it is labelled as "MF" of Traffic system. Each macro function is further broken down into a number of functions that the subsystem must perform. E.g. MF "Traffic system" is broken down into second level functions, e.g. traffic control or automated incident detection (AID).

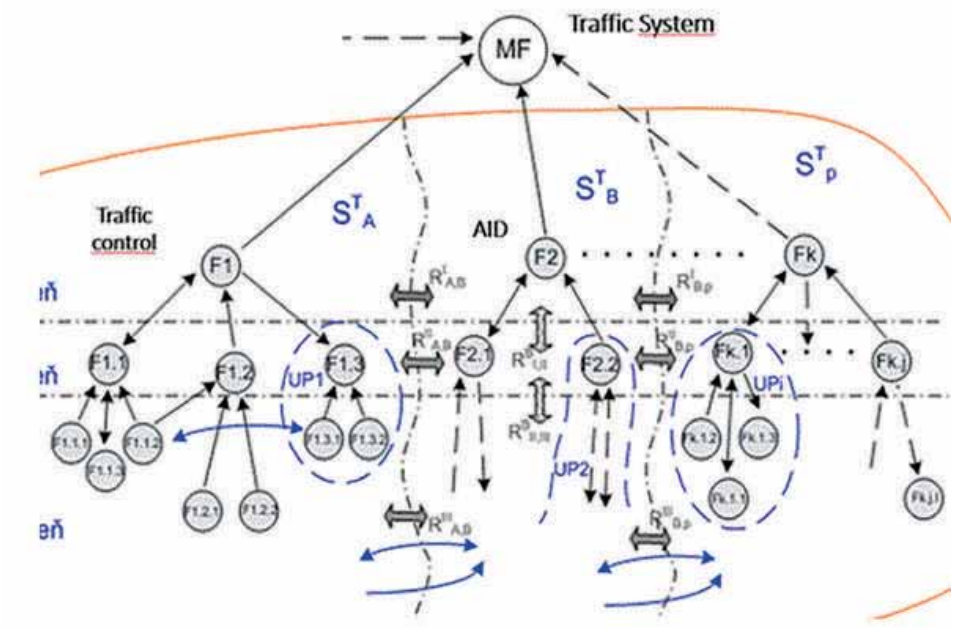


Fig. 5: Example of hierarchical form of functional architecture of TS

Criticism of the process model:

- The main disadvantage of the process model is a relatively complex display of the functional architecture in the form of bubble diagrams, which makes it difficult to orient when optimizing the design also sharing model among multiple users.
- Each function must be described in the table with its input and output variables.
- Adding or modifying one function means redrawing bubble diagrams for all users, which makes it difficult to keep the whole model up to date.
- Another disadvantage is that the model describes processes, i.e. dynamical systems, but has a static form.

The model created in this way is complicated with many internal links, so even possible control and optimization of the TS design is relatively confusing process. Therefore, with this paper it is recommended to model and describe the tunnel system by an ontological knowledge model which describes the tunnel as user-friendly as the brain naturally organizes knowledge.

3.6. Knowledge model of tunnel system based on ontology

In information science, an ontology is defined as a formal hierarchical representation of a set of concepts from a particular domain. Concept is a word with unique semantics. A term can describe a real entity or even an abstract process. The TS ontology is created according authors' proposal using the middle-down procedure described below, which means that the main terms corresponding to the main branches of the ontology tree will correspond to the main subsystems of the tunnel (such as lighting, ventilation, etc.), these are terms called "level 1", see Fig. 6 [12].

Level 1 terms are further broken down into level 2 terms (for example, lighting is divided into daylight, stand-by light, emergency lighting incl. anti-panic lighting etc.) up to the leaves of the tree, which show relative detailed knowledge. The result is a leafy knowledge tree.

The detailed knowledge model created in this way informs the designer and the investor that e.g. the stroboscopic effect must be solved in the inner zone (see in Fig. 6 as L5 "flickering effect"). The level of detail depends on the creator of the ontology: For example, it can be found in the model, that there are two luminance meters one inside and the other one outside of the tunnel. For the outside meters, the height of their location and direction of view are solved in the documentation.

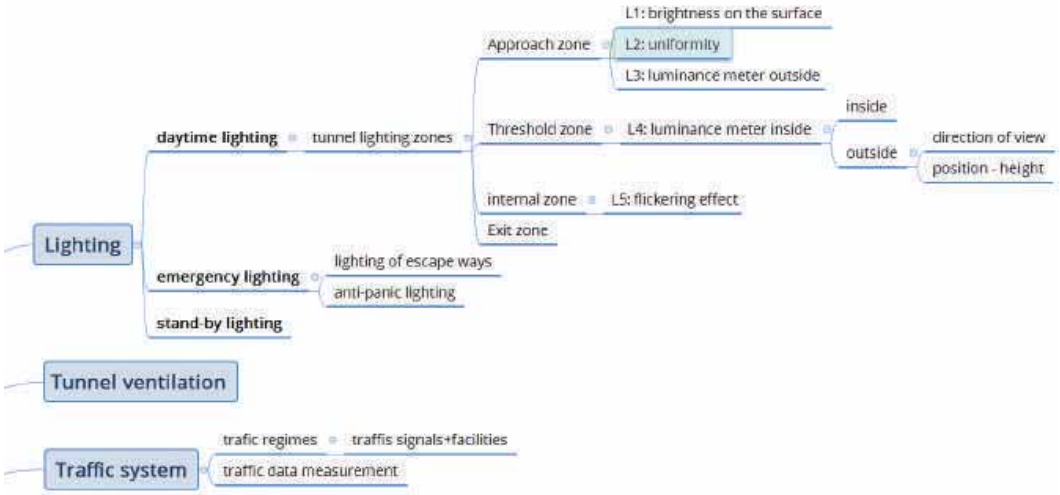


Fig. 6: Part of ontological tree for subsystem "Lighting"

4. CREATION OF A KNOWLEDGE MODEL OF ROAD TUNNEL SYSTEMS BASED ON ONTOLOGY

The Czech team of experts associating the academic and commercial sector (including the authors of this paper) in the years 2021-2022 developed an extended knowledge model for the Directorate of Roads and Motorways of the Czech Republic based on the above-mentioned ontological approach. The aim is to unify the project documentation for telematics systems and related technological equipment of new road tunnels built in the Czech Republic, namely the documentation at the first two levels (up to building permit).

Creation of the knowledge model for the technological equipment of the tunnel is based on the long-term experience of the authors with the preparation, implementation and subsequent operation of road tunnel constructions. Project documentation for different road tunnels at the same level was often processed by different processors. This often led to different terms being used in the dossiers, the names, the scope and depth of the description of the individual terms often differing.

Due to the need to unify the form of project documentation of tunnels due to better control, orientation and increased clarity, a categorization of technological equipment of tunnels for the was created in the form of a clear ontological model.

The subject of the project in the years 2021-2022 was the update and extension of the original model from 2018. The intention of the project was to update the model in the form of the so-called "optimal model" of tunnel categories TA to TC for project documentation at the first two stages and create a manual for them. The aim and effort of this project is to unify the form, content of the documentation of the mentioned stages for the tunnel categories TA to TC and to provide a uniform procedure / instructions used both on the part of the Directorate and on the part of the processors of documentation.

4.1. Model creation workflow and the model features

The workflow for creating an ontology-based knowledge model was as follows:

1. Experts choose terms that carry information from a given domain: Technological equipment of road tunnels.
2. The concepts are arranged in an ontological tree so that the taxonomy supports the cognitive abilities of the brain.
3. The terms are provided with unique codes. Each term is assigned a text with its explanation.
4. The texts are arranged in a document in the structure of the ontological tree – the main branches of the tree are the main chapters, the lower level of the relevant subchapter, etc.

The ontological model was developed in a clear and controllable electronic form with the possibility of exporting the model to a printable form. At the same time, a map was processed in a selected SW tool (MindMap). All terms used in the model have a unique meaning and name, they are provided with a unique code. The nomenclature and numbering of individual technological units were unified in relation to the regulations used in the Czech Republic.

The detail of the model is such that it covers 90% of the terms contained in the related Czech national regulations concerning road tunnel equipment. The model was created using the brainstorming technique through a basic group of experts forming the Basic Expert Team. The models were created taking into account the requirement to minimize operating costs in the implementation of traffic and safety functions of the tunnel. Upon completion, the model was validated and approved by the Directorate in terms of its own experience and needs. The final models were verified by an extended group of experts – Extended Expert Team.

For each term in the model, a text knowledge unit is added, which clearly explains how it should be used in the road tunnel project. A manual in the form of an electronic encyclopaedia was prepared so that it is possible to operatively supplement changes to text units without the need to publish new print versions. The model and manual are designed to be clear and at the same time easy to update. Steps are currently being taken to publish the model on the Directorate's website.

4.2. Graphic symbols used in the models

According to the requirements of the model processing assignment for each of the three tunnel categories TA, TB, TC, a total of 6 ontological models were created in two stages of project documentation.

Each model is accompanied by explanations of graphic symbols used in the model, see Fig. 7:

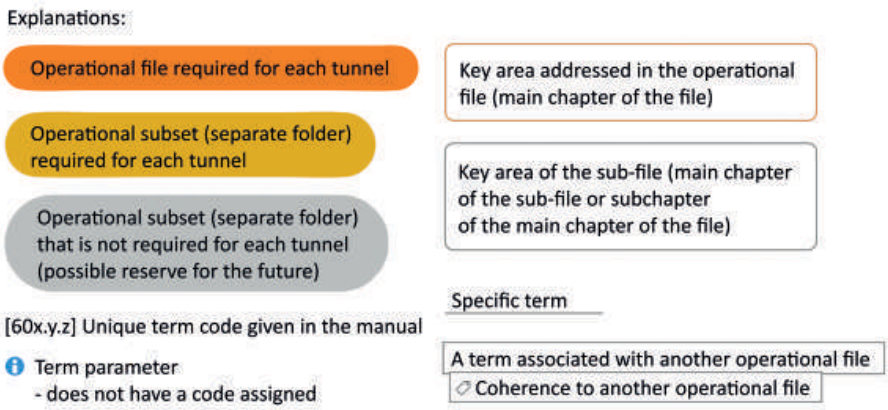


Fig. 7: Graphic symbols used in the ontology-based knowledge model

Each term is identified by a unique code within each model. The coding system is implemented in the format 60X.RRR.S.T(.U.V.W.Y.Z), the meaning of each code will be as follows:

- 60X – the number of the series of underground structures with the designation of the serial number of the tunnel construction X;
- RRR – operational file or subfile number;
- S – serial number of the solved operational file, subset or main chapter (according to the order in the model, from top to bottom);
- T – serial number of the term within the operational file, subset or main chapter (according to the order in the model, from top to bottom);
- U, V, W ... – other nested terms, numbered according to the nested level (according to the order in the model, from top to bottom).

Each term has the same code across the categories at a given level of documentation. However, the code of the same term may differ between the two levels of documentation. The reason is logically the increase in the number of terms in the 2nd level compared to the 1st level.

An example of the complexity and depth of the ontological tree is demonstrated in Fig. 8, which captures a part of the tree structure for a TA category tunnel with the graphic symbols defined above. The obligatory folder "60x.151 Traffic signs and equipment" marked in beige and the optional folder "60x.152 cooperative systems" marked in grey are displayed in the figure. Both components are part of the main folder "60x.150 Traffic

Systems" shown in orange. The root of the tree for the TA tunnel category is then the brown coloured element on the left.

Fig. 8: Graphic demonstration of ontological tree structure for a TA category tunnel

4.3. The manuals for the ontological model

A detailed text description and explanation of the individual terms used in the models is contained in the manuals. The manuals are structured and also correspond to the structure of the models, i.e. the term code given in the model corresponds to the structure of the model and the code given in the manual.

The following principles were used when creating the texts of the manuals of individual operational files:

- At least one descriptive sentence should be given for each term.
- For a term for which parameters are given in the model, these parameters are also listed in the manual.
- The textual content of the term must contain a clear explanation of the term as it should be used in the tunnel design.
- The introduction to the description of the operational file (levels 60x.RRR and 60x.RRR.S) states what is addressed in the documentation and what it deals with. The required documentation items are listed below, i.e. a list of required attachments.
- The titles of technical and legislative regulations are given in the form of numerical references to sources. Referenced sources, resp. The names of the regulations are summarized at the end of the manual.

An example from the manual for part of the tunnel ventilation issues for the 2nd stage of the TA-TC category tunnel documentation is available in the following Fig. 9. The complete manual is actually prepared in the Czech language only.

60x.120 Air conditioning

For tunnels, technological ventilation systems provide the appropriate functions according to their location.

60x.121 Tunnel ventilation

In the transport underground construction, sufficient ventilation of the transport space of the tunnel construction must be ensured. Ventilation is traditionally distinguished according to its respective function during tunnel operation or maintenance.

If the ventilation system in the 1st level documentation is not proposed for tunnels classified in categories **TB** and **TC**, then operating file 60x.121 is omitted in the documentation.

60x.121.1 Smoke and heat removal

In terms of fire safety, the forced ventilation system falls into the category of dedicated fire safety equipment, which ensures the removal of heat and smoke from the fire site. Installation is required.

The design procedure is given in [13].

60x.121.1.1 Design parameters and technological equipment

The design of the solution is based on the determining calculation parameters, based on the construction and transport solution.

60x.121.1.1.1 System concept and layout

The proposed solution described in the project involves the coordinated placement of jet fans (JF) in the traffic area.

1. **Number of JF**

The number of jet fans incl. backup.

2. **Location of JF**

The location in cross section and in the situation shall be indicated.

Fig. 9: Demonstration of the manual for ontological model – a part of the tunnel ventilation topic

CONCLUSION

The article points out that tunnel technologies must be seen as complex systems, in the sense of definitions of system analysis. The models will facilitate the investor's optimization of technological equipment, which is of considerable importance in terms of operating costs. An overview of the structure or variants of the TS is realized in an "at first glance" ontological model and details for the actual implementation are provided by a textual explanatory unit. The paper shows the paradigm of recent years – although there are more and more innovative technologies for the road tunnels, this does not necessarily mean that they better implement the target function. The main effort of the investors should be primarily to optimize the composition of the tunnel system at the beginning of design and minimize future operating costs. The unified ontological model and the manual for creating documentation that can help this.

REFERENCES

1. Comité technique C.4 Exploitation des tunnels routiers / Technical Committee C.4 Road Tunnel Operation: Life cycle aspects of electrical road tunnel equipment. PIARC, 2012. ISBN 978-2-84060-272-5, pp. 37.
2. Comité technique 3.3 Exploitation des tunnels routiers / Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operation: Road tunnel operations: First steps towards a sustainable approach. PIARC, 2017. ISBN: 978-2-84060-470-9, pp. 69.
3. Comité technique 3.3 Exploitation des tunnels routiers / Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operation: Improving safety in road tunnels through real-time communication with users. PIARC, 2016. ISBN 978-2-84060-384-9, pp. 60.
4. Schmitz, P.: Road Tunnels Manual. PIARC. Version 2019. Available at www: https://tunnelsmanual.piarc.org/en
5. Projektování dopravně-telematických aplikací: Metodický pokyn (Design of transport telematics systems: Methodological Guidelines). Ředitelství silnic a dálnic (Directorate of Roads and Motorways), Prague, 2010, pp. 130. Document in CZ.
6. Svoboda, J.: Technické kvalitativní podmínky pro dokumentaci staveb pozemních komunikací; Kap. 7 „Tunely, podzemní stavby a galerie" (Technical quality conditions for road construction documentation; Chap. 7 "Tunnels, underground structures and galleries"). Pragoprojekt, Prague, 2006. Document in CZ.
7. Gregor, D.; Toral, S.; Ariza, T.; Barrero, F.; Gregor, R.; Rodas, J.; Arzamendia, M.: A methodology for structured ontology construction applied tointelligent transportation systems. In: Computer Standards & Interfaces 47 (2016), p. 108–119.
8. TP98: Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací (Technological equipment of road tunnels). Ministerstvo dopravy ČR (Ministry of Transport of the Czech Republic), Prague, 2003. Standard in CZ.
9. Přibyl, P. and Přibyl, O.: Effect of tunnel technological systems on evacuation time. In: Tunnelling and Underground Space Technology. 2014, vol. 44, p. 88-96. ISSN 0886-7798.
10. Tichý, T.; Brož, J.; Bělinová, Z.; Pirník, R. Analysis of Predictive Maintenance for Tunnel Systems. In: Sustainability, 2021, Volume 13, Issue 7, 3977. DOI: https://doi.org/10.3390/su13073977
11. Hung, S.-S., and Damon S.-M. L.: A user-oriented ontology-based approach for network intrusion detection. In: Computer Standards & Interfaces 30.1-2 (2008), p. 78-88. DOI: https://doi.org/10.1016/j.csi.2007.07.008
12. Roussey, C.; Pinet, F.; Kang, M.; Corcho, O.: An Introduction to Ontologies and Ontology Engineering. In book: Ontologies in Urban Development Projects (pp.9-38). Springer, 2011. DOI: 10.1007/978-0-85729-724-2_2.
13. Metodický pokyn, Větrání silničních tunelů, Volba systému, navrhování, provoz a zabezpečení jakosti větracích systémů silničních tunelů. (Guideline, Road tunnel ventilation, System selection, design, operation and quality assurance of road tunnel ventilation systems.) MD-OPK č.j. 27/2013-120-TN/1, Ministry of Transport of the Czech Republic, Prague, 2013. Document in CZ.

UTILIZACIÓN DE HERRAMIENTAS BIM EN LA REDACCIÓN DE PROYECTOS DE REMODELACIÓN DE TÚNELES CARRETEROS ABIERTOS AL TRÁFICO

Iñigo Herraez Puente
IDOM

Jon Zuazua Gerrikagoitia
DFG

Iñigo Paniego de la Cuesta
IDOM

Diputación Foral de Gipuzkoa se encuentra en estos momentos finalizando la adecuación a la Directiva Europea 2004/54/CE los túneles que se encuentran en la red transeuropea de Gipuzkoa. Además de esa adecuación, DFG está aprovechando para reforzar el sostenimiento de los túneles y adecuar la impermeabilización de los mismos, haciendo una mejora a la infraestructura 25 años después de su construcción.

Para ello, IDOM está utilizando herramientas BIM, con el principal objetivo de utilizar y producir modelos digitales que contengan información útil para la ejecución de proyectos mediante la colaboración de todas las disciplinas.

Trabajar con BIM tiene destacables beneficios como:

- Proyectos coordinados gracias a la integración de múltiples disciplinas.
- Adelantarnos a futuros problemas en obra.
- Único modelo de datos en el que se comparte toda la información.

IDOM redactó durante 2019 de manera pionera el Proyecto de Refuerzo del Revestimiento y Adecuación de Instalaciones (Directiva 2004/54/CE) del túnel de Belabieta, túnel de 2 tubos de 1.836 m de longitud. Y durante 2021 el Proyecto de Refuerzo del Revestimiento y Adecuación de Instalaciones (Directiva 2004/54/CE) de los túneles de Oindolar y Gorosmendi, túneles de 2 tubos de 550 m de longitud, situados todos ellos en la Autopista A-15 en Gipuzkoa y pertenecientes a la red transeuropea. Los proyectos comprenden la definición de las siguientes tareas:

1.- Impermeabilización del túnel
2.- Refuerzo del sostenimiento
3.- Suministro Energía
4.- Redes PCI
5.- Sistemas ITS
6.- Señalización
7.- Red de Comunicaciones
8.- Sistema Scada

Todo ello, modelado en BIM, grado de detalle LOD300.

En el presente artículo se describirán las principales ventajas y tareas adelantadas que se obtienen de la utilización de estas herramientas, así como las lecciones aprendidas durante la redacción de estos proyectos.

USING BIM TOOLS IN THE DRAFTING OF REMODELLING PROJECTS OF ROAD TUNNELS OPEN TO TRAFFIC

The Local Council of Gipuzkoa is currently finalising the adaptation of the tunnels in the trans-European network in Gipuzkoa to the European Directive 2004/54/CE. In addition to this adaptation, the Council is taking advantage of the opportunity to reinforce the support of the tunnels and adapt their waterproofing, thus improving the infrastructure 25 years after its construction.

To this end, IDOM is using BIM tools, with the main objective of using and producing digital models containing useful information for the execution of projects through the collaboration of all disciplines.

Working with BIM has outstanding benefits such as:

Coordinated projects thanks to the integration of multiple disciplines; Anticipate future problems on site; A single data model in which all the information is shared.

In 2019, IDOM pioneeringly drafted the Project for the Reinforcement and Adaptation of Installations (Directive 2004/54/CE) of the Belabieta tunnel, a 1,836 m long twin-tube tunnel. And in 2021, the Project for the Reinforcement and Adaptation of Installations (Directive 2004/54/EC) of the Oindolar and Gorosmendi tunnels, 2-tube tunnels 550 m long, all located on the A-15 motorway in Gipuzkoa and belonging to the trans-European network. The projects include the definition of the following tasks:

1.- Tunnel waterproofing. 2.- Reinforcement of the support. 3.- Energy supply. 4.- Fire Protection networks. 5.- ITS systems. 6.- Signalling. 7.- Communications Network. 8.- Scada System.

All this, modelled in BIM, degree of detail LOD300.

This article will describe the main advantages and advanced tasks obtained from the use of these tools, as well as the lessons learned during the drafting of these projects.

UTILISATION D'OUTILS BIM DANS LA RÉDACTION DE PROJETS DE RÉAMÉNAGEMENT DE TUNNELS ROUTIERS OUVERTS AU TRAFIC.

Gouvernement Régional du Gipuzkoa est en train de finaliser la mise en conformité avec la directive européenne 2004/54/CE des tunnels qui se trouvent dans le réseau transeuropéen du Gipuzkoa.

En plus , la DFG en profite pour renforcer le soutien des tunnels, adapter l'étanchéité de ceux-ci, et améliorer ainsi l'infrastructure 25 ans après sa construction.

Pour ce faire, IDOM utilise la méthodologie BIM, avec l'objectif principal d'utiliser et de produire des maquette numériques. Cette méthodologie se nourrit en effet des apports de tous les bureaux d'études.

Le BIM permet de nombreux avantages :

L'obtention d'un projet coordonné grâce à l'intégration des maquettes multidisciplinaires; La minimisation des imprévus en chantier optimisant ainsi la maîtrise du temps de construction; L'obtention de une maquette numérique unique contenant toutes les informations relatives au projet.

En 2019, l'IDOM a rédigé le Projet de renforcement du revêtement et d'adaptation des installations (Directive 2004/54/CE) du tunnel de Belabieta, tunnel à 2 tubes de 1 836 m de long.Et en 2021 le Projet de Renforcement du Revêtement et Adéquation des Installations (Directive 2004/54/CE) des tunnels d'Oindolar et Gorosmendi, tunnels de 2 tubes de 550 m de longueur, tous situés sur l'Autoroute A-15 en Gipuzkoa et qui font partie du réseau transeuropéen.

Les projets se composent des tâches suivantes :

1.- Les systèmes d'étanchéité des tunnels. 2.- Le renforcement du soutien. 3.- L'approvisionnement en énergie. 4.- Les systèmes de protection contre l'incendie (PCI). 5.- Les systèmes de transport intelligent (STI). 6.- La signalisation. 7.- La réseau de communication. 8.- Le système Scada

Tout cela en utilisant BIM, avec une modélisation au niveau de détail LOD 300.

Le présent article décrit les principaux avantages et les tâches avancées découlant de l'utilisation de ces outils, ainsi que les enseignements tirés lors de la rédaction de ces projets.

1. ANTECEDENTES

Los túneles de Oindolar y Gorosmendi (en adelante, los túneles) se encuentran en la autopista A-15 (Autopista Navarra-Gipuzkoa) y disponen de un tubo por cada sentido. Fueron puestos en servicio en 1995 y tienen una longitud aproximada de 552 m y 556 m respectivamente y una IMD de 13.915 vehículos (con un porcentaje de pesados de alrededor del 20%). Ambos túneles forman parte de la red transeuropea y tienen más de 500m, por lo que según la Directiva Europea 2004/54/CE (en adelante, Directiva 2004/54/CE) deberán cumplir una serie de requisitos mínimos de seguridad para garantizar un nivel mínimo de seguridad a los usuarios que por él circulan.

Las únicas instalaciones de seguridad que disponían los túneles eran sistemas de alumbrado y sistemas de alimentación eléctrica (que incluían SAI y Grupo Electrógeno). La integración en el SCADA que se controla desde el Centro de Gestión de Carreteras de Gipuzkoa en Miramon (en adelante, CGC) para esos túneles era mínima, únicamente se integran algunas alarmas y estados asociados a la iluminación, a las SAIs y a los Grupos Electrógenos.

Por otra parte, desde su puesta en servicio y en particular durante los últimos cinco a siete años se detectó que la solución original de sostenimiento de los túneles en algunas secciones ha resultado ser insuficiente ya que se han producido algunos desprendimientos en el interior del túnel que han generado situaciones de riesgo.

Con la entrada en vigor de la Directiva 2004/54/CE, se ha analizado en varias ocasiones el estado de los túneles, detectando que sería necesario ampliar o modificar las instalaciones existentes para cumplir con la misma. A finales del año 2016, se contrató la redacción de un anteproyecto para valorar las necesidades para poder adecuar a la Directiva 2004/54/CE los túneles de la A-15 con longitud superior a 500. De este anteproyecto se deducen las necesidades de los túneles para el cumplimiento de la Directiva 2004/54/CE y/o actualización de la instalación por obsolescencia.

En consecuencia, la Dirección General de Carreteras del Departamento de Infraestructuras Viarias de la DFG licitó la redacción de varios proyectos constructivos utilizando la metodología BIM (Building Information Modeling) para lograr un proyecto que diera solución tanto a los problemas de sostenimiento como a los de adecuación a la normativa.

2. OBJETIVOS Y USOS BIM EN EL PROYECTO

Los objetivos BIM establecidos para el desarrollo del proyecto con base en los objetivos generales de la propiedad eran principalmente los siguientes:

- Poseer un modelo de información centralizada
- Visualizar soluciones de diseño y proporcionar soporte a los procesos de toma de decisiones: generar información y visualización de la misma para facilitar la toma de decisiones en fase de diseño, así como mejorar la capacidad de reacción ante posibles imprevistos, y también la comunicación entre los diferentes agentes implicados.
- Asegurar la coordinación de disciplinas en el diseño: asegurar la coherencia y fiabilidad entre las soluciones de las diferentes disciplinas, así como la comunicación entre los agentes implicados.
- Apoyar los análisis de coste y ciclo de vida del proyecto: Asegurar la fiabilidad de la información para el análisis del rendimiento de un activo y sus costes.
- Apoyar la transferencia de información desde el diseño a la fase de operación y mantenimiento: Asegurar la entrega de una fuente de información única fiable y coherente entre sí, así como mejorar la comunicación entre los agentes implicados.
- Apoyar la generación de imágenes y recorridos virtuales.

Los principales usos del modelo BIM, asociados a los objetivos BIM establecidos, son los siguientes:

- Modelado 3D de la envolvente del túnel actual, manteniendo la nube de puntos siempre como referencia.
- Información centralizada: el modelo es una fuente única de información coherente que asegura la transferencia de información a lo largo de las todas las fases.
- Visualización con el fin de mejorar el proceso de diseño y anticipar la toma de decisiones.
- Coordinación 3D, se comprobará que los modelos estén libres de interferencias según la matriz aprobada en el Plan de Ejecución BIM, además se realizarán los informes pertinentes.
- Obtención de documentación 2D del proyecto de ejecución, a partir de los modelos BIM sin manipulación posterior en sistema tradicional 2D.
- Comprobación inicial del gálibo (5m en carretera y 4,5 m en acera) mediante planos continuos.
- Estudio de colisiones de instalaciones y secciones críticas (interferencias entre la sección proyectada con el túnel reforzado y las instalaciones proyectadas, así como el cajón de gálibo para el tránsito de vehículos por la calzada; para poder determinar la superficie de bóveda y hastiales afectados para proyectar su picado)
- Obtención de mediciones, de las partidas más relevantes del proyecto (excavación, hormigón proyectado, sistema de impermeabilización, sistema de sostenimiento, canalizaciones, etc.). El modelo deberá ser fiel al criterio de mediciones del proyecto.

Dentro del presente artículo se especificarán las formas en las que se han conseguido los usos y objetivos del proyecto.

3. PROCESO SEGUIDO

Para conseguir los objetivos y usos descritos en el apartado anterior, se inició con el proceso con el siguiente planteamiento general:

- CAD: Se toman los datos de estado actual, esquemas (como son los esquemas unifilares, esquemas generales sin escalar y detalles tipo) y señalización de desvíos de obras.
- BIM: Se diseñan el túnel y renovación de las instalaciones.

Trabajar con la metodología BIM significa que construimos de manera digital ya que todos los elementos que se muestran en el modelo son elementos constructivos con dimensiones y características específicas.

En el proceso, la base a través de la cual se modela es la Nube de Puntos para poder conocer el estado real actual de la infraestructura. La nube de puntos nos proporciona el trazado actual del túnel, por lo que podremos trabajar con mayor precisión desde el inicio. En este caso, la nube de puntos la proporciona DFG como parte del Mobile Mapping de sus instalaciones. A continuación, se muestra una captura del mismo:

Para el desarrollo del proyecto es necesario que el punto de referencia del proyecto sea único. En este caso, el punto de referencia escogido y en el que se ha basado el proyecto es, dentro del eje de la calzada sentido San Sebastián, en concreto en la línea discontinua que separa ambos carriles de circulación, a la altura de la boca de salida del túnel. A partir de ese punto se irían generando elementos de REVIT del proyecto.

Para desarrollar el proyecto se han utilizado las siguientes herramientas:

- Revit2020: herramienta de modelado tanto del túnel como de las instalaciones
- Navisworks2020: software para visualización y coordinación entre disciplinas
- AutoCad2020: herramienta para la creación de esquemas y estado actual
- Navisworks Freedom: Programa gratuito de visualización para poder acceder a los modelos, de esta manera, cualquier técnico implicado en el proyecto puede acceder en todo momento

Se comenzó a trabajar teniendo como referencia la Nube de Puntos proporcionada por Diputación. Con el modelado del túnel nos anticipamos a diversos problemas que pudieran surgir en fase de obra, por ejemplo, detectaremos en fase de diseño las interferencias que pudiera haber entre instalaciones, podremos realizar un estudio donde veamos zonas que haya que picar por no cumplir con el gálibo, etc.

Con todo, se desarrolla un modelo 3D con información geométrica a un nivel de desarrollo (LOD) 300 o superior.

El modelo BIM nos acompañará desde las primeras fases de diseño hasta el final.

Acciones concretas destacables que se realizarán en BIM:

- Modelado 3D aproximado de la envolvente del túnel actual, manteniendo la nube de puntos siempre como referencia
- La comprobación inicial del gálibo (4,5m en acera) mediante planos continuos ejecutados en Revit. Esta comprobación se realiza sobre el túnel actual, sin renovación alguna.
- En caso de que existan secciones críticas (por ejemplo entre pk.149+100 y 149+150) se extraen secciones en ese intervalo:
- Modelado en 3D de los elementos proyectados en el interior del túnel (AF, CLV, proyectores, cámaras, bandejas, ventiladores, sensores, canalizaciones) considerando también la reducción de gálibo debido a la capa de hormigón proyectada adicional.

- Adecuación ejes de la vía para el encaje del gálibo teniendo en cuenta que dado el sostenimiento existente no se podía realizar picajes superiores a una determinada profundidad.
- Comprobación final de gálibo de 5m. En caso de que no existiese sección crítica alguna, se repetiría el procedimiento de comprobación con 5,10; 5,20; 5,30
- Realización de secciones reales correspondientes a AF/CLV; PMV; Poste SOS; Hidrante; Ventiladores; y, si hubiese alguna sección crítica que procediese rozado

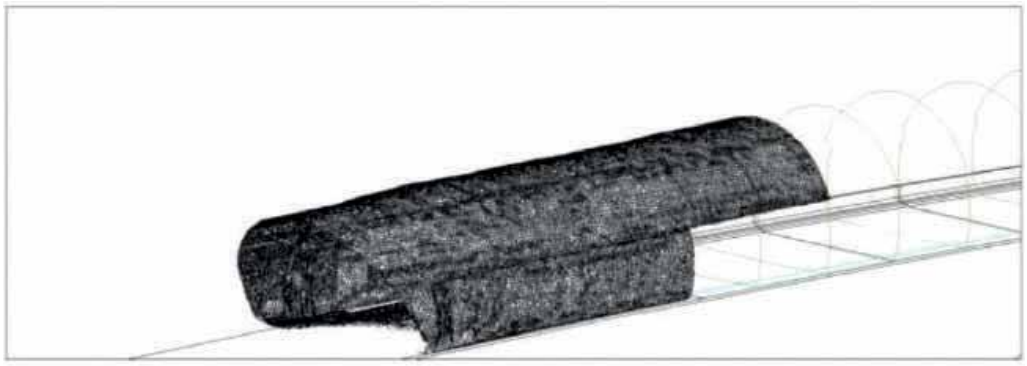
4. ACCIONES CONCRETAS

Modelado 3D aproximado de la envolvente del túnel actual.

La base para el correcto desarrollo del proyecto ha sido la nube de puntos que ha sido proporcionada por la Diputación Foral de Gipuzkoa. Dicha nube de puntos se compone por 87 archivos en formato LAS. El objetivo de esta propuesta es realizar una captura masiva de puntos de forma precisa con láser escáner en todo el tramo entre los túneles Oindolar y Gorosmendi.

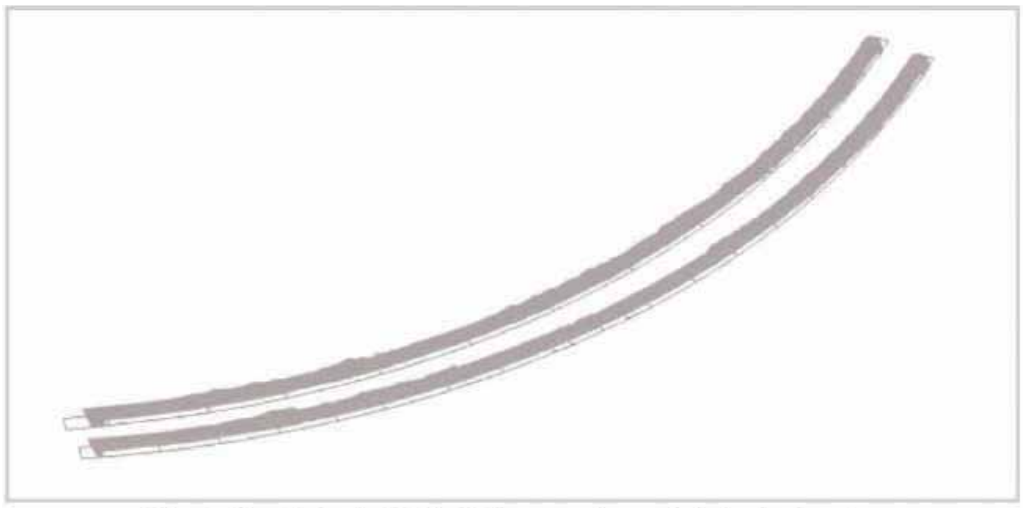
La nube de puntos nos ofrece una mayor precisión a la hora de recoger la información del estado actual ya que se compone de millones de puntos georreferenciados. Esta tecnología posibilita además la creación de una malla que representa con precisión el estado actual del acabado interior de las bóvedas de los túneles. De esta forma, se consigue representar con rigor la geometría del estado actual en forma de perfiles transversales y longitudinales, además de obtener una nube de puntos coherente.

Estado actual Gorosmendi. Imagen extraída de la nube de Puntos tratada previamente.



Malla de la boca de túnel de Gorosmendi.

Perfiles transversales de los túneles de Oindorlar. Secciones extraídas de la malla generada a partir de la nube de puntos



Bóveda de los túneles de Oindolar. Mallas generadas a partir de la nube de puntos

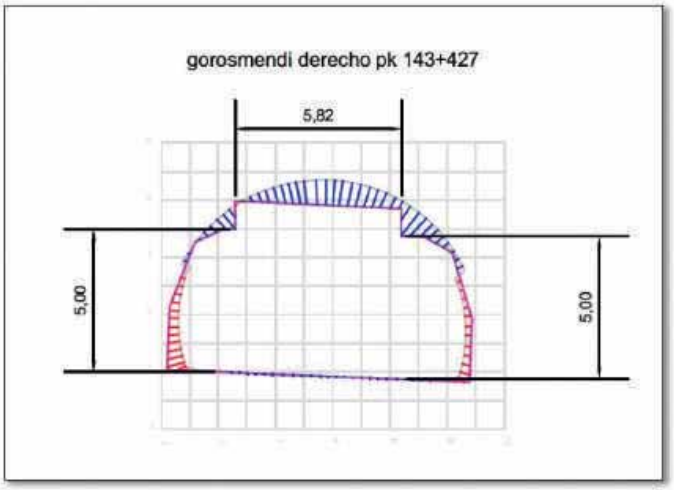
La comprobación inicial del gálibo.

Para la generación de la geometría que representa el gálibo se ha generado una sección teórica extruida a lo largo de los túneles. La sección tiene una altura libre de 5 m perpendicular a la calzada y su peralte en el interior de los carriles de circulación y 4,5 m a la línea de arcén.

De la comparación de esta sección teórica con el tubo existente sacamos parte de los metros cuadrados que hay que picar en fase de obra. Este valor inicial se toma como referencia inicial para la elaboración de un volumen previo de picaje necesario.

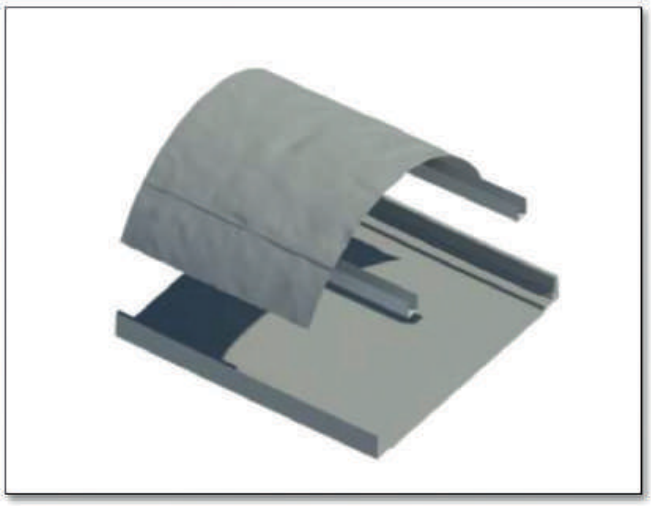
Esta sección se utiliza también para la detección de interferencias de la bóveda existente y las instalaciones como las bandejas, por lo que, para completar el estudio de picado de la bóveda, también se han estudiado dichas colisiones.

Como resultado de estos estudios, se obtienes unos volúmenes aproximados que se tomarán como referencia para tener un adelanto de los valores de picajes y reposición con hormigón proyectado.



Comparación entre tubo existente y sección teórica en primer tramo de túnel Gorosmendi derecho

Imagen de colisión entre sección teórica y tramo de bóveda en túnel Gorosmendi



Electricidad&Alumbrado. Imagen de colisión entre bandejas y bóveda en túnel Gorosmendi

		VOLUMEN EXCAVACIÓN m3	HORMIGÓN PROYECTADO m3
GOROSMENDI	DERECHO	1439	775,5
	IZQUIERDO	1504	912,45
OINDOLAR	DERECHO	1870	904,2
	IZQUIERDO	1874	851,4

Detección de colisiones

Una vez que se tiene el volumen aproximado se procede a comprobar la viabilidad de la ejecución de la obra ya que en función de la profundidad a picar es posible que sean necesarios refuerzos geotécnicos. Este análisis ha sido realizado a modo de revisión general para determinar cuáles son las interferencias más importantes que surgen entre los modelos. La resolución de las mismas se ha realizado dentro de las reuniones de coordinación y revisión del proyecto.

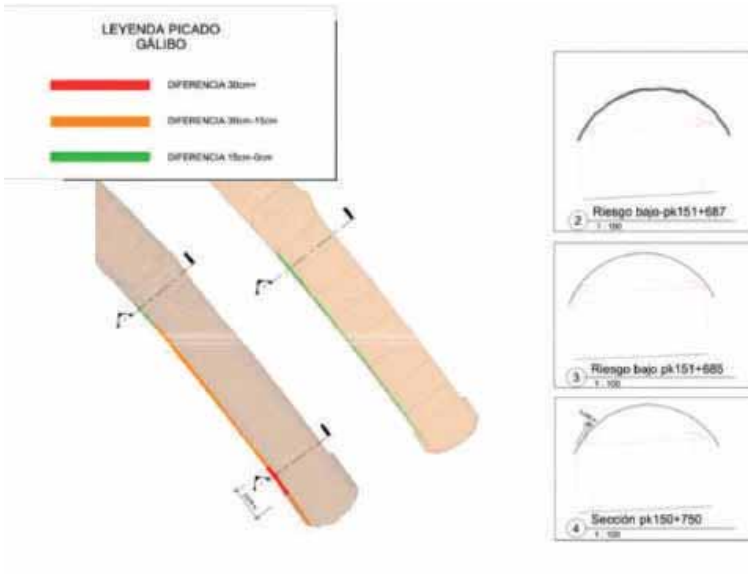
Para el análisis de las interferencias se ha realizado un desglose de elementos para poder comprobar las colisiones entre distintas disciplinas o paquetes de proyecto una a una. Determinados elementos se han excluido del proceso de detección de interferencias, en función de su relevancia o condicionantes de modelado.

A nivel general se han establecido las siguientes revisiones de interferencias:

- Entre modelos de la misma disciplina
- Entre las preexistencias (bóveda túnel) y el gálibo.
- Entre la preexistencia (bóveda túnel) y las instalaciones (principalmente bandejas y ventiladores).
- Entre las diferentes disciplinas de instalaciones y los elementos de edificación lineal.

Detección de colisión entre gálibo y bóveda en túnel Oindolar.

Debido a las numerosas colisiones encontradas entre gálibo y túnel, éstas se han diferenciado por colores según su profundidad y en coherencia con el apartado de sostenimiento para diferenciar si es necesaria alguna actuación adicional o no es necesaria. De esta forma las zonas de mayor picado se muestran con mayor claridad:



Finalmente se ha hecho el recuento en metros lineales de las 3 profundidades de picado, separado por tubos, carriles y tipos de recubrimiento de bóveda. A continuación, se adjunta la tabla de mediciones obtenida y los planos con las secciones analizadas.

Túnel Oindolar sentido San Sebastián						
	Bernold			NATM		
	L15	15-30	>30	L15	15-30	>30
Rápido	41,310	4,139	0,460	1,895	0,538	0,334
	6,100	3,266	5,009	0,542	0,344	4,000
	4,499	1,300	5,167	2,471	2,033	
	8,100	15,387	5,100	0,738	1,496	
	14,637	0,693		4,799	5,507	
	12,399	0,815		0,960	0,466	
	11,898	6,338		3,955	1,743	
	4,810			2,696	1,601	
	12,354			0,899	5,762	
	3,126			1,945	1,383	
				7,599	0,955	
				3,208	0,882	
				0,720	2,150	
				1,409	4,880	
				1,421	7,541	
				2,650	1,382	
				1,030		
				1,910		
				1,019		
				0,812		
				1,760		
				0,822		
				8,100		
				0,609		
				0,740		
				0,225		
				1,694		
				6,975		
Total	**119,233**	**31,938**	**15,736**	**63,603**	**38,663**	**4,334**
Lento	5,791					
	2,562					
Total	**8,353**	**0,000**	**0,000**	**0,000**	**0,000**	**0,000**

Una vez que se dispone de estos valores, se ajusta el eje de la vía para intentar minimizar los volúmenes de excavación, y se repite el estudio (con secciones reales ajustadas al eje final) de volúmenes a excavar, resultando en un ajuste final del entorno del 15-20%.

		VOLUMEN EXCAVACIÓN m3
GOROSMENDI	DERECHO	**1320**
	IZQUIERDO	**1647**
OINDOLAR	DERECHO	**1348**
	IZQUIERDO	**1551**

GESTIÓN DE LA SEGURIDAD EN LA REHABILITACIÓN DE LOS TÚNELES

Milagritos Ramírez Vilchez
Consultora independiente. Perú

La circulación por un túnel de carretera genera un riesgo cada vez mayor para los usuarios.

Por ello, es necesario que se incremente los sistemas de equipamientos de los túneles para aumentar su seguridad. Durante la fase de proyecto, fase de explotación de túneles y la fase de rehabilitación, se deben evaluar los posibles fallos que puedan surgir.

El análisis de riesgo se utiliza como una herramienta que ayude a tomar decisiones óptimas sobre el equipamiento, obra civil en construcción, o en la rehabilitación y explotación de un túnel.

Se determina la seguridad del túnel realizando una evaluación de riesgos que permita adoptar restricciones.

Un análisis de riesgo es un proceso en que se realiza un estudio detallado de los riesgos asociados según la fase, en el que se encuentra un determinado túnel, y se concluye con una evaluación cuantitativa o cualitativa de los mismos.

- Análisis cualitativos: Se basa en una aplicación arbitraria de la norma de evaluación.
- Análisis cuantitativos: Se intenta estructurar los posibles eventos de un sistema de una manera lógica e integrada, analizando los diferentes escenarios.

Es importante la función del responsable de seguridad de túneles, quien debe evaluar la seguridad según su mejor criterio, sin tener en cuenta las metodologías existentes.

Es importante detectar las situaciones que no quedarían del todo reflejadas en los supuestos de la metodología: Actuaciones de mantenimiento, mejora o rehabilitación de túneles existentes, operar túneles unidireccionales y bidireccionales, personal fijo en los centros de control, nivel de iluminación, existencia de señalización provisional.

SAFETY MANAGEMENT IN THE REHABILITATION OF TUNNELS

Driving through a road tunnel generates an increasing risk for users.

For this reason, it is necessary to increase the tunnel equipment systems to increase their safety. During the project phase, the tunnel exploitation phase and the rehabilitation phase, the possible failures that may arise must be evaluated.

The risk analysis is used as a tool to help make optimal decisions about equipment, civil works under construction, or the rehabilitation and operation of a tunnel.

The safety of the tunnel is determined by carrying out a risk assessment that allows restrictions to be adopted.

A risk analysis is a process in which a detailed study of the associated risks is carried out according to the phase, in which a certain tunnel is located, and it is concluded with a quantitative or qualitative evaluation of the same.

- Qualitative analysis: It is based on an arbitrary application of the evaluation standard.
- Quantitative analysis: An attempt is made to structure the possible events of a system in a logical and integrated manner, analyzing the different scenarios.

The role of the tunnel safety manager is important, as he must assess safety according to his best judgment, regardless of existing methodologies.

It is important to detect situations that would not be fully reflected in the assumptions of the methodology: maintenance actions, improvement or rehabilitation of existing tunnels, operation of unidirectional and bidirectional tunnels, permanent staff in control centers, level of lighting, existence of signaling provisional.

GESTION DE LA SÉCURITÉ DANS LA RÉHABILITATION DES TUNNELS

La circulation dans un tunnel routier génère un risque croissant pour les usagers.

Pour cette raison, il est nécessaire d'augmenter les systèmes d'équipement du tunnel pour augmenter leur sécurité. Pendant la phase de projet, la phase d'exploitation du tunnel et la phase de réhabilitation, les éventuelles défaillances pouvant survenir doivent être évaluées.

L'analyse des risques est utilisée comme un outil pour aider à prendre des décisions optimales concernant les équipements, les travaux de génie civil en cours de construction ou la réhabilitation et l'exploitation d'un tunnel.

La sécurité du tunnel est déterminée par la réalisation d'une évaluation des risques qui permet d'adopter des restrictions.

Une analyse des risques est un processus dans lequel une étude détaillée des risques associés est réalisée en fonction de la phase dans laquelle se trouve un certain tunnel et se conclut par une évaluation quantitative ou qualitative de celui-ci.

- Analyse qualitative : Elle est basée sur une application arbitraire de la norme d'évaluation.
- Analyse quantitative : Une tentative est faite pour structurer les événements possibles d'un système d'une manière logique et intégrée, en analysant les différents scénarios.

Le rôle du responsable de la sécurité du tunnel est important, car il doit évaluer la sécurité selon son meilleur jugement, indépendamment des méthodologies existantes.

Il est important de détecter des situations qui ne seraient pas pleinement prises en compte dans les hypothèses de la méthodologie : actions de maintenance, amélioration ou réhabilitation de tunnels existants, exploitation de tunnels unidirectionnels et bidirectionnels, personnel permanent dans les centres de contrôle, niveau d'éclairage, existence de signalisation provisoire

1. INTRODUCCIÓN

La circulación por un túnel de carretera genera un riesgo cada vez mayor para los usuarios.

Por ello, es necesario que se incremente los sistemas de equipamientos de los túneles para aumentar su seguridad. Durante la fase de proyecto, fase de explotación de túneles y la fase de rehabilitación, se deben evaluar los posibles fallos que puedan surgir.

El análisis de riesgo se utiliza como una herramienta que ayude a tomar decisiones óptimas sobre el equipamiento, obra civil en construcción, o en la rehabilitación y explotación de un túnel.

2. EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN LOS TÚNELES

Se determina la seguridad del túnel realizando una evaluación de riesgos que permite determinar:

- Si el túnel es seguro.

  Un ambiente de túnel seguro requiere de una interacción optimizada y equilibrada de todos los aspectos que influyen en la seguridad.

- Si el túnel es seguro adoptando restricciones.

  Es necesario integrar medidas de seguridad adicionales en este complejo sistema, teniendo en cuenta los efectos de la interacción.

- Si el túnel no es seguro.

  Es importante realizar las siguientes interrogantes para realizar una adecuada evaluación de la seguridad de un túnel.

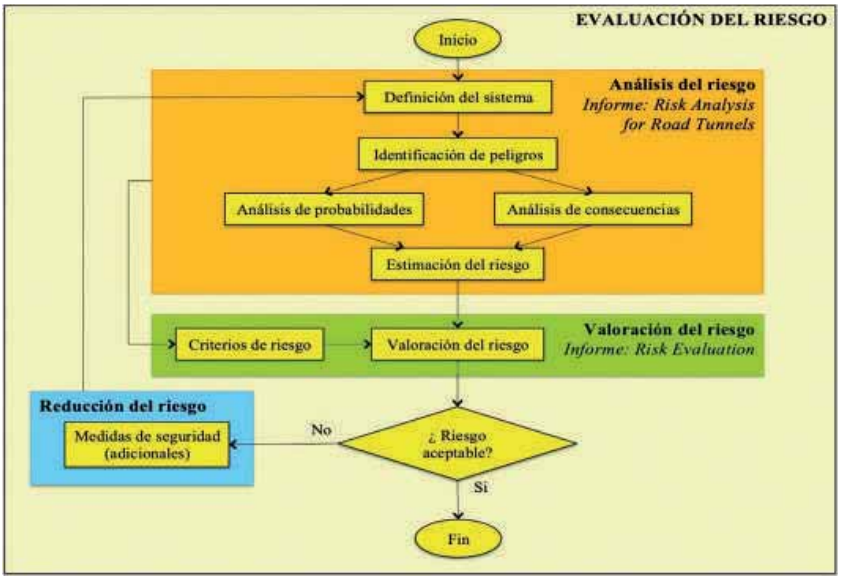
2.1. ¿Para qué nos sirve la evaluación de riesgos?

Permite analizar las secuencias de eventos y las relaciones entre los distintos incidentes posibles, identificando los puntos débiles del sistema y se puede identificar las posibles medidas de mejora.

Existen tres etapas:

- Análisis del riesgo: Es un proceso en que se realiza un estudio detallado de los riesgos identificados y asociados según la fase, en el que se encuentra un determinado túnel, y se concluye con una evaluación cuantitativa o cualitativa de los mismos.
  - Análisis cualitativos: Se basa en los criterios prescriptivos, tales como:
    - Reglamentos.
    - Normas.
    - Directrices.
    - Auditorias de seguridad.
    - Listas de verificación.
    - Esquemas de puntos.
    - Evaluación por expertos.
  - Análisis cuantitativos: Se intenta estructurar los posibles eventos de un sistema de una manera lógica e integrada, analizando los diferentes escenarios.
- Evaluación del riesgo: Implica a la aceptabilidad y al examen explícito de los criterios de seguridad.
- Planificación de las medidas de seguridad: optar por las medidas más aptas para alcanzar un sistema seguro y que logre ser rentable.

Es necesario mencionar que existen diversas etapas para evaluar el riesgo:



Procedimiento para la evaluación del riesgo – Manual Piarc.

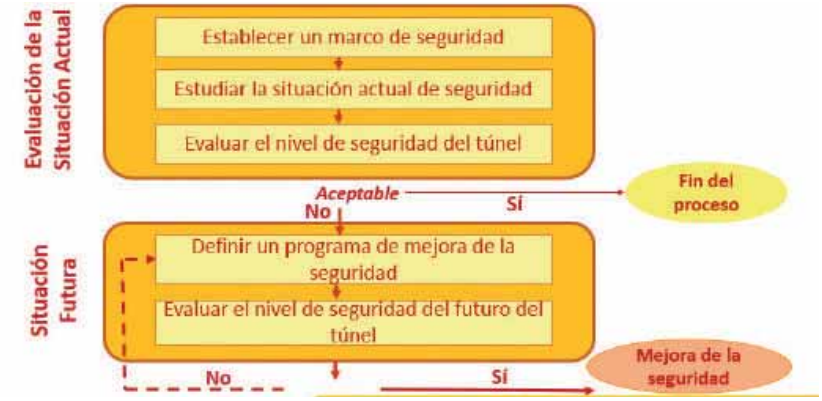
2.2. ¿Cuáles son las medidas de seguridad?

- Prevención: Reducir la probabilidad de que un riesgo se materialice.
- Autoprotección: Los afectados por un accidente puedan escapar por sí mismo.
- Protección: Reducir las consecuencias.
- Protección externa: Facilitar la actuación de los servicios de intervención.

Es necesario utilizar herramientas para la toma de decisiones basada en el riesgo:

- El modelo de riesgo debe ser capaz de cuantificar los efectos de las medidas de mitigación de riesgos en la seguridad de los túneles.
- Mediante la modelación de la influencia de una medida específica en la funcionalidad de un elemento específico de seguridad del túnel
- En cada punto individual de influencia en la cadena de eventos.

2.3. ¿Cómo se puede mejorar la seguridad de los túneles?



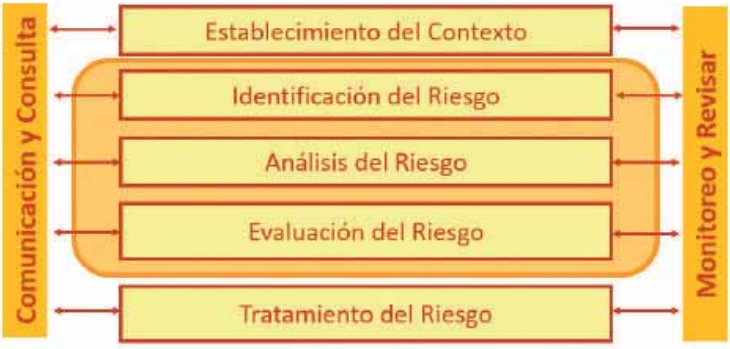
Procedimiento para mejorar las medidas de seguridad del túnel.

Es importante la función del responsable de seguridad de túneles, quien debe evaluar la seguridad según su mejor criterio, sin tener en cuenta las metodologías existentes.

3. METODOLOGÍA PARA EL USO DEL ANÁLISIS DE RIESGOS

Es importante detectar las situaciones que no quedarían del todo reflejadas en los supuestos de la metodología: Actuaciones de mantenimiento, mejora o rehabilitación de túneles existentes, operar túneles unidireccionales y bidireccionales, personal fijo en los centros de control, nivel de iluminación, existencia de señalización provisional.

Por ello, se requiere analizar el proceso de gestión de riesgos según el escenario en el que se encuentre.



Proceso de Gestión de Riesgos: ISO 31000.

3.1. Estructura de la metodología de gestión de riesgos

Esta metodología y el entorno ejecutado en base a la gestión de los riesgos se requiere que se cumpla durante todas las fases del ciclo de vida del túnel.

- **Fase 1: Planeamiento y diseño**
  - Establecer la política de riesgos.
  - Establecer unos criterios de aceptación del riesgo.
  - Evaluación cualitativa de los riesgos del proyecto.
  - Análisis detallado de aspectos de especial interés.
- **Fase 2: Licitación y contratación**
  - Requisitos en los pliegos.
  - Evaluación de riesgos en la valoración de las ofertas.
  - Cláusulas de riesgo en el contrato.
- **Fase 3: Construcción**
  - Gestión de riesgos del contratista.
  - Gestión de riesgos de la propiedad.
  - Coordinación entre la propiedad y el contratista.
- **Fase 4: Explotación**
  - Monitoreo de los riesgos en el mantenimiento preventivo.
  - Gestión de riesgos en el mantenimiento correctivo o en el caso que amerite actividades de rehabilitación del túnel.

3.2. Ejemplo de riesgos asociados en la rehabilitación del túnel

Puede depender de:

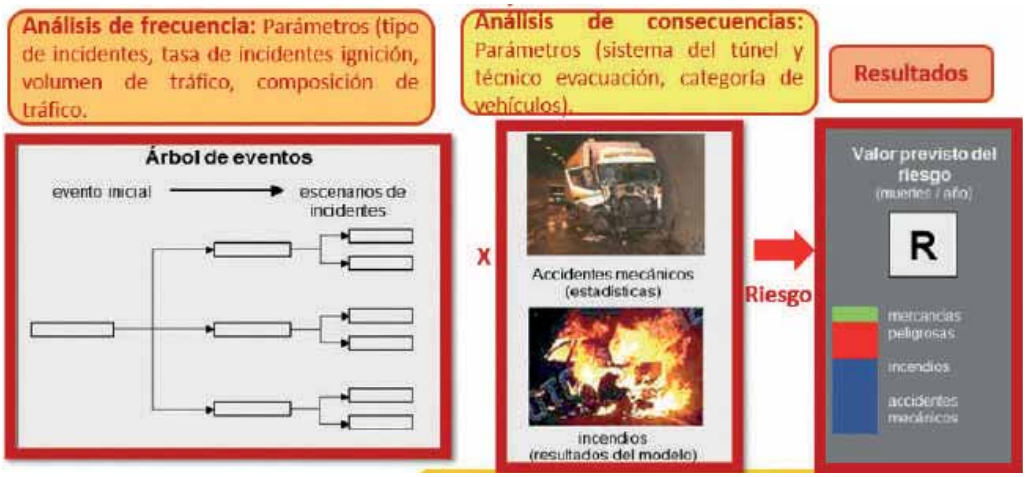
- Fallas mecánicas mayores.
- Logística inadecuada.
- Deficiente estanqueidad de los sellos de las dovelas.
- Escasez de parámetros de control y/o revisión e interpretación.
- Muestreo ineficiente.
- Ocurrencia de inestabilidades.
- Funcionamiento o comportamiento inadecuado de los equipos.
- Falta de recursos (económicos, maquinaria, materiales, personal).
- Falta de controles de calidad.
- Daños a estructuras superficiales y/o subterráneas.

Diagrama de identificación de riesgos.

3.3. Métodos de gestión de riesgos

- **Checkhlist**
  - Se elabora una lista de los aspectos peligrosos de los procesos que se llevarán a cabo.
  - Los riesgos se van confirmando mediante la comparación.
  - Puede existir omisiones y no se pueden comprobarse.
- **Árboles de sucesos**
  - Se analiza una relación simple o combinada, que precede a un suceso negativo.
  - Se puede utilizar asignando o no las probabilidades a los eventos.
  - Se puede estructurar problemas complejos.
  - El árbol de suceso (FTA), se inicia desde el suceso evaluado y desciende hacia los diferentes escenarios.
- **Árboles de eventos**
  - Se describe el desarrollo, desde el suceso inicial, y a través de diferentes secuencias posibles, de un estado final.
  - Se obtiene un análisis cuantitativo, al asignar probabilidades a cada ramificación.
  - Los eventos probables causados por uno anterior son independientes entre sí.
- **Árboles de decisión**
  - Se analiza la mejor decisión posible según la información disponible.
  - Ayuda a obtener una mejor base para la toma de decisión.

- **Caso: En la explotación del túnel**

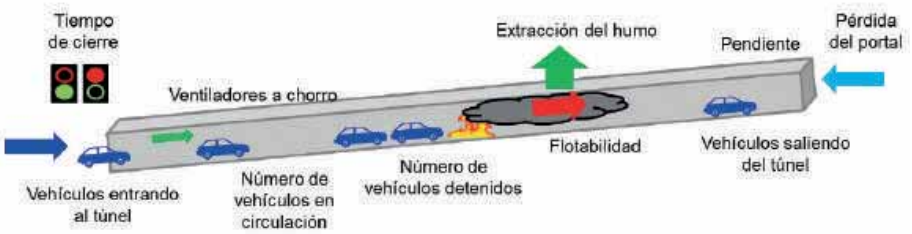


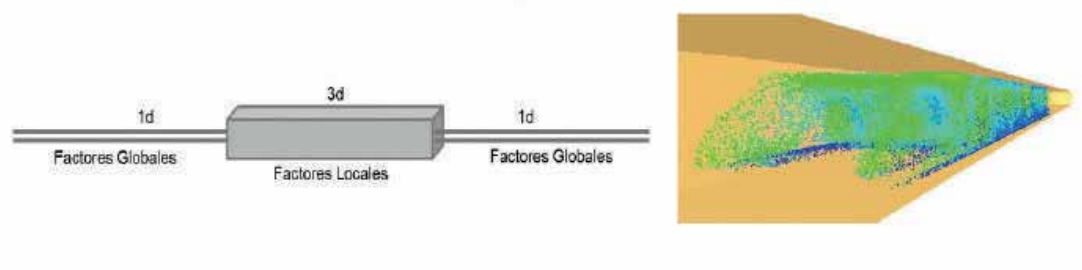
- **Análisis de frecuencia**
  Escenarios de incidentes básicos:
  - Avería de un vehículo que provoca un incendio o una colisión.
  - Colisión de un solo vehículo.
  - Colisión entre vehículos conduciendo en la misma dirección.
  - Colisión frontal.
  - Todos los tipos de colisión con incendio como evento de seguimiento.

- **Análisis de consecuencias - incendio**
  Escenarios de incidentes:
  - Para cada escenario de incendio distinto en el árbol de eventos.
  - Se genera un conjunto de escenarios detallados con parámetros locales variables.
  - Se basa en la distribución de probabilidad de los parámetros de influencia.

Para cada uno de estos escenarios de incendio, se realiza una simulación del flujo de aire transiente en 1D considerando todos los factores de influencia importantes, tales como:

- Movimientos del tráfico.
- Ubicación del incendio.
- Diseño de la ventilación.
- Las condiciones meteorológicas límite.





El desarrollo previsto de las velocidades longitudinales del flujo de aire se utiliza como condición límite en una simulación 3D CFD (FDS) en la que se examinan los efectos locales ("backlayering" o retroceso del humo, estratificación del humo....)

- **Modelo de consecuencias del incendio**
  - Cada escenario de incendio distinto se considera en un árbol de eventos.
  - El desarrollo previsto de las velocidades longitudinales del flujo de aire.
  - Las concentraciones de visibilidad, calor y gas tóxico generales en la simulación tridimensional de CFD se combinan.
  - Se calcula el número total esperado de víctimas fatales.
- **Enfoque basado en el riesgo**
  - Se necesitan algunos criterios de referencia del riesgo bien argumentados.
  - Forma de cuantificar la influencia de las características específicas de un túnel.
  - El enfoque debe ser aplicable en la práctica.

4. LA SOSTENIBILIDAD MÁS SEGURA

Una vez finalizada la fase de rehabilitación del túnel, es necesario poner énfasis en los siguientes puntos:

- Determinar las galerías de emergencia.
- Evaluar la reducción de consumo energético.
- Iluminación.
- Ventilación.
- La purificación del aire.

5. MARCO EN EL DIAGNÓSTICO, REHABILITACIÓN Y MANTENIMIENTO DE TÚNELES

Se efectúa el diagnóstico para conseguir la nueva funcionalidad y/o para rehabilitar la estructura del túnel.

Además, se requiere realizar una evaluación de los equipamientos necesarios y un análisis de coste/beneficio, elegir la situación óptima e inclinarse por sistemas seguros. Así mismo, se deben comprobar los sistemas instalados y confirmar que tengan un buen funcionamiento.

5.1. Diagnóstico de túneles

Se realiza una inspección del túnel, considerando también los sistemas de equipamientos. Esto ayudará a determinar las actividades de rehabilitación y mantenimiento para que el túnel cuente con un buen nivel de servicio.

Actividades en la inspección:

Documentación: Se debe revisar, elaborar y/o actualizar el manual de explotación, plan de autoprotección, revisiones eléctricas e informes varios.

Obra civil: Se debe realizar minuciosos levantamientos de las patologías visibles en el revestimiento, sostenimiento, pavimento, acera, drenaje, salidas, vías de evacuación y del terreno situado detrás de la estructura del túnel.

Instalaciones y equipamientos de seguridad: Se debe realizar una adecuada inspección de los sistemas de ventilación, iluminación, instalación eléctrica, sistemas de detección y extinción de incendios, comunicaciones, etc.

Condiciones de rehabilitación, mantenimiento y explotación: Es necesario elaborar y definir los planes y protocolos, definir y capacitar al personal, definir y revisar los equipos.

Metodología de la inspección:

Fase inicial: Análisis previo, elaboración de informe previo, se incluye la planificación de la inspección.

Es necesario revisar y actualizar cuando se requiera la siguiente documentación:

Proyecto de construcción, proyecto de modificación, proyecto de liquidación, proyecto de adecuación, manual de explotación, ficha de inventario, informes del responsable de seguridad de túnel, normativa de aplicación y resultados de las inspecciones rutinarias del responsable de seguridad.

Fase de desarrollo; Desarrollo de todas las pruebas de inspección para verificar el correcto funcionamiento de los equipamientos, el estado de la infraestructura, condiciones de conservación.

Las actividades en esta fase, se realizan de acuerdo a la planificación acordada según el informe previo.

Se puede establecer tres tipos de actividades:

- Actividades tipo 0: Se realizan la inspección del centro de control, inspección de locales técnicos y se recoge la información que no fue prevista en la fase inicial.
- Actividades tipo 1: Se realiza la inspección de elementos de seguridad existentes, se realiza en horario diurno e inspección de las instalaciones del carril derecho del túnel.
- Actividades tipo 2: Se realizan en horario nocturno, pruebas de ventilación, alumbrado, megafonía, inspección de las instalaciones del carril derecho, inspección de galerías.

Es necesario revisar los equipos de medición que se utilizarán para una inspección eficaz:

- Anemómetro fijo y móvil.
- Luminancímetro.
- Luxómetro.
- Polímetro eléctrico.
- Cámara termográfica.

- Botellas de gas CO.
- Cámara de vídeo y fotográfica.
- Rueda de medir, medidor láser, etc.

Fase de evaluación: Se realiza el proceso de información obtenida de las inspecciones.

Consiste en analizar toda la información recogida, con objeto de evaluar el funcionamiento de cada sistema del túnel de manera individual y poder emitir un dictamen de seguridad global de cada túnel.

Para cada instalación se establecen tres grados de cumplimiento de los requisitos normativos:

- Favorable: Son aquellas que cumplen la función para la que han sido diseñadas
- Favorable con observaciones: Son aquellas que cumplen la función para la que han sido diseñadas pero en las que existen determinadas anomalías
- Desfavorable: Son aquellas que en el momento de la inspección no permiten asegurar su funcionalidad y por tanto no cumplen la función

SISTEMA	CÓDIGO	OBSERVACIONES
BIES	GENERAL	INSTALACIÓN CONTRA INCENDIOS ESTÁ INUTILIZADA, A LA ESPERA DE QUE CAMBIEN TODA LA RED DE DISTRIBUCIÓN.
	BIETU202	PUERTA DE LA BIE SIN CRISTAL
	BIETU203	PUERTA DE LA BIE SIN CRISTAL
	BIETU204	PUERTA DE LA BIE CON EL CRISTAL ROTO
	BIETU207	PUERTA DE LA BIE CON EL CRISTAL ROTO
	BIETU211	PUERTA DE LA BIE SIN CRISTAL
EXTINTORES	EXTTU201	EXTINTOR OXIDADO
	EXTTU202	EXTINTOR OXIDADO
	EXTTU206	PUERTA DEL ARMARIO DEL EXTINTOR SIN CRISTAL
	EXTTU209	PUERTA DEL ARMARIO DEL EXTINTOR SIN CRISTAL
	EXTTU210	PUERTA DEL ARMARIO DEL EXTINTOR SIN CRISTAL
	EXTTU211	PUERTA DEL ARMARIO DEL EXTINTOR SIN MANILLA
	EXTTU213	EXTINTOR OXIDADO
POSTES SOS INTERIORES	SOITU205	MALA AUDIBILIDAD EN CENTRO DE CONTROL
POSTES SOS EXTERIORES	SOETU102	MALA AUDIBILIDAD EN CENTRO DE CONTROL, NO DETECTA APERTURA DE PUERTA
CÁMARA DE CCTV EXTERIOR	CAMTU201	SE VE MAL, CON MUCHO CONTRASTE Y BRILLO
CÁMARA DE CCTV INTERIOR	CAFTU203	MUY MALA VISULIZACIÓN NO SE DISTINGUE NADA
	CAFTU204	MUCHO BRILLO, NO SE VE BIEN
VENTILACIÓN	VENTU206	SE PONE EN LOCAL ESPORÁDICAMENTE CUANDO SE ACTIVA EN MANUAL
CONTROL VENTILACIÓN	DCOTU201	ESTÁ EN REPARACIÓN
ANEMÓMETRO	ANITU201	MALA CALIBRACIÓN
HIDRANTES	GENERAL	NO EXISTEN
MEGAFONÍA	GENERAL	SE OYE MUY BAJO
BARRERAS	GENERAL	NO EXISTEN

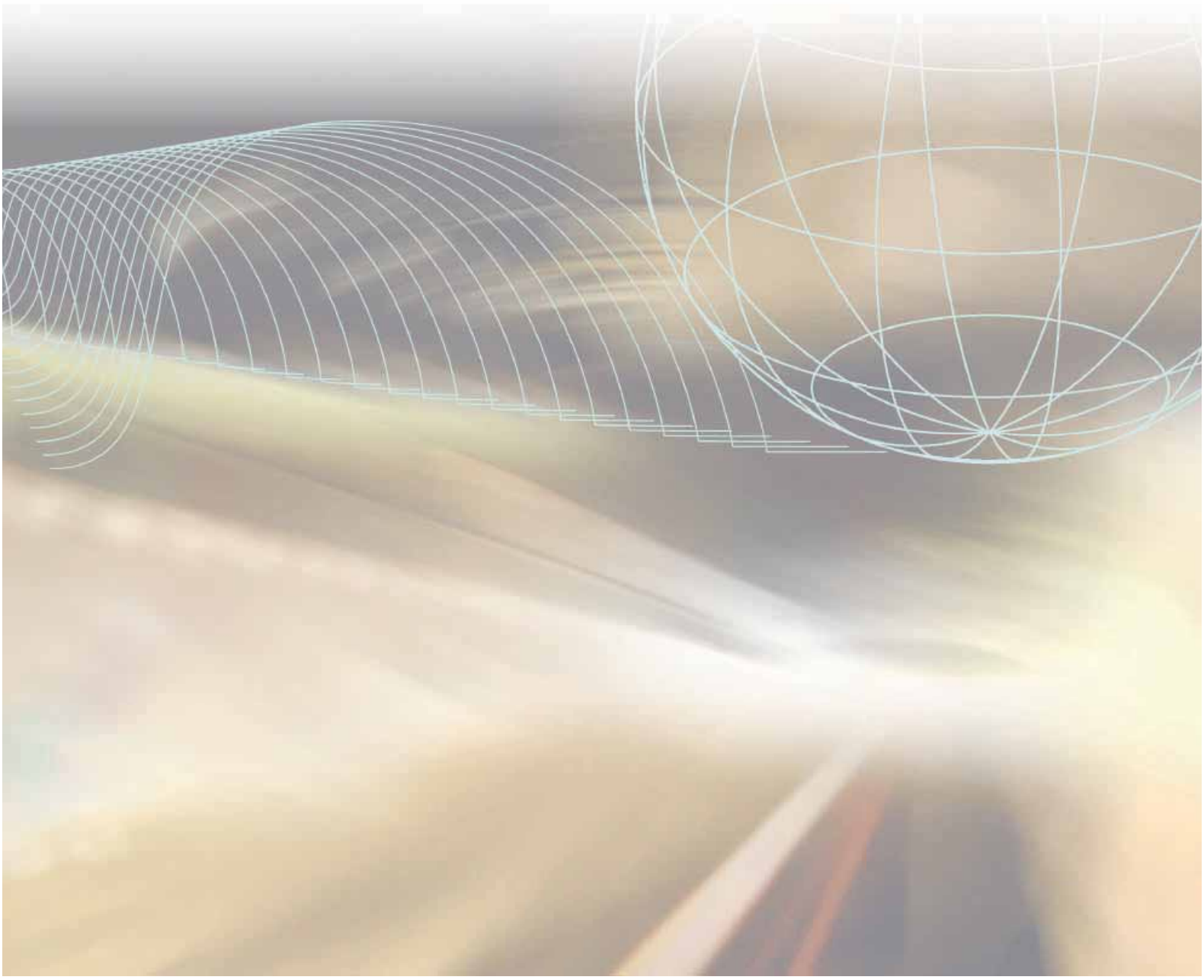
Ejemplo de inspección de un túnel

5.2. Rehabilitación

Se requiere en conseguir la adecuación del túnel a su funcionalidad o aumentar el nivel de funcionalidad y capacidad de la estructura subterránea.

Es necesario realizar un análisis de las técnicas a utilizar según sea la situación en que se encuentre, como por ejemplo las técnicas para ampliar el diámetro de un túnel existente son:

Plataforma	Sección transversal	Estación de trabajo del túnel	Método de corte del túnel	Método de plataforma plana
Construcción de un refugio de material resistente a los impactos por debajo del cual circula el tráfico	Se realizan todas las operaciones de demolición del revestimiento antiguo, el sostenimiento de la roca, la construcción del nuevo revestimiento y el desescombro.	Se realiza obras de ampliación de modo automático dejando espacio en el interior para que circule el tráfico.	Se realiza excavando galerías de avance laterales y utilizando el antiguo revestimiento como escudo de protección.	Se utiliza un escudo simple para separar los vehículos del equipo o se puede optar por una cubierta de trabajo móvil (plataforma plana) como superficie de trabajo para la excavadora.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE FOMENTO