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

VOLUME I

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

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

Comité de Túneles de Carretera. Asociación Técnica de Carreteras

VOLUME I

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 I

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 II

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

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

1. **FUTURE CHALLENGES FOR TUNNEL SAFETY AND OPERATION FROM THE PERSPECTIVE OF PIARC'S TUNNEL COMMITTEE**
   LOS FUTUROS RETOS DE LA SEGURIDAD Y LA EXPLOTACIÓN DE LOS TÚNELES DESDE LA PERSPECTIVA DEL COMITÉ DE TÚNELES DEL PIARC
   LES DÉFIS FUTURS DE LA SÉCURITÉ ET DE L'EXPLOITATION DES TUNNELS DU POINT DE VUE DU COMITÉ DES TUNNELS DU PIARC
   Ingo Kaundinya 25

2. **TÚNELES DE FUTURO. OBJETIVO 2030**
   TUNNELS OF THE FUTURE. TARGET 2030
   LES TUNNELS DU FUTUR. OBJECTIF 2030
   Rafael López Guarga 35

3. **DESAFÍOS PARA LA OPTIMIZACIÓN EN EL PROYECTO DE SISTEMAS DE VENTILACIÓN**
   CHALLENGES FOR OPTIMISATION IN THE DESIGN OF VENTILATION SYSTEMS
   LES DÉFIS DE L'OPTIMISATION DANS LA CONCEPTION DES SYSTÈMES DE VENTILATION
   Ignacio del Rey Llorente 63

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

Topic: "Resilience in tunnels"

4. **LIMITING NUISANCE FOR TRAFFIC DURING THE REFURBISHMENT OF THE HEINENOORD TUNNEL IN THE NETHERLANDS; IN SEARCH OF RESILIENCE POSSIBILITIES**
   LIMITACIÓN DE LAS MOLESTIAS PARA EL TRÁFICO DURANTE LA REMODELACIÓN DEL TÚNEL DE HEINENOORD EN LOS PAÍSES BAJOS; EN BUSCA DE POSIBILIDADES DE RESILIENCIA
   LIMITATION DES NUISANCES POUR LE TRAFIC PENDANT LA RÉNOVATION DU TUNNEL HEINENOORD AUX PAYS-BAS ; À LA RECHERCHE DE POSSIBILITÉS DE RÉSILIENCE
   Ronald Mante 95

5. **SEISMIC AND TSUNAMI RESILIENCE ASSESSMENT OF ROADWAY TUNNELS IN EARTHQUAKE PRONE REGIONS**
   EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA SÍSMICA Y DE TSUNAMIS DE TÚNELES VIALES EN REGIONES PROPENSAS A TERREMOTOS
   ÉVALUATION DE LA RÉSILIENCE SISMIQUE ET AUX TSUNAMIS DES TUNNELS ROUTIERS DANS LES RÉGIONS SUJETTES AUX TREMBLEMENTS DE TERRE.
   Bijan Khaleghi 111

6. **INFLUENCIAS ADMISIBLES DE LOS TÚNELES SOBRE LA SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL Y SOCIOECONÓMICA DE LOS ACUÍFEROS ATRAVESADOS**
ADMISSIBLE TUNNEL INFLUENCES ON THE ENVIRONMENTAL AND SOCIO-ECONOMIC SUSTAINABILITY OF THE CROSSED AQUIFERS
INFLUENCES ADMISSIBLES DES TUNNELS SUR LA DURABILITÉ ENVIRONNEMENTALE ET SOCIO-ÉCONOMIQUE DES AQUIFÈRES TRAVERSÉS
César Fernández - Nespral Pérez 123

Papers:

7. **CONDICIONES MÍNIMAS DE EXPLOTACIÓN (CME)**
MINIMUM OPERATING REQUIREMENTS (MOR)
CONDITIONS MINIMALES D'EXPLOITATION (CME)
José Ramón Ochoa Vega 145

8. **LA IMPORTANCIA DE LA RESILIENCIA EN EL EQUIPO HUMANO**
THE IMPORTANCE OF RESILIENCE IN THE HUMAN TEAM
L'IMPORTANCE DE LA RÉSILIENCE DANS L'ÉQUIPE HUMAINE
Juan Torres García 157

9. **APPLICATION DES CONCEPTS LOW-TECH ET LEAN-TECH AUX TUNNELS ROUTIERS POUR UNE PLUS GRANDE SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE**
APLICACIÓN DE CONCEPTOS DE BAJA TECNOLOGÍA Y LEAN-TECH A LOS TÚNELES DE CARRETERA PARA UNA MAYOR EFICIENCIA ENERGÉTICA
APPLICATION OF LOW-TECH AND LEAN-TECH CONCEPTS TO ROAD TUNNELS FOR GREATER ENERGY EFFICIENCY
Martinetto Olivier; Guiral Florent 167

10. **ANÁLISIS DEL INCENDIO EN EL TÚNEL DE FOLGOSO. GESTIÓN, REPARACIÓN Y REAPERTURA**
ANALYSIS OF THE FIRE IN THE FOLGOSO TUNNEL. MANAGEMENT, REPAIR AND REOPENING
ANALYSE DE L'INCENDIE DU TUNNEL DE FOLGOSO. GESTION, RÉPARATION ET RÉOUVERTURE
Jose Manuel Piris Ruesga 177

11. **RESILIENCE OF GERMAN ROAD TUNNELS AND THE MACROECONOMIC EVALUATION OF THEIR AVAILABILITY**
RESILIENCIA DE LOS TÚNELES DE CARRETERA ALEMANES Y EVALUACIÓN MACROECONÓMICA DE SU DISPONIBILIDAD
LA RÉSILIENCE DES TUNNELS ROUTIERS ALLEMANDS ET L'ÉVALUATION MACROÉCONOMIQUE DE LEUR DISPONIBILITÉ
Ulrich Bergerhausen; Alexander Dahl; Charlotte Fléchon; Harald Kammerer; Ingo Kaundinya 191

12. **NUEVO TÚNEL VIARIO: SOTERRAMIENTO DE UN TRAMO DE LA AUTOVÍA A-5 EN MADRID**
NEW ROAD TUNNEL: UNDERGROUNDING OF A SECTION OF THE A-5 MOTORWAY IN MADRID
NOUVEAU TUNNEL ROUTIER : MISE EN SOUTERRAIN D'UN TRONÇON DE L'AUTOROUTE A-5 À MADRID
Carlos García Acón; Mª Dolores Ortiz Sánchez; Sebastián Guerrero; Manuel de Cabo 205

13. **VALORACIÓN OBJETIVA DE LA RESILIENCIA EN TÚNELES DE CARRETERA**
OBJECTIVE ASSESSMENT OF RESILIENCE IN ROAD TUNNELS
ÉVALUATION OBJECTIVE DE LA RÉSILIENCE DES TUNNELS ROUTIERS
David Zamora Martínez 217

14. **INTELIGENCIA ARTIFICIAL: HERRAMIENTA CLAVE PARA INCREMENTAR LA RESILIENCIA DE LOS TÚNELES**
ARTIFICIAL INTELLIGENCE: KEY TOOL FOR INCREASING TUNNEL RESILIENCE
L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : UN OUTIL CLÉ POUR ACCROÎTRE LA RÉSILIENCE DES TUNNELS
César Fernández Ramírez 225

Non read Papers:

15. **PLAN DE MANTENIMIENTO DE ESTRUCTURAS EN TÚNEL DE LA AUTOVÍA DE CIRCUNVALACIÓN DE MADRID M-30**
MAINTENANCE PLAN FOR STRUCTURES IN THE M-30 MADRID RING ROAD TUNNEL
PLAN D'ENTRETIEN DES STRUCTURES DANS LE TUNNEL DE L'AUTOROUTE DE CIRCUMVALATION M-30 DE MADRID
Sergio Barral García; Luis Benito Olmeda; José Antonio Morena Villanueva 241

16. **MIGRACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE TÚNELES EN EXPLOTACIÓN A SCADAS ABIERTOS. BEIRA INTERIOR UN CASO DE ÉXITO DESPUES DE UN AÑO DE EXPERIENCIA**
MIGRATION OF TUNNEL CONTROL SYSTEMS FROM OPERATING TUNNELS TO OPEN SCADAS. BEIRA INTERIOR A SUCCESS STORY AFTER ONE YEAR OF EXPERIENCE
LA MIGRATION DES SYSTÈMES DE CONTRÔLE DES TUNNELS EN EXPLOITATION VERS LES SCADAS OUVERTS. BEIRA INTERIOR : UNE RÉUSSITE APRÈS UN AN D'EXPÉRIENCE
Antonio O. Martín Crisent; Eduard Cuadrat 256

17. **RESILIENCE ASSESSMENT TOOL FOR ROAD TUNNELS**
HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA DE LOS TÚNELES DE CARRETERA
OUTIL D'ÉVALUATION DE LA RÉSILIENCE DES TUNNELS ROUTIERS
K. Anastassiadou; U. Bergerhausen; F. Linstroem; C. Zulauf 263

18. **IMPROVING ROAD TUNNEL RESILIENCE BY DYNAMIC RISK ANALYSIS**
MEJORA DE LA RESISTENCIA DE LOS TÚNELES DE CARRETERA MEDIANTE EL ANÁLISIS DINÁMICO DE RIESGOS
AMÉLIORATION DE LA RÉSILIENCE DES TUNNELS ROUTIERS PAR L'ANALYSE DYNAMIQUE DES RISQUES
Alessandro Focaracci 271

19. **RESILIENT TUNNELS TO CLIMATE CHANGE THROUGH FLOOD GATES**
TÚNELES RESISTENTES AL CAMBIO CLIMÁTICO MEDIANTE COMPUERTAS DE INUNDACIÓN
TUNNELS RÉSILIENTS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE À TRAVERS LES VANNES ANTI-INONDATION
Bijan Khaleghi 283

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

20. **EL RETO DE LA RENOVACIÓN DEL CENTRO DE CONTROL DE LOS TÚNELES DE CALLE30 (MADRID) SIN AFECCIONES A LOS USUARIOS**

THE CHALLENGE OF RENOVATING THE CONTROL CENTRE OF THE CALLE30 TUNNELS (MADRID) WITHOUT AFFECTING USERS

LE DÉFI DE RÉNOVER LE CENTRE DE CONTRÔLE DES TUNNELS DE LA CALLE30 (MADRID) SANS AFFECTER LES USAGERS

Javier Berges Redondo 299

21. **KITT – ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO IMPROVE THE SAFETY OF TUNNELS AND TUNNEL CONTROL CENTRES**

KITT - INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA MEJORAR LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES Y LOS CENTROS DE CONTROL DE TÚNELES

KITT - L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR AMÉLIORER LA SÉCURITÉ DES TUNNELS ET DES CENTRES DE CONTRÔLE DES TUNNELS

Anne Lehan; Hendrik Wahl; Harald Kammerer; Bernhard Klampfer 321

22. **NUEVA TECNOLOGÍA DE SEÑALIZACIÓN DE ALTA VISIBILIDAD EN TÚNELES**

NEW HIGH-VISIBILITY TUNNEL SIGNALLING TECHNOLOGY

NOUVELLE TECHNOLOGIE DE SIGNALISATION DES TUNNELS À HAUTE VISIBILITÉ

Luis Ayres Janeiro 337

Papers:

23. **REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD EN TÚNELES**

SPEED REGULATION IN TUNNELS

RÉGULATION DE LA VITESSE DANS LES TUNNELS

Cristina Zamorano Nicolás 353

24. **PLATAFORMA DIGITAL DE GESTIÓN INTEGRADA DE TÚNELES**

INTEGRATED DIGITAL TUNNEL MANAGEMENT PLATFORM

PLATEFORME INTÉGRÉE DE GESTION DES TUNNELS NUMÉRIQUES

Vicente Sebastián Alapont 363

25. **SISTEMAS INTELIGENTES PARA LA DETECCIÓN DE INFRACCIONES DE TRÁFICO. EJEMPLO DEL TÚNEL DE BIELSA-ARAGNOUET**

INTELLIGENT SYSTEMS FOR THE DETECTION OF TRAFFIC INFRACTIONS. EXAMPLE OF THE BIELSA-ARAGNOUET TUNNEL

SYSTÈMES INTELLIGENTS POUR LA DÉTECTION DES INFRACTIONS DE LA CIRCULATION. EXEMPLE DU TUNNEL DE BIELSA-ARAGNOUET.

Andrés Olloqui 377

26. **STRATEGY-LED INVESTMENT IN TUNNEL POSITIONING AND WAYFINDING ITS TECHNOLOGIES**
INVERSIÓN ESTRATÉGICA EN TECNOLOGÍAS ITS DE POSICIONAMIENTO Y SEÑALIZACIÓN DE TÚNELES
INVESTISSEMENT STRATÉGIQUE DANS LES TECHNOLOGIES STI DE POSITIONNEMENT ET D'ORIENTATION DANS LES TUNNELS
Hossein Parsa 387

27. **VEHÍCULOS CONECTADOS Y AUTÓNOMOS A TRAVÉS DE LOS TÚNELES DE CARRETERA**
CONNECTED AND AUTONOMOUS VEHICLES THROUGH ROAD TUNNELS
VÉHICULES CONNECTÉS ET AUTONOMES DANS LES TUNNELS ROUTIERS
Iván Ricondo Zaldívar 393

28. **PLATAFORMA DE SIMULACIÓN PARA ENTRENAMIENTOS DE OPERADORES**
SIMULATION PLATFORM FOR OPERATOR TRAINING
PLATE-FORME DE SIMULATION POUR LA FORMATION DES OPÉRATEURS
Fco. Javier Cabrerizo Fuentes 407

29. **DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE TÚNELES EN SERVICIO MEDIANTE LA INTEGRACIÓN, APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA BIM (BIMEXTUNEL)**
DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN IN-SERVICE TUNNEL MANAGEMENT SYSTEM THROUGH THE INTEGRATION, APPLICATION AND ANALYSIS OF THE BIM METHODOLOGY (BIMEXTUNEL)
CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME DE GESTION DES TUNNELS EN SERVICE PAR L'INTÉGRATION, L'APPLICATION ET L'ANALYSE DE LA MÉTHODOLOGIE BIM (BIMEXTUNEL)
Zacarías Barcenilla Torres; Pedro Yarza Álvarez 413

30. **¿ESTÁN LOS TÚNELES PREPARADOS PARA EL TRÁNSITO DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS Y CONECTADOS?**
ARE TUNNELS READY FOR THE TRANSIT OF AUTONOMOUS AND CONNECTED VEHICLES?
LES TUNNELS SONT-ILS PRÉPARÉS AU TRANSIT DES VÉHICULES AUTONOMES ET CONNECTÉS?
Vicente Sebastián Alapont 435

31. **COOPERATIVE SYSTEMS IN ROAD TUNNELS - POTENTIALS FROM THE USE OF C2X COMMUNICATION FOR TUNNEL MONITORING**
SISTEMAS COOPERATIVOS EN TÚNELES DE CARRETERA: POTENCIAL DEL USO DE LA COMUNICACIÓN C2X PARA LA VIGILANCIA DE TÚNELES
SYSTÈMES COOPÉRATIFS DANS LES TUNNELS ROUTIERS - POTENTIEL DE L'UTILISATION DE LA COMMUNICATION C2X POUR LA SURVEILLANCE DES TUNNELS
Georg Mayer 447

Non read Papers:

32. **FERROPISTA EN LA CORDILLERA CENTRAL DE LOS ANDES, COLOMBIA**
FERROPISTA IN THE CORDILLERA CENTRAL OF THE ANDES, COLOMBIA
FERROPISTA DANS LA CORDILLÈRE CENTRALE DES ANDES, COLOMBIE
José Pedro Alba García; Hernán Otoniel Fernández Ordóñez 469

33. **PROYECTO INNOVACIÓN: CARRETERA CONECTADA / CROADS**
INNOVATION PROJECT: CONNECTED ROAD / CROADS
PROJET D'INNOVATION : ROUTE CONNECTÉE / CROADS
Sergio Barral García 487

34. **GESTIÓN DE LA EXPLOTACIÓN, DURANTE LA RENOVACIÓN DEL CENTRO DE LOS TÚNELES DE LA M30**
OPERATION MANAGEMENT, DURING THE RENOVATION OF THE M30 TUNNELS CENTRE
GESTION DE L'EXPLOITATION, PENDANT LA RÉNOVATION DU CENTRE DES TUNNELS DE LA M30
Raquel Bartolomé 449

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

35. **MAINTENANCE AND TRAFFIC OPERATION OF HEAVY TRAFFICKED ROAD TUNNELS**
MANTENIMIENTO Y EXPLOTACIÓN DE TÚNELES DE CARRETERA CON TRÁFICO PESADO
MAINTENANCE ET EXPLOITATION DES TUNNELS ROUTIERS À FORT TRAFIC
Arthur Kabuya; Urs Welte 519

36. **DISEÑO DE UN TÚNEL PARA MEJORAR LAS CONDICIONES AMBIENTALES DEL ENTORNO**
DESIGN OF A TUNNEL TO IMPROVE THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF THE SURROUNDINGS
CONCEPTION D'UN TUNNEL POUR AMÉLIORER LES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES DES ENVIRONS
Juan Manuel Sanz Sacristán 539

37. **LA COMPLEJIDAD DE LA EXPLOTACIÓN EN UNA INFRAESTRUCTURA DE GRANDES DIMENSIONES**
THE COMPLEXITY OF OPERATING A LARGE-SCALE INFRASTRUCTURE
LA COMPLEXITÉ DE L'EXPLOITATION D'UNE INFRASTRUCTURE À GRANDE ÉCHELLE
Sergio Barral García 555

Papers:

38. **DISEÑO DE TÚNELES URBANOS**
URBAN TUNNEL DESIGN
CONCEPTION DE TUNNELS URBAINS
Andreu Estany Serra 567

39. **FONCTIONNEMENT EN MODE DÉGRADÉ D'UN POSTE DE CONTRÔLE-COMMANDE ASSURANT LA SURVEILLANCE DE PLUSIEURS TUNNELS**
FUNCIONAMIENTO EN MODO DEGRADADO DE UN CENTRO DE CONTROL QUE SUPERVISA VARIOS TÚNELES
OPERATION IN DEGRADED MODE OF A CONTROL CENTRE MONITORING SEVERAL TUNNELS
Jean-Claude Martin 579

40. **EJE LITORAL SOTERRADO. PLAN MÁLAGA LITORAL**
UNDERGROUND COASTAL AXIS. MALAGA COASTAL PLAN
AXE CÔTIER SOUTERRAIN. PLAN CÔTIER DE MALAGA
José Pedro Alba García; Alfonso Alba Ripoll 589

41. **EL DISEÑO DE LA MOVILIDAD EN TUNELES URBANOS**
MOBILITY DESIGN IN URBAN TUNNELS
CONCEPTION DE LA MOBILITÉ DANS LES TUNNELS URBAINS
David Soler Grima 609

42. **BUILDING INFORMATION MODELLING FOR AN OPTIMIZED AND SAFE OPERATION OF ROAD TUNNELS**
BUILDING INFORMATION MODELLING PARA UN FUNCIONAMIENTO OPTIMIZADO Y SEGURO DE LOS TÚNELES DE CARRETERA
MODÉLISATION DES DONNÉES DU BÂTIMENT POUR UNE EXPLOITATION OPTIMISÉE ET SÛRE DES TUNNELS ROUTIERS
Götz Vollmann; Markus Thewes; Hendrik Wahl; Anne Lehan; Markus König; Marcel Stepien; Werner Riepe; Ferdinand Weißbrod 629

Non read Papers:

43. **PLATAFORMA PARA LA EXPLOTACIÓN Y COMUNICACIÓN EN TIEMPO REAL CON AUTÓMATA (PLECTRA)**
PLATFORM FOR REAL-TIME OPERATION AND COMMUNICATION WITH AUTOMATON (PLECTRA)
PLATEFORME D'EXPLOITATION ET DE COMMUNICATION EN TEMPS RÉEL AVEC AUTOMATE (PLECTRA)
Lucía Ruiz Rivero 641

44. **DISEÑO DE INSTALACIONES EN TUNELES DE CARRETERA CON ANALISIS DE COSTE DE CICLO DE VIDA**
DESIGN OF ROAD TUNNEL INSTALLATIONS WITH LIFE CYCLE COST ANALYSIS.
CONCEPTION D'INSTALLATIONS DE TUNNELS ROUTIERS AVEC ANALYSE DU COÛT DU CYCLE DE VIE
Juan Carlos Fernández Cuenca 653

45. **ROAD SAFETY INSPECTION WITH SPECIAL ASPECTS OF TUNNELS**
INSPECCIÓN DE SEGURIDAD VIAL CON ASPECTOS ESPECIALES DE LOS TÚNELES
INSPECTION DE LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE AVEC DES ASPECTS PARTICULIERS DES TUNNELS
Emir Smailović; Dalibor Pešić; Boris Antić; Krsto Lipovac; Jovana Petrović 673

46. **TUNNEL HORELICA, A BIDIRECTIONAL TUNNEL WITH THE HIGHEST LEVEL OF TRAFFIC IN SLOVAKIA**
TÚNEL HORELICA, UN TÚNEL BIDIRECCIONAL CON EL MAYOR NIVEL DE TRÁFICO DE ESLOVAQUIA
TUNNEL HORELICA, UN TUNNEL BIDIRECTIONNEL AVEC LE PLUS HAUT NIVEAU DE TRAFIC EN SLOVAQUIE
Peter Danišovič; Jaroslav Štrba 687

47. **THE EFFECT OF THE PILOT PROJECT WITH COMPREHENSIVE COUNTERMEASURES FOR TRAFFIC SAFETY IN TUNNEL**

EL EFECTO DEL PROYECTO PILOTO CON CONTRAMEDIDAS INTEGRALES PARA LA SEGURIDAD DEL TRÁFICO EN EL TÚNEL

L'EFFET DU PROJET PILOTE AVEC DES CONTRE-MESURES GLOBALES POUR LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE DANS UN TUNNEL

Seungjun Lee 707

48. **KRABI BYPASS, THE FIRST MODERN HIGHWAY TUNNEL PROJECT IN THAILAND: CHALLENGE AND SOLUTION**

CIRCUNVALACIÓN DE KRABI, EL PRIMER PROYECTO DE TÚNEL MODERNO DE AUTOVÍA EN TAILANDIA: DESAFÍO Y SOLUCIÓN

KRABI BYPASS, LE PREMIER PROJET DE TUNNEL AUTOROUTIER MODERNE EN THAÏLANDE: DÉFI ET SOLUTION

Sukit Yindeesuk; Suphat Chummuneerat; Surachead Lekhacharakul; Seksit Sirivaidyapong 719

49. **GESTIÓN Y COORDINACIÓN DE CENTROS DE CONTROL DE TÚNELES URBANOS: TÚNELES DE BARCELONA Y DEL PRINCIPADO DE ANDORRA**

MANAGEMENT AND COORDINATION OF URBAN TUNNEL CONTROL CENTERS: BARCELONA AND PRINCIPALITY OF ANDORRA TUNNELS

GESTION ET COORDINATION DES CENTRES DE CONTRÔLE DES TUNNELS URBAINS : TUNNELS DE BARCELONE ET DE LA PRINCIPAUTÉ D'ANDORRE

Ladislao Torija Tamayo 741

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

50. **IMPACT OF NEW ENERGY CARRIERS ON TUNNEL DESIGN AND SAFETY - STATUS REPORT OF PIARC TC 4.4 WG4**

IMPACTO DE LOS NUEVOS VECTORES ENERGÉTICOS EN EL DISEÑO Y LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES - INFORME DE SITUACIÓN DEL TC 4.4 WG4 DE LA AIPCR

IMPACT DES NOUVEAUX VECTEURS D'ÉNERGIE SUR LA CONCEPTION ET LA SÉCURITÉ DES TUNNELS - RAPPORT D'ÉTAPE DU WG4 DU CT 4.4 DE L'AIPCR

Peter Sturm; Gary Clark 759

51. **QUANTITATIVE RISK ASSESSMENT APPROACHES FOR NEW VEHICLE PROPULSION ENERGY CARRIERS IN ROAD TUNNELS**

ENFOQUES DE EVALUACIÓN CUANTITATIVA DEL RIESGO DE LOS NUEVOS VECTORES ENERGÉTICOS DE PROPULSIÓN DE VEHÍCULOS EN LOS TÚNELES DE CARRETERA

APPROCHES D'ÉVALUATION QUANTITATIVE DES RISQUES POUR LES NOUVEAUX VECTEURS ÉNERGÉTIQUES DE PROPULSION DES VÉHICULES DANS LES TUNNELS ROUTIERS

Bernhard Kohl; Oliver Heger; Anne Lehan; Patrik Fößleitner 779

52. **EL VEHÍCULO ELÉCTRICO TAMBIÉN CONTAMINA**

ELECTRIC VEHICLES ALSO POLLUTE

LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES POLLUENT AUSSI

Ramón Morera Fauquier 799

Papers:

53. **INSTALACIÓN DE PUNTOS DE CARGA ELÉCTRICA EN TÚNELES DE CARRETERA**
INSTALLATION OF ELECTRIC CHARGING POINTS IN ROAD TUNNELS
INSTALLATION DE BORNES DE RECHARGE ÉLECTRIQUE DANS LES TUNNELS ROUTIERS
Alberto Cuadrado Madrona 821

54. **HYTUNNEL-CS PROJECT: SAFETY STRATEGIES FOR HYDROGEN VEHICLES IN TUNNELS AND UNDERGROUND INFRASTRUCTURE**
PROYECTO HYTUNNEL-CS: ESTRATEGIAS DE SEGURIDAD PARA VEHÍCULOS DE HIDRÓGENO EN TÚNELES E INFRAESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS
PROJET HYTUNNEL-CS : STRATÉGIES DE SÉCURITÉ POUR LES VÉHICULES À HYDROGÈNE DANS LES TUNNELS ET LES INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES
Jesús Sanch; Dmitriy Makarov; Sara Martinez 837

55. **E-TUNEL, O SMART−TUNEL. UNA ADAPTACION A LAS NUEVAS REALIDADES**
E-TUNNEL, OR SMART-TUNNEL. AN ADAPTATION TO NEW REALITIES
E-TUNNEL, OU SMART-TUNNEL. UNE ADAPTATION AUX NOUVELLES RÉALITÉS
Manuel Alberto Abella Suárez 855

56. **NEXT GENERATION AIR PURIFICATION SYSTEM FOR ROAD TUNNEL WITH SIGNIFICANT INCREASED EV COMPOSITION**
SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE AIRE DE NUEVA GENERACIÓN PARA TÚNELES DE CARRETERA CON UN AUMENTO SIGNIFICATIVO DE LA COMPOSICIÓN EV
SYSTÈME DE PURIFICATION DE L'AIR DE NOUVELLE GÉNÉRATION POUR UN TUNNEL ROUTIER AVEC UNE COMPOSITION EV CONSIDÉRABLEMENT ACCRUE
Chi Kit Ma; Kevin Tong; Leo Chan 865

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

FIRST SESSION:

New challenges on tunnels for the 2030 target

FUTURE CHALLENGES FOR TUNNEL SAFETY AND OPERATION FROM THE PERSPECTIVE OF PIARC'S TUNNEL COMMITTEE

Ingo Kaundinya
Federal Highway Research Institute (BASt),
Chair of PIARC TC 4.4 Tunnels, Germany

This paper presents the outputs of PIARC's road tunnel committee of the current work cycle 2020-2023 and gives an outlook to the possible work topics to be addressed in the next cycle 2024-2027. Due to the new PIARC approach in this cycle to have more and earlier outputs, TC4.4 will deliver in total 13 outputs until the end of 2023. Current topics include: Increasing resilience of tunnels, management of urban and heavily trafficked tunnels, impact of new propulsion technologies on tunnel operation and safety, ITS in tunnels, update of the online Road Tunnel Manual, updating and improving of the DG-QRAM Software, organization of the 2nd International Conference on Road Tunnels Operation and Safety and organization of two International Seminars in Low- and Medium-Income Countries (LMIC).

LOS FUTUROS RETOS DE LA SEGURIDAD Y LA EXPLOTACIÓN DE LOS TÚNELES DESDE LA PERSPECTIVA DEL COMITÉ DE TÚNELES DEL PIARC

Este documento presenta los resultados del comité de túneles de carretera de la PIARC del actual ciclo de trabajo 2020-2023 y ofrece una perspectiva de los posibles temas de trabajo que se abordarán en el próximo ciclo 2024-2027. Debido al nuevo enfoque de la PIARC en este ciclo de tener más y más tempranos resultados, el TC4.4 entregará en total 13 resultados hasta el final de 2023. Los temas actuales incluyen: Aumento de la resiliencia de los túneles, gestión de los túneles urbanos y con mucho tráfico, impacto de las nuevas tecnologías de propulsión en la explotación y seguridad de los túneles, STI en los túneles, actualización del Manual de Túneles de Carretera en línea, actualización y mejora del Software DG-QRAM, organización de la 2ª Conferencia Internacional sobre Explotación y Seguridad de Túneles de Carretera y organización de dos Seminarios Internacionales en Países de Renta Baja y Media.

LES DÉFIS FUTURS DE LA SÉCURITÉ ET DE L'EXPLOITATION DES TUNNELS DU POINT DE VUE DU COMITÉ DES TUNNELS DU PIARC

Ce document présente les résultats du comité des tunnels routiers de l'AIPCR pour le cycle de travail actuel 2020-2023 et donne un aperçu des thèmes de travail possibles pour le prochain cycle 2024-2027. En raison de la nouvelle approche de l'AIPCR dans ce cycle, qui consiste à obtenir des résultats plus nombreux et plus précoces, le TC4.4 fournira au total 13 résultats jusqu'à la fin de 2023. Les sujets actuels incluent : Augmentation de la résilience des tunnels, gestion des tunnels urbains et à fort trafic, impact des nouvelles technologies de propulsion sur l'exploitation et la sécurité des tunnels, ITS dans les tunnels, mise à jour du manuel en ligne sur les tunnels routiers, mise à jour et amélioration du logiciel DG-QRAM, organisation de la 2e conférence internationale sur l'exploitation et la sécurité des tunnels routiers et organisation de deux séminaires internationaux dans les pays à revenu faible et moyen.

1. INTRODUCTION

The World Road Association PIARC is an international, non-political, non-profit organization, established in 1909. The mission of PIARC is to promote international cooperation on issues related to roads and road transport. Since more than 100 years PIARC continues to foster and facilitate global discussion and knowledge sharing on roads and road transport. The Association now boasts 122 government members worldwide and retains consultative status to the Economic and Social Council of the United Nations. The main objective of PIARC is to facilitate exchange of knowledge on roads and road transport policy and practices within the context of integrated, sustainable transport. PIARC is worldwide acknowledged for the quality of its outputs. The work within PIARC is organized in Technical Committees (TC) which are regularly nominated for a working period of 4 years (so-called work cycles). PIARC's tunnel committee is one of the oldest and one of the largest committees in PIARC. During the past decades the TC Tunnels has produced

- a total of approximately 48 technical reports, covering all matters relating to the operation of road tunnels: geometry, equipment and maintenance, operating, safety and environment,
- numerous articles in PIARC's quarterly magazine Routes/Roads,
- a comprehensive Online Tunnel Manual and
- many more contributions to international events.

Work topics for the TC's are defined in the 4-years Strategic Plan (SP) [1]. The SP for the cycle 2020-2023 includes a new structure of PIARC Technical Committees and task Forces (Figure 1). TC 4.4 Tunnels is part of the Strategic Theme 4 "Resilient Infrastructure".

Strategic Theme 1 Road Administration	Strategic Theme 2 Mobility	Strategic Theme 3 Safety and Sustainability	Strategic Theme 4 Resilient Infrastructure
TECHNICAL COMMITTEES			
TC 1.1 Performance of Transport Administrations	TC 2.1 Mobility in Urban Areas	TC 3.1 Road Safety	TC 4.1 Pavements
TC 1.2 Planning Road Infrastructure and Transport to Economic and Social Development	TC 2.2 Accessibility and Mobility in Rural Areas	TC 3.2 Winter Service	TC 4.2 Bridges
TC 1.3 Finance and Procurement	TC 2.3 Freight	TC 3.3 Asset Management	TC 4.3 Earthworks
TC 1.4 Climate change and resilience of Road Network	TC 2.4 Road Network Operation/ITS	TC 3.4 Environmental Sustainability in Road Infrastructure and Transport	TC 4.4 Tunnels
TC 1.5 Disaster management			
CROSS-CUTTING COMMITEES			
Terminology Committee			
Road Statistics Committee			
RESPONSE TEAM			
PIARC Covid-19 Response Team			
TASK FORCES			
TF 1.1 Well-Prepared Projects	TF 2.1 New mobility and its impact on road infrastructure and Transport	TF 3.1 Road Infrastructure and Transport Security	TF 4.1 Road Design Standards
TF 1.2 HDM-4	TF 2.2 Electric Road Systems		

Figure 1: New PIARC Structure according to 2020-2023 Strategic Plan (SP)

The TC 4.4 Tunnels has currently 150 members (including associated members to the working group) representing 37 countries around the world. The work is organized in biannual TC meetings, 4 thematic working groups (WG) and 3 smaller Task Forces (TF) (Figure 2).

Working Groups (WG) cycle 2020-2023	Responsible for Topic (according to the SP)
WG 1 "Sustainable Operations and Maintenance"	4.4.2
WG 2 "Safety and Resilience"	4.4.1
WG 3 "ITS in Tunnels"	4.4.4
WG 4 "New Propulsion Technologies & Ventilation"	4.4.3
Task Force "Knowledge Management / Tunnel Manual"	4.4.5
Task Force "2nd International Conference"	4.4.6
Task Force DG-QRAM	4.4.7

Figure 2: Working Groups and Task Forces in TC4.4 Tunnels

2. CURRENT ACTIVITIES IN THE 2020-2023 PIARC WORK CYCLE

In the following subchapters the planned activities and first results already achieved in the 2020-2023 work cycle are discussed. For detailed information and the free download of already published outputs please refer to the PIARC website (www.piarc.org).

2.1. Measures for increasing resilience of tunnels (topic 4.4.1)

The activities and outputs in relation to the topic "Measures for increasing the resilience of tunnels (4.4.1)" focus on increasing the resilience of a tunnel system, i.e. measures to increase the availability of the tunnel for users and measures to increase the robustness of the tunnel system. A "tunnel system" is defined as the system that consists of e.g. the road (in and nearby the tunnel), the tunnel construction, the tunnel technical installations, including the control systems / control center from which the tunnel is operated, etc. All these elements work together as a system to assure the safety and availability for the tunnel users, at a certain designated service level (based on requirements set by the tunnel manager). Hence, the integrated performance of all these elements defines the resilience of the tunnel system.

As a first output a comprehensive Literature Review Report "Improving Road Tunnel Resilience, considering Safety and Availability (2021LR01EN)" [2] was produced by WG2. In the report more than 100 literature sources on road tunnel resilience, including more general literature on resilience principles or aspects that could be applied to tunnels, were reviewed and the results were synthesized. Many definitions for "resilience" were found, but the Working Group decided on the following definition in the context of tunnels:

"The ability to prepare and plan for, absorb, recover from, or more successfully adapt to actual or potential negative effects of events or developments affecting the availability of a road tunnel. In this context, an acceptable safety level is a mandatory constraint for the availability of the road tunnel".

The literature review focusses on the following topics:

- General concepts and approaches for resilience management;
- Legislation, standards, strategies and policies;
- Criteria and requirements for resilience, availability and safety as a mandatory constraint;
- Various events and future developments to be resilient for, like weather conditions, climate change and other natural hazards like earthquakes and flooding, traffic incidents and traffic developments,

calamities like fire, physical and cyber-security incidents, failure of technical or operational safety measures, including pandemics threatening the availability of the tunnel staff, maintenance and refurbishment works and technical and social developments like SMART mobility and the growing use of new energy carriers for vehicles;

- Possible measures to improve road tunnel resilience for these events;
- Organizational and managerial aspects of resilience improvement.

The report is completed with conclusions and recommendations (for decision makers and for PIARC), an extensive reference list, a glossary and appendices.

The literature review is the first step in the development of a full technical report on road tunnel resilience. The second step is a briefing note including 18 case studies on tunnel resilience collected from 12 countries world-wide. The collection of case studies in the briefing note covers the wide range of resilience topics and aspects mentioned above, thus providing valuable insight in current practices worldwide. Included are cases from Australia, Austria, Belgium, France, Germany, Italy, Japan, The Netherlands, South Africa, South Korea, Spain, Switzerland and The United Kingdom. The briefing note including collection of case studies "Improving Road Tunnel Resilience, considering Safety and Availability (2022R04EN)" [3] has been published in March 2022. The last and final output on the topic of tunnel resilience will be a full technical report which will include a practical road map to manage and improve resilience, "measure sheets" with assessment of effectiveness and cost-effectiveness of various resilience measures with main focus on recovery and recommendations for the target group. The publication of this final output on the resilience topic is foreseen for end of 2023.

2.2. Best practices in management particularly in of urban and heavily trafficked tunnels (topic 4.4.2)

In the past years numerous technical equipment has been installed in road tunnels. The maintenance of this equipment is increasingly complex and has become an important issue. This is notably the case in urban tunnels or tunnels with heavy traffic (i.e. high traffic volume) where accessing equipment and conducting road works while the tunnel is open to traffic can be particularly challenging.

The aim of the case study collection report (2022R06EN) [4] is to gather, evaluate and comment on international expertise related to maintenance and traffic management in highly trafficked urban road tunnels. A large number of cases were collected, which were particularly suitable for providing an insight into the implementation of these special requirements for urban road tunnels. It became apparent that it was useful to divide the cases into 3 categories, which pursued similar goals:

- Implementation of the "quick responders" concept with different approaches,
- Measures to organize work and to reduce nuisance to users during the renovation of tunnels,
- New tools for maintenance and operation.

The quick responder's approach is generally considered to be an appropriate measure. However, local requirements must be carefully considered. Specially equipped motorcycles are recommended as suitable responding vehicles. In the second category, various approaches are possible, and these should be tailored as closely as possible to the renovation project in question. Public information campaigns can be just as important as technically sophisticated traffic guidance installations and design adaptations. Probabilistic approaches, e.g. on the basis of the RAMS ISO-standard (reliability, availability, maintainability, safety), can be used to take failure probabilities into account. Such methods are already in use in some cases, but are particularly effective if the methodology can already be deployed during the initial design and construction phase. The final output in this work topic will be a full technical report including recommendations in the fields of traffic, operation maintenance, equipment and refurbishment strategies. The publication is foreseen by end of 2022.

2.3. Impact of new propulsion technologies on road tunnel operations and safety (topic 4.4.3)

Alternative propulsion technologies, including battery-electric vehicles, are becoming more prevalent. Whilst such vehicles remain a small overall proportion of the vehicle fleet, the combination of impacts of government policy and technological advances in alternative fuels is expected to accelerate their increase in numbers on the road and in tunnels in coming years. There may also be particular initiatives in certain geographical areas, such as on airport land for example, where higher proportions of alternatively fuelled vehicles are seen sooner than on the open road.

As a result of these changes, the nature of tunnel safety risk (including from fire) is expected to change with time, and detailed consideration of the risk of significant incidents involving such vehicles is required. This should include the evaluation of incident consequences with particular attention paid to fire characteristics and toxic emissions and their impact on tunnel users and on emergency intervention strategies.

The first output of WG4 prepared during this cycle is a case study report "Impact of new propulsion technologies on road tunnel operation and safety (2022R05EN)" [5]. The topic has too few incidents to be able to make statistically relevant statements about the effects of accidents with vehicles propelled by new propulsion technologies, commonly called new energy carriers (NEC) on the tunnel design and infrastructure. It is also currently not possible to derive specific instructions from experience gained from incidents of such vehicles. Hence, this report collates currently available information on existing or just finished research programs and highlights the most important findings from these projects. The report also presents findings of a "Webinar on New Energy Carriers in Road Tunnels" organized in cooperation with ITA-Cosuf and KPT (Dutch knowledge platform for tunnel safety).

The final output on this topic will be a full technical report to be published at the end of the work cycle (2023).

2.4. Intelligent Transportation Systems in tunnels (topic 4.4.4)

Regarding Intelligent Transports Systems (ITS), the last few years have seen considerable technological advances in this field. In a road tunnel environment, these systems can have a significant impact on operation and user safety. The objective of this task would be to focus on the impacts of such systems on road tunnel operations and safety. Regarding ITS in tunnels there are a few main issues that needs to be assessed and discussed from a tunnel community perspective:

- Given the very quick development of ITS on open roads, how can service continuity of such systems be guaranteed in the specific context of road tunnels?
- Are there any obstructions for the development of ITS in current tunnels that should be dealt with?
- What changes do we expect in terms of required safety and traffic management systems in a tunnel: what systems could possibly be deleted (under which conditions) and what new systems do we need (under what conditions)?
- What are the tunnel community's expectations with regard to these ITS: safety distance control, lane departure warning systems (LDWS), heavy vehicle guidance systems, vehicle localization and counting systems, identification of hazardous goods vehicles, etc.
- More generally speaking, how can these ground-breaking systems improve user safety in road tunnels?

The objective of WG3 is to prepare a full technical report answering these questions.

2.5. Update of the Tunnels Manual (topic 4.4.5)

The Online Road Tunnels Manual is primarily aimed at developing countries with little or no tunnel culture and provides a wealth of information for tunnel operators, builders or designers and tunnels owners (administrations). All Working Groups of TC D.5 have undertaken considerable work during the 2016-2019 cycle to restructure the existing Road Tunnels Manual. The new structure respects the common overall structure of all PIARC manuals. The new version of the Manual, published in 2019, contains 4 tool pages and 4 main chapters or "books":

- Strategy and General Design (26 web pages)
- Safety (30 web pages)
- Equipment and Systems (38 web pages)
- Operation and Maintenance (33 web pages).

The new (2019) version of the Manual contains 131 web pages, whereas the previous version contained 77 web pages. Its content has been considerably enriched with new topics, numerous new figures and tables and over 300 hyperlinks to PIARC Technical Reports on road tunnel operations or to various tunnel-related regulations.

During the last cycles the TC on Road Tunnel Operations has produced a total of approximately 48 technical reports plus many R/R articles and special issues. In the current work cycle some reports are also already published [2, 3, 4, 5]. The main added value of the Online Tunnel Manual is to incorporate and disseminate this information through an electronic document currently published in a new (2019) version, so as to reach the widest possible audience. The current version of the online Tunnel Manual is available in English and Spanish. The French translation is also finished and the updated pages will be uploaded soon.

The update of the Tunnel Manual will be managed by a Task Force with the support of all Working Groups of TC 4.4. The Tunnel Manual is accessible at https://tunnels.piarc.org/.

2.6. Preparation of the 2nd International Conference on Tunnels (topic 4.4.6)

The previous 1st International conference in Lyon (October 2018) was a very successful event. The 2nd PIARC International Conference on Tunnels will be held from 25 to 28 October 2022 in Granada/ Spain. A Task Force with participation of members of TC4.4 is responsible for the preparation of the technical program in closed collaboration with the Spanish National Committee of Road Tunnels and other relevant international organizations in the field of Road Tunnels. Important topics which will be addressed are: New challenges of the tunnels with the 2030 objective, Resilience in road tunnels, Management of urban and high traffic road tunnels, ITS systems and their contribution to improved operations, New vehicle propulsion energies and their impact on tunnels, Risk Analysis, Ventilation and Lighting, Emergency Management and Current state of tunnels and adaptation to the regulations. More information about the event, the draft program and registration is available at https://www.piarc-tunnels-spain2022.org/.

2.7. Support for updating and improving of DG-QRAM (topic 4.4.7)

The Dangerous Goods Quantitative Risk Assessment Model, known as "DG-QRAM" is a software tool, which enables its users to perform a specific risk analysis for dangerous goods transport.

Since the release of this software, 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 (dangerous goods regulations).

In the 2016-2019 work cycle the tool was updated to make it compatible with more recent versions of the software that it is based on. Thanks to initial financial contributions provided by 8 funding countries, the updated version of the software tool is available for sale on PIARC website. User training sessions were organized for both expert users and new users. In the current work cycle a further upgrade of the tool, based on feedback of users, is in progress. Preliminary results and more information on the tool were communicated in an International Webinar which was organized by the responsible Task Force in June last year. The presentations and a video are available on PIARC website. It is expected that the upgraded DG-QRAM software will be finalized at the end of the work cycle (2023).

2.8. PIARC Tunnel events

In the current work cycle several events have already been organized by TC4.4:

- International Webinar on „Road Tunnel: Recent Trends, Innovations and Way Forward" streamed from Delhi / India (5 – 6 May 2021),
- Worldwide webinar on the DGQRAM software "A dangerous goods transport risk assessment tool that is being upgraded!", streamed from Lyon / France (23 June 2021),
- Webinar on "New Energy Carriers in Road Tunnels" streamed from Utrecht / The Netherlands (20 – 21 Oct. 2021),
- Technical workshop on road tunnels at 34th Japan Road Conference (4 Nov 2021),
- Technical Session R14 „Increasing Resilience of Tunnels" at the virtual 16th World Winter Service and Road Resilience Congress (9th Feb. 2022),
- World Road Tunnels Seminar, Medellín / Colombia (29th March – 1st April, 2022),
- Several contributions to conferences where PIARC is co-organizer like 10th International (virtual) Conference 'Tunnel Safety and Ventilation' (1 – 3 Dec. 2020), 3rd International Polish Tunnel Forum (3 – 4 Feb. 2021).

The most important upcoming events are:

- GTFE/PIARC France Conference on Tunnel Asset Management, 2 June 2022, Lyon / France (https://www.gtfe.fr/evenements/la-conference-du-gtfe-piarc-france/),
- 2nd PIARC International Conference on Road Tunnel Operations and Safety, 25 – 28 October 2022 – Granada / Spain (https://www.piarc-tunnels-spain2022.org/),
- PIARC International Seminar "Advances in Design, Construction and Maintenance of Tunnels", 20 – 22 April 2023 – Delhi & Dehradun / India,
- 27th World Road Congress, 2 – 6 October 2023, Prague / Czech Republic (https://www.wrc2023prague.org/).

3. PLANNED ACTIVITIES FOR THE 2024-2027 WORK CYCLE

For the next PIARC work cycle some of the topics from the current cycle will remain, like continuous updating of the Online Tunnel Manual, preparation of the 3rd International Conference on Road Tunnel Operation and Safety and organization of Seminars in low- and middle-income countries as well as other workshops, webinars and conferences.

Regarding the work topics of the working groups (Figure 2) it is expected that the topic of Road Tunnel Operation and Safety Issues related to the Usage of New Energy Carriers (NEC) in Road Vehicles (topic 4.4.3, Figure 2) will also be relevant for the next cycle as this topic is very dynamic and there are a lot of new developments expected in the coming years. Especially consequences of incidents with NEC vehicles in road tunnels on users' safety are still an open question as these events are very rare so far and information is often not compiled by tunnel operators separately from conventional propelled vehicles. A task of PIARC could be to gather and analyze information on incidents with NEC vehicles internationally. Also, the topic ITS in tunnels (topic 4.4.4, Figure 2) might continue in the next cycle, because also here is a lot of dynamic in the developments. Especially the impact of autonomous vehicles on tunnel safety, user evacuation and rescue concepts might be of significant interest. Also, the use of IOT-Data like data from vehicle to infrastructure communication (C2I) could be very relevant for further improved safety management and tunnel operation.

Another new topic for the next work cycle could be "Digitalization of Road Tunnel Design and Management". Several countries are in the process of implementing Building Information Modeling (BIM) to improve road tunnels management at different stages of a tunnel's life cycle. Best practices on this subject need to be collected and shared internationally in order to make recommendations to support countries in realizing the benefits of BIM for management of tunnels. The implementation of BIM or the digitalization process in the context of renovation projects, construction of new tunnels, installation of new tunnel systems and equipment, tunnel maintenance and inspections. These types of projects make it feasible to improve access to the database of tunnel design and operation information, efficiency in the design and management of tunnel assets as well as tunnel safety. A focus could be on the digitalization of tunnel management in the life cycle, especially on the operational stage of a road tunnel. In additional to the application of BIM, there are also other digitalization efforts of particular interest, e.g. the use of digital twins for life cycle management, the support of fast and smooth commissioning of a new or renovated tunnel and its equipment or the use of digital twins in the training of tunnel control center staff, first responders and stakeholder's management.

All new topics mentioned in this chapter are only preliminary, as they are still to be discussed in the next meetings of TC4.4 and at the 2nd International Conference in Granada. It is planned to have the new topics finalized by end of this year / beginning of 2023.

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Since 1957, date of creation by PIARC of the "Committee on Road Tunnels", the Association has conducted an ongoing activity on all matters relating to the operation of road tunnels: geometry, equipment and maintenance, operating, safety and environment. All outputs are available online (free download) on the PIARC website. In the current work cycle several outputs have already been completed and published on the PIARC website [2 – 5]. A large number of successful events have been organized in the first 2 years of the current work cycle. A number of important tunnel conferences and seminars will follow until the end of the work cycle in 2023.

There will be continuous publications on the PIARC website during the next years because not only full technical reports are published but also intermediate deliverables like a literature review, a collection of case studies or a briefing note. Please visit the PIARC website regularly to stay updated. Anyone interested in contributing to the topics mentioned above is cordially invited to participate in TC 4.4.

New topics for the next work cycle (2024 – 2027) will probably include Digitalization of Road Tunnel Design and Management and further work on Road Tunnel Operation and Safety Issues related to the Usage of New Energy Carriers (NEC) in Road Vehicles as well as on ITS in tunnels. Some of the topics from the current cycle will remain, like continuous updating of the Online Tunnel Manual, preparation of the 3rd International Conference on Road Tunnel Operation and Safety and organization of Seminars in low- and middle-income countries as well as other workshops, webinars and conferences.

5. REFERENCES

[1] PIARC (2020). Strategic Plan 2020-2023. https://www.piarc.org/en/PIARC-Association-Roads-and-Road-Transportation/strategic-plan.

[2] PIARC Technical Committee 4.4 (2021). Literature Review Report: Improving Road Tunnel Resilience, considering Safety and Availability. PIARC Ref.: 2021LR01EN, https://www.piarc.org/en/.

[3] PIARC Technical Committee 4.4 (2022). Briefing Note including Collection of Case Studies: Improving Road Tunnel Resilience – Considering Safety and Availability. PIARC Ref.: 2022R04EN, https://www.piarc.org/en/.

[4] PIARC Technical Committee 4.4 (2022). Case Study Report: Maintenance and Traffic Operation of Heavily Trafficked (Urban) Road Tunnels. PIARC Ref.: 2022R06EN, https://www.piarc.org/en/.

[5] PIARC Technical Committee 4.4 (2022). Case Study Report : Impact of New Propulsion Technologies on Road Tunnel Operations and Safety. PIARC Ref.: 2022R05EN, https://www.piarc.org/en/.

TÚNELES DE FUTURO. OBJETIVO 2030

Rafael López Guarga
Ingeniero Jefe de la Demarcación de Carreteras del Estado en Aragón
Presidente del Comité técnico de túneles de la ATC
Secretario hispanohablante del Comité TC 4.4 de PIARC

Para el proyecto de los nuevos túneles y la rehabilitación de los existentes habría que tener en cuenta los siguientes parámetros: transición ecológica, digitalización e integración, mejora de la funcionalidad, resiliencia y mejora de la disponibilidad, sostenibilidad, nuevas energías de propulsión, vehículos conectados y nuevas tecnologías.

El proyecto de los túneles de carretera puede llevarse a cabo bien mediante un enfoque prescriptivo o bien mediante un enfoque basado en el riesgo, precisándose en este segundo caso una evaluación del riesgo.

Para garantizar un buen mantenimiento, funcionalidad y adecuada explotación de los túne-les, al objeto de mantener el túnel disponible con un nivel de seguridad aceptable es necesa-rio reducir la complejidad en la gestión y mejorar la eficiencia para así también reducir los costes. Debe tenderse a una Gestión Centralizada mediante plataformas superiores abiertas, se debe avanzar en la modernización de los distintos equipamientos, hay que revisar la venti-lación analizando los algoritmos, y se debe aplicar la tecnología Led para obtener un ahorro de energía, mayor vida útil, durabilidad y ahorro de costes, incluyendo sistemas de control de flujo.

La exigencia de mejora en la gestión exige la optimización de la información en bases de da-tos accesibles por lo que es irreversible utilizar sistemas de gestión del mantenimiento asisti-do por ordenador utilizando programas que gestionan inventarios con almacenes, partes de trabajo y pedidos, entradas y salidas de material, valoraciones económicas e incluso la pro-gramación de tareas. La culminación de este proceso serán las ventajas y oportunidades que ofrece la modelización BIM. Todo ello influirá también en la mejora de las características y funcionalidades de la obra civil.

Finalmente, se hace referencia a que la movilidad del futuro será eléctrica, automatizada, conectada y compartida, debiéndose avanzar en el campo de la conectividad entre vehículos y los diferentes modos de transporte, avanzando por otra parte en la aplicación de nuevos sistemas de propulsión de vehículos: eléctricos con baterías, gas natural comprimido y gas natural licuado, eléctricos con depósito de hidrógeno, biodiesel y etanol, híbridos (combus-tible y eléctricos), …

TUNNELS OF THE FUTURE. TARGET 2030

Design of new tunnels and refurbishment of existing ones should consider the following cri-teria: ecological transition, digitization and integration, improved functionality, resilience and improved availability, sustainability, new propulsion energies, connected vehicles and new technologies.

Design of road tunnels can be conducted either by a prescriptive approach or through a risk-based approach, the latter requiring a risk assessment.

To ensure appropriate maintenance, functionality, and operation of the tunnels, in order to guarantee an available tunnel with an acceptable safety level, it is necessary to reduce the complexity of the management and improve the efficiency to also achieve cost reduction. To do so, it is possible to adopt Centralized Control Centers based on open-source high level platforms, upgrade of the different tunnel systems, overview the performance of the venti-lation system by analyzing the algorithms and apply LED technologies and lighting control sys-tems, which allow a reduction of the energy costs, larger life cycle and durability.

The required improvement in the tunnel management can be achieved through the optimi-zation of the quality of the information in accessible databases that make use of specialized maintenance management software, including warehouse inventories, working timesheets, incoming and outcoming supplies, financial tools, and tasks management. The latest step in this process is BIM modelling which provides huge advantages and opportunities. All the above will also have an influence in the improvement of the performance and characteristics of the related civil works.

Finally, the paper refers to the new challenges related to the future mobility framework which will be electric, autonomous, connected, and shared, which requires larger advances in the fields of connectivity among vehicles and different transport means, with progress in the application of new vehicle propulsion systems: electric with batteries, compressed and lique-fied natural gas, fuel cell electric vehicles, biodiesel and ethanol, hybrid (fuel and electric), ...

LES TUNNELS DU FUTUR. OBJECTIF 2030

Pour le projet des nouveaux tunnels et la réhabilitation des tunnels existants, il faudrait tenir compte des paramètres suivants : transition écologique, numérisation et intégration, amélio-ration de la fonctionnalité, résilience et amélioration de la disponibilité, durabilité, nouvelles énergies de propulsion, véhicules connectés et nouvelles technologies.

Le projet des tunnels routiers peut être mené à bien soit par une approche prescriptive, soit par une approche basée sur le risque, avec, dans ce deuxième cas, la nécessité d'une évalua-tion du risque.

Pour garantir un bon fonctionnement, la fonctionnalité et une exploitation adéquate des tunnels, afin de maintenir le tunnel disponible avec un niveau de sécurité acceptable, il est nécessaire de réduire la complexité de la gestion et d'améliorer l'efficacité pour ainsi réduire également les coûts. Il faut tendre vers une Gestion Centralisée grâce à des plateformes supérieures ouvertes, il faut avancer dans la modernisation des différents équipements, réviser la ventilation en analysant les algorithmes et appliquer la technologie Led pour obte-nir une économie d'énergie, une durée de vie supérieure, une durabilité et une économie des coûts, y compris des systèmes de contrôle de flux.

L'exigence d'amélioration de la gestion passe par l'optimisation de l'information dans des bases de données accessibles, il est donc irréversible d'utiliser des systèmes de gestion de la maintenance assistée par ordinateur en utilisant des programmes qui gèrent les inventaires avec les entrepôts, les rapports de travail et les commandes, les entrées et sorties de maté-riel, les estimations économiques et même la programmation des tâches. Le point culminant de ce processus réside dans les avantages et les opportunités qu'offre la modélisation BIM. Tout cela influencera également l'amélioration des caractéristiques et des fonctionnalités du génie civil.

Enfin, il est fait référence au fait que la mobilité du futur sera électrique, automatisée, con-nectée et partagée, et que des progrès doivent être réalisés dans le domaine de la connecti-vité entre véhicules et les différents modes de transport, ainsi que dans l'application de nou-veaux systèmes de propulsion des véhicules : électriques avec batteries, gaz naturel com-primé et gaz naturel liquéfié, électriques avec réservoirs d'hydrogène, biodiesel et éthanol, hybrides (carburant et électriques), ...

1. INTRODUCCIÓN

Para los futuros proyectos de túneles así como para la explotación de los mismos, incluso para los ya existentes, habrá que tener en cuenta los siguientes parámetros: transición ecológica, digitalización e integración, mejora de la funcionalidad, resiliencia y mejora de la disponibilidad, sostenibilidad, nuevas energías de propulsión, vehículos conectados y nuevas tecnologías, formando parte todo ello de una Estrategia de Movilidad segura, sostenible y conectada.

En general los túneles se proyectan para que las vías de comunicación puedan salvar orografías abruptas y cuencas hidrográficas pero muchas veces son motivados por razones ambientales, mejores condiciones de seguridad y comodidad, mejora del tiempo de recorrido y ahorro energético.

2. DIFERENTES ENFOQUES EN EL PROYECTO DE LOS TÚNELES DE CARRETERA

El Proyecto de un túnel de carretera se puede enfocar desde un punto de vista prescriptivo, es decir, un túnel es seguro si su diseño se basa en normativas válidas. Especifica rasgos particulares sobre seguridad y determinadas acciones que deben incluirse en los proyectos y sus diferentes procesos sin considerar las características individuales de cada túnel. Sin embargo también puede establecerse un enfoque basado en el riesgo, es decir, un túnel es seguro si cumple criterios de riesgo predefinidos. Ello permite una evaluación estructurada, armonizada y transparente de los riesgos para un túnel en concreto y la comparación de diferentes medidas de seguridad para obtener las mejores medidas adicionales en términos de reducción de riesgo y / o rentabilidad.

El ámbito normativo para un enfoque prescriptivo es muy amplio y variable para cada país, incluso a veces para cada administración titular del túnel, pero de una manera generalista se podría concretar en:

- RD 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de la Red de Carreteras del Estado (Ministerio de Fomento);
- Directiva Europea 2004/54/CE de 29 abril 2004;
- Normativas de otros países (Francia, Suiza, Austria,…);
- Recomendaciones de PIARC;
- Necesidades de explotación. Evaluación y Diseño.

Para el caso del enfoque basado en el riesgo, los métodos para la evaluación de riesgos pueden ser cualitativos o cuantitativos. Los primeros están basados en la aplicación de estándares predefinidos (juicio de expertos, clasificaciones según la experiencia, etc) mientras que los cuantitativos analizan diferentes escenarios y sus consecuencias, pudiendo ser probabilistas que analizan las consecuencias de unos posibles escenarios mediante la utilización de árboles de sucesos y curvas F/N (Frecuencia / Número de víctimas) o deterministas que analizan escenarios predefinidos por separado, evaluando las consecuencias y adoptando medidas para su mitigación. Por parte de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana se utiliza una metodología cuantitativa denominada MARTE (Metodología de Análisis de Riesgos en Túneles del Estado).

Desde un punto de vista normativo, al objeto de garantizar la seguridad se exigen unos requisitos mínimos en base a unas instalaciones que se pueden clasificar en: básicas, para la mejora de la seguridad y de ayuda al usuario:

- Instalaciones básicas: Iluminación (VSAP), Ventilación Longitudinal y Señalización Variable;
- Instalaciones para la mejora de la seguridad: CCTV, Megafonía en refugios, Postes SOS y de Auxilio, Radiocomunicaciones, Estaciones meteorológicas, Aforos de Tráfico, Detección Incendios, Extinción de Incendios;
- Instalaciones de ayuda al usuario: Hilo de Ariadna, Señalización de distancia de seguridad (balizamiento LED), Refuerzo iluminación y señalización de salidas de escape.

En todos los países se aplica el análisis de riesgo como una herramienta adicional, complementaria a las normas prescriptivas. La experiencia adquirida en la década pasada y los datos obtenidos de incidentes reales y estadísticas se han utilizado para mejorar las metodologías de análisis de riesgos, y viceversa, las metodologías de análisis de riesgos se usan para mejorar las normas prescriptivas.

Por ello, ante los retos futuros, para poder acogerse a las ventajas de las nuevas tecnologías, alcanzar los objetivos fijados para 2030 y disponer de un túnel adaptado a su especificidad, sería muy recomendable revisar el RD 635/2006 e interpretar y probablemente revisar la Metodología MARTE. Ambos documentos son fruto de una época plenamente expansionista y de bonanza económica. La renovación de los túneles ofrece oportunidades para redefinir sus características.

Túnel de Petralba. N-260. Huesca

3. RESILIENCIA

Los túneles, debido a las numerosas medidas de seguridad necesarias para permitir la circulación por ellos en condiciones de seguridad, son algo más vulnerables que los tramos de carretera a cielo abierto en cuanto a su disponibilidad.

Además, un incidente de tráfico o un incendio en el túnel suele requerir mayor tiempo y esfuerzo para normalizar la situación que un tramo de carretera a cielo abierto.

Por ello, en el contexto de los túneles de carretera, la resiliencia podría describirse como la capacidad de mantener el túnel abierto al tráfico en condiciones seguras durante diversas situaciones no previstas, como un incidente de tráfico, fallos técnicos, condiciones meteorológicas adversas, otros peligros naturales o artificiales, durante los trabajos de mantenimiento o renovación y en particular cuando se interrumpe la situación normal.

En resumen, la resiliencia es la capacidad para prepararse, adaptarse y recuperarse ante acontecimientos no previstos al objeto de alcanzar la mayor tasa de disponibilidad posible. Por tanto, la "resiliencia" debe tenerse muy en cuenta en la planificación, proyecto, construcción, explotación y mantenimiento de un túnel.

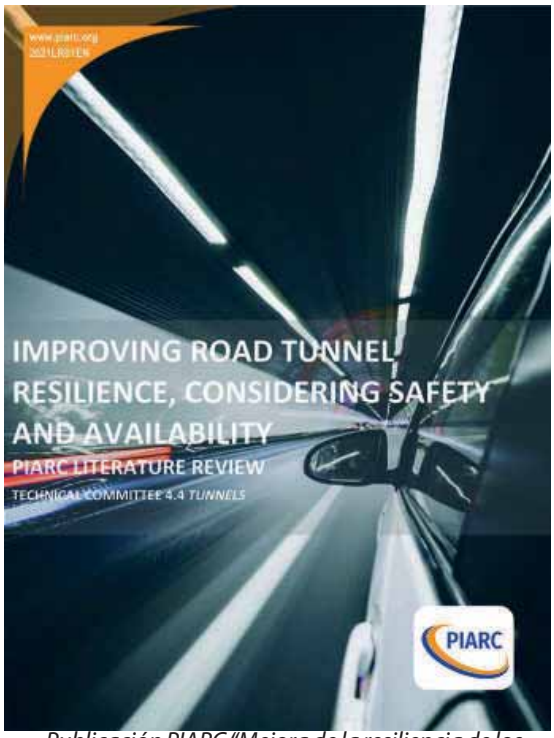
Debe observarse que un nivel de seguridad aceptable supone una limitación para que el túnel esté abierto al tráfico. Si el nivel de seguridad deja de ser aceptable, como resultado de un determinado acontecimiento o incidente, el túnel debe cerrarse. Este cierre del túnel por motivos de seguridad podría evitarse adoptando medidas de seguridad alternativas y temporales que garanticen un nivel aceptable, aunque las medidas de seguridad habituales no estén operativas. Por lo tanto, la capacidad de adoptar medidas alternativas cuando sea necesario es una contribución importante a la resiliencia del túnel. Los criterios para considerar aceptable el nivel de seguridad de un túnel dependen de muchos factores, como la legislación nacional y local y las políticas y prácticas a las que está sujeto el gestor del túnel.

PIARC, centrándose en la funcionalidad principal de un túnel de carretera, propone la siguiente definición de resiliencia de túneles de carretera:

"La capacidad para prepararse, resistir, absorber, recuperarse y adaptarse de la mejor manera a los efectos negativos reales o potenciales de eventos o procesos que afecten a la disponibilidad de un túnel de carretera de manera ágil y eficiente. En este contexto, un nivel de seguridad aceptable es un requisito obligatorio para la disponibilidad de un túnel de carretera".

Por lo tanto la resiliencia es una característica del túnel que no depende de la probabilidad de un evento sino que depende del grado en el que se prevengan o mitiguen los efectos negativos del evento cuando éste se produzca, es decir, no se trata de prevenir el evento sino los efectos que puedan dar lugar a la interrupción de la disponibilidad del túnel.

Se trata de mitigar los efectos que no ha sido posible prevenir, bien en cuanto a su grado de importancia o bien en cuanto a la duración de la interrupción. Se presentan dos posibilidades: la probabilidad de que ocurra un evento que no esté al alcance del titular del túnel (por ejemplo un terremoto que ocurriría de todos modos) o bien la probabilidad de que cuando ocurra el evento los efectos negativos no estén previstos (por ejemplo que el túnel sea dañado por el seísmo porque no se previó en el diseño) lo que sí estaría al alcance del titular. Únicamente esta última probabilidad es resiliencia, no siéndolo la primera aunque afecta a la disponibilidad del túnel.



Publicación PIARC "Mejora de la resiliencia de los túneles de carretera, teniendo en cuenta la seguridad y la disponibilidad"

Se establecen las siguientes categorías de medidas para mejorar la resiliencia de un túnel:

- Medidas para prevenir los efectos negativos sobre la disponibilidad (reducir las probabilidades de fallos);
- Medidas para limitar el grado de los efectos negativos no previsibles sobre la disponibilidad (reducción de las consecuencias de los fallos);
- Medidas para limitar la duración de los efectos negativos no previsibles sobre la disponibilidad (reducir el tiempo de recuperación).

Por tanto, se podría concretar el concepto de resiliente como "la capacidad de mantener el túnel disponible con un nivel de seguridad aceptable en diversas circunstancias, en particular cuando se interrumpe la situación normal".

Sin embargo, a pesar de todo lo antedicho, habría que pensar también en positivo y tener en cuenta por ejemplo la reducción de emisiones que disminuiría la demanda de ventilación y por lo tanto el consumo de energía. ¿Es la seguridad una condición límite estática?. ¿Podría ser una condición límite dinámica dada la vida útil intergeneracional de los túneles y las expectativas cambiantes de seguridad?.

4. TENDENCIAS Y DESARROLLO DE LA PLANIFICACIÓN Y DEL PROYECTO

Este marco del enfoque de los proyectos de túneles, tanto de nueva construcción como de rehabilitación de los existentes, y la necesidad cada vez más apremiante de disponer de unas infraestructuras con mayor seguridad, más cómodas y durables, con menor impacto ambiental y más eficientes desde el punto de vista energético hace que sea imprescindible adaptar la planificación y los proyectos a las nuevas tendencias. En los últimos años la preocupación social se ha centrado principalmente en el medio ambiente, en la contaminación y en el efecto invernadero, aspectos que ahora deben tenerse muy en cuenta y en los que la innovación y la transformación digital han de jugar un papel importante, analizando y estudiando cuestiones que van desde la resiliencia hasta la aplicación del Big Data.

Teniendo en cuenta estas premisas y haciendo referencia a las instalaciones que se consideran básicas se establecen los siguientes objetivos:

4.1. La ventilación como sistema de seguridad

A la hora de proyectar un sistema de ventilación el factor más importante a tener en cuenta es el de la Seguridad, tanto en lo referente a la salud de los usuarios como en caso de incendio, que hace que sea imprescindible mantener los niveles de contaminantes (CO2, NOx) bajo un límite determinado, garantizar la correcta evacuación de los usuarios en condiciones estables para la vida humana y permitir que los servicios de bomberos puedan realizar su trabajo de extinción.

Para ello se hace necesaria la revisión de las potencias de incendio (30, 100, 200 MW) y la combinación de sistemas de extracción de humos con sistemas de ventilación longitudinal, en túneles de hasta 6 km de longitud. Así mismo se deben analizar los algoritmos y las pautas ante distintos escenarios al objeto de aumentar su eficacia y reducir el consumo de energía.

Ensayo de incendio. Fuente fotográfica: ALVAC

Por otra parte se recomienda la utilización de herramientas de análisis de dinámica de fluidos y de modelización del fuego para estimar y analizar las consecuencias.

En cuanto a las emisiones, en la actualidad los requerimientos son cada vez mucho más estrictos ya que los valores críticos aceptables se reducen con mayor rapidez que la capacidad de desarrollo tecnológico de la industria automovilística. Por otra parte no se progresa adecuadamente en minimizar la polución, especialmente en zonas urbanas y los sistemas de filtrado, si existen, no reducen a límites aceptables el nivel de gases y partículas peligrosas (filtros electrostáticos).

Sin embargo, a este respecto, los medios de comunicación muy frecuentemente nos sorprenden con noticias del tipo: uno de los fabricantes de coches más influyente se ha comprometido a no producir vehículos diesel en los próximos 15 – 20 años, ya que se prevé que no puedan circular por grandes ciudades en el 2025 o con impuestos muy altos. Este panorama traerá como consecuencia que el consumo de diesel caiga notablemente y por tanto también la producción de NO, NOx y partículas. Además, cada día veremos más coches eléctricos con lo que mejorará la calidad del aire y se espera que la naturaleza del riesgo de seguridad en los túneles, incluido el de incendio, cambie con el tiempo.

4.2. Plataformas de control e industria 4.0

El mundo en el que estamos es el de la Transformación Digital e Industria 4.0 que afecta a todos los sectores y también a los túneles.

La Transformación Digital consiste en un círculo virtuoso que permite que desde que se implanta la digitalización es posible ampliar la capacidad, mejorar la disponibilidad y resiliencia, alcanzar una mayor integración y mejorar la funcionalidad.

Ha habido una evolución de las máquinas a la electricidad, computadoras e inteligencia artificial, de modo que con la Transformación Digital e Industria 4.0 hay unas Tecnologías Habilitadoras, tales como las Redes Multiservicio, que dan cobertura al Internet de las cosas, a la evolución del 5G, que llegará, y a los sistemas inteligentes de ayuda a la decisión, ya existentes, que emplean tecnologías de inteligencia artificial con algoritmos muy bien diseñados. En el centro de todo ello, como gran herramienta capacitadora, están las Plataformas de gestión de tecnología abierta.

Transformación digital e Industria 4.0. Evolución

En los túneles, ¿qué queremos hacer con estas Plataformas?. Por un lado debe reducirse la complejidad de la gestión, mejorando la eficiencia a partir de sistemas de control profundamente integrados, y por otro debe alcanzarse la excelencia en la explotación y simultáneamente reducir costes con el apoyo del análisis sistemático de los datos recogidos. Finalmente debe maximizarse la eficiencia permitiendo la colaboración con terceros.

Hacia el modelo de Industria 4.0

Para ello es preciso realizar un proceso de reflexión bastante largo y establecer una hoja de ruta sobre cuál debe ser el modelo y la evolución del túnel hacia la Industria 4.0, comenzando, creciendo y teniendo la capacidad de optimizar. En este marco, la Plataforma abierta es la base idónea que permite establecer el círculo virtuoso anteriormente citado de la Transformación Digital y traer al terreno de los túneles cosas que no están diseñadas de forma específica para ello pero que funcionan bien en otros campos. Sin embargo hay que tener cuidado en cómo se incorporan, sin renunciar a esta posibilidad, y ante el elevado número de proveedores poder huir de la dependencia de uno concreto.

¿Qué se entiende por Plataforma abierta?. Se trata de un software comercial, de una base tecnológica comercial que puede ser suministrada, instalada y puesta en marcha por distintos proveedores. Permite su modificación y el desarrollo de módulos para la integración de dispositivos distintos a los actuales o futuros (nuevos elementos, nuevas pautas de funcionamiento, nuevas instalaciones) independientemente del proveedor que haya intervenido inicialmente.

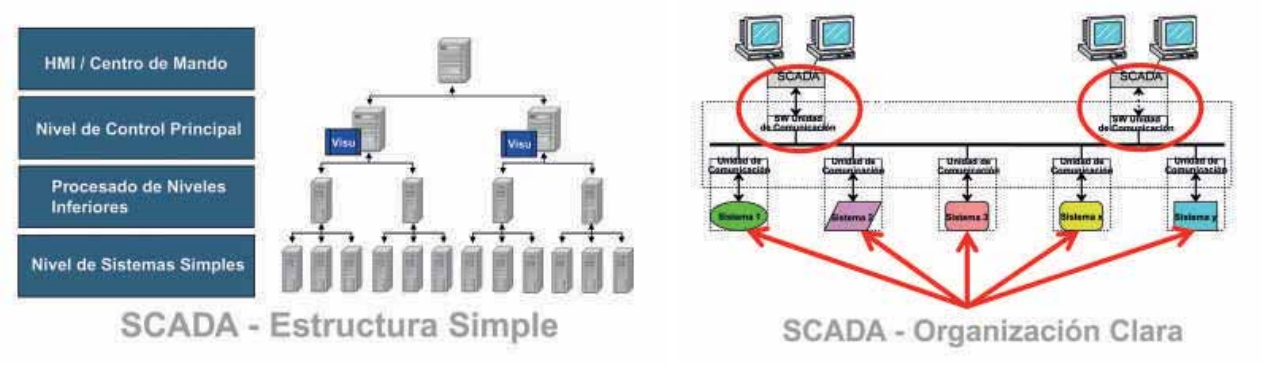
La apertura se puede plasmar de diversas maneras mediante: módulos configurables, mediante la disponibilidad de APIs (Aplication Program Interface) o SDKs (Software Develope Kit) y mediante la entrega del código fuente de los Programas para disponer de herramientas de adaptación a necesidades concretas.

Centro de Control de Monrepós (Huesca). A-23

En definitiva se trata de una Plataforma elaborada a partir de tecnologías y softwares comerciales universalmente disponibles para los desarrolladores e integradores. En el mercado hay varios Players muy potentes que vienen de empresas de equipamiento eléctrico.

Por tanto hoy en día hay que huir de Centros de Control no integrados y tender a otros más modernos e integrados mediante sistemas SCADA que permitan la gestión integral de distintos túneles actuando sobre el conjunto de subsistemas de forma que se pueda llevar el control de forma automática. Es decir, deben diseñarse Plataformas Superiores que integren otras locales.

Estas Plataformas deben garantizar la Seguridad en la Gestión Centralizada y deben de integrar los equipamientos e instalaciones de todos y cada uno de los túneles. Deben disponer de una Estructura Simple y de una Organización Clara mediante un solo Centro de mando con un nivel de Control Principal que permita el Proceso de diferentes niveles inferiores de modo que al final el sistema sea único.



4.3. Normalización

Por regla general, cuando se construyen infraestructuras del tipo túnel de carretera, aunque éstas sean de una determinada titularidad se ejecutan a través de una empresa contratista que a su vez subcontrata con una gran variedad de proveedores, fundamentalmente en lo que a instalaciones y equipamientos se refiere. Suele ser bastante común el que los Pliegos no siempre definan exhaustivamente los condicionantes que han de cumplir cada uno de los sistemas y subsistemas que constituyen un equipamiento por lo que muchas veces se adjudican los contratos con un criterio fundamentalmente económico al mejor postor, incluso uno diferente para cada una de las instalaciones, lo que hace que en ocasiones se presenten graves problemas de compatibilidad entre unos y otros sobre todo cuando se pretende una integración global en una única plataforma de gestión. Esta compatibilidad, además, debe de ser biunívoca.

Por ello cada uno de los sistemas y subsistemas deben poder ser suministrados, instalados y puestos a punto por distintos proveedores de forma indiferente y deben permitir su modificación y desarrollo de módulos para la integración de dispositivos de distintos proveedores actuales o futuros, siendo aplicable a todos los equipamientos que intervienen en garantizar la seguridad del túnel y facilitar la explotación.

Con este objetivo, en el ciclo 20162019, en el Comité técnico de túneles de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC) se creó un Grupo de Trabajo multiciclo denominado "Normalización" con el objeto de establecer unos documentos sobre las características funcionales de los diferentes equipamientos que garanticen su operatividad y que constituyan unas recomendaciones básicas para su normalización con características y valores concretos que se deberían cumplir. Además se aborda la normalización de la integración en el sistema de control (señales, protocolos, algoritmos, …) para evitar protocolos propietarios entre dispositivos.

Con ello se pretende no limitar el mercado sino precisamente abrir el abanico a todos los proveedores de forma que varios de ellos puedan intervenir en un mismo proyecto, es decir se trata de homogeneizar protocolos y funcionalidades de manera que por parte de los fabricantes se provea de productos "abiertos", integrables y compatibles entre sí.

Se han de redactar Protocolos para la normalización y la definición de las distintas especificaciones que deben cumplir los diferentes equipos y sistemas para que sean compatibles, permitiendo su comunicación entre sí y la Plataforma de Gestión Centralizada independientemente del fabricante. Además pueden servir para que por parte de las Administraciones de Industria se pueda proceder a la Normalización y que por parte de los fabricantes se provea de productos "abiertos".

4.4. Sistemas ITS

Cada vez se hace más necesario, y hay que hacerlo con mayor insistencia, dar al usuario de los túneles y de la carretera en general el mejor servicio posible. Para ello es imprescindible seguir trabajando en ofrecer más seguridad, en fomentar la incorporación de nuevas tecnologías, en facilitar los cambios que puedan venir del sector de la automoción y en completar y mejorar los sistemas ITS aplicados y relacionados con las infraestructuras.

Los Sistemas de Gestión de Tráfico deben ser cada vez más modernos y operativos y en los accesos a las grandes ciudades y centros de producción deben imponerse, casi de forma obligatoria, soluciones de tráfico reversible y de cruce de mediana.

Túnel reversible de Guadarrama (Boca Sur. Madrid). AP-6

Ante el incremento continuo del tráfico y para dar respuesta a las necesidades de aprovechamiento de la capacidad de la infraestructura, los sistemas ITS son capaces de gestionar dinámicamente la circulación, adaptándose en cada momento a circunstancias que puedan devenir, tales como la vialidad invernal, la gestión de incidentes y como se ha dicho la gestión de los accesos y de los carriles reversibles, pudiendo asimismo llegar a gestionar las infracciones.

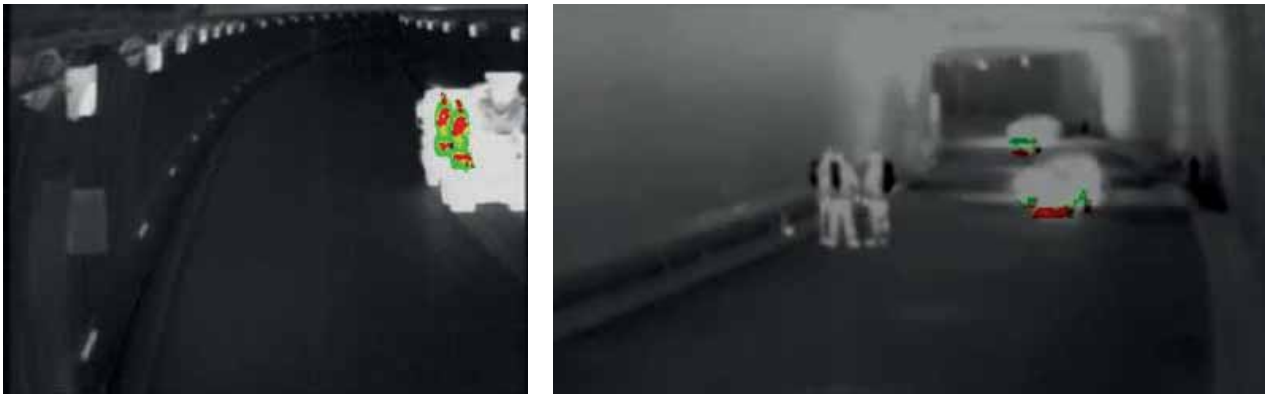
4.5. Control por Cámaras Termográficas

Muchas veces no es posible cumplir todos los condicionantes de la Normativa u otro tipo de medidas recomendadas y a veces no existen suficientes disponibilidades presupuestarias e incluso no hay proveedores adecuados. Por tanto se han de buscar soluciones sostenibles y que su mantenimiento sea viable y económico. En la gestión se han de optimizar los recursos.

Según los Análisis de Riesgo, un túnel es seguro con ventilación longitudinal si se lleva a cabo un control de la corriente de aire y se aplican medidas complementarias. Para ello siempre es bueno mejorar la detección del fuego y la precisión en su localización, no debiéndose permitir errores en el sistema de ventilación que a veces ocurren como consecuencia de la abundancia de falsas alarmas que pueden bloquear los sistemas. En caso de incendio y humo el Centro de Control pierde la visión, dificultando el seguimiento del evento y la Comunicación con los equipos de rescate, debiendo tener en cuenta que en caso de emergencia es fundamental mejorar los tiempos de respuesta.

La Seguridad se puede definir en tres palabras: Detección temprana y precisa del fuego, Observación mediante la Detección Automática de Incidentes (DAI) y Asistencia durante el autorescate en el túnel y a los equipos de socorro, pudiéndose todo ello disponer en una Única Plataforma.

La Detección temprana y precisa del fuego se puede mejorar con un Sistema que envíe en 1 segundo alarmas en situaciones identificadas como previas a una incidencia, pudiendo significar la ocurrencia de un fuego: temperaturas excesivas en transporte de mercancías peligrosas, sobrecalentamiento de instalaciones eléctricas, gradiente de temperatura excesivo en un dispositivo, etc.



Imágenes tomadas por las cámaras térmicas en presencia de humo. Túnel de Petralba. N-260. Huesca

Se pueden establecer 3 Alarmas Térmicas:

- NIVEL TÉRMICO 1: Verde > 65ºC durante 5"
- NIVEL TÉRMICO 2: Amarillo > 90ºC durante 2"
- NIVEL TÉRMICO 3: Rojo > 110ºC durante 1"

Así de este modo, gracias a la ayuda de una detección rápida mediante cámaras térmicas, el túnel se puede cerrar mucho antes, lo que permite minimizar el número de vehículos y personas expuestas.

La observación mediante un Sistema DAI permite detectar: Colas, Objetos perdidos, Vehículos detenidos, Vehículos lentos, Dirección contraria, Peatones, Personas en zonas no autorizadas, …

Por ello gracias al uso de vision infrarroja es posible disponer de visibilidad en condiciones extremas: túnel con humo, niebla, oscuridad absoluta, identificación de vehículos, fuego, personas… Sistema de ayuda al DAI convencional.

9 segundos después de una incidencia con humo

Misma imagen con cámaras térmicas

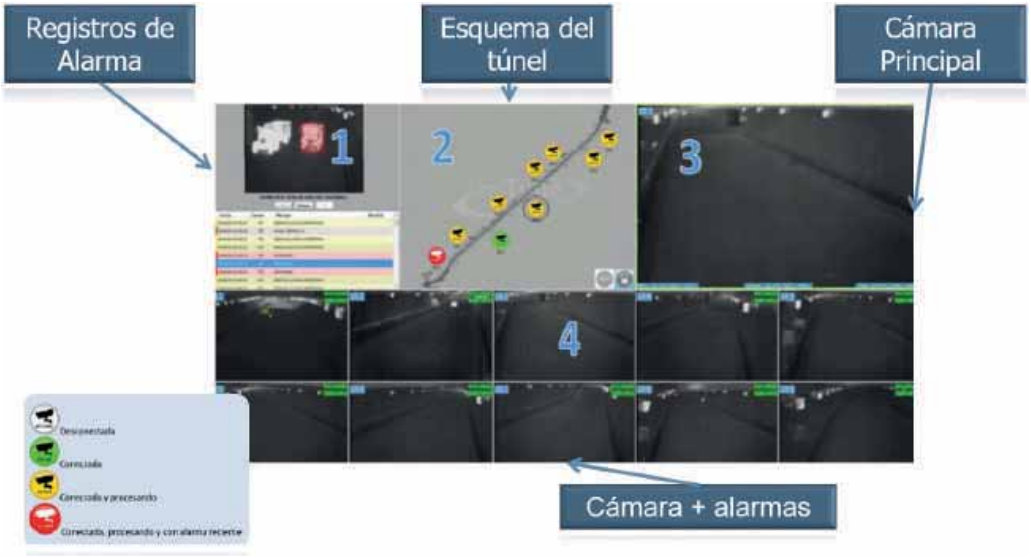
La visión infrarroja permite guiar al personal de emergencias (Bomberos, Protección Civil, etc) desde el Centro de Control.

La localización de personas en el túnel en condiciones de visibilidad cero permite, a través de un Sistema de referencias gráficas, ubicar al personal de emergencias, señalar las rutas de escape, identificar posibles víctimas atrapadas en vehículos, detectar un riesgo de explosion en cadena, etc.

Cámara CCTV normal 8-10 segundos después de un incidente

El mismo incidente con el sistema de asistencia Modelado 3D

Estas cámaras termográficas han resultado ser muy eficaces en la gestión de las emergencias y en el seguimiento de los movimientos de los implicados en un incidente con humo pero hay que seguir investigando sobre ellas, perfeccionándolas, de modo que puedan llegar a ser verdaderas cámaras de un sistema DAI y así evitar duplicidades. También deberían permitir detectar la temperatura de los vehículos a mayores distancias y así evitar la entrada de éstos en el túnel en caso de incumplimiento de los niveles determinados.



Interfaz Gráfico de Usuario

En algunos túneles, como en el de Montblanc y en el de Frèjus, en la frontera francoitaliana, previamente a la entrada se utilizan arcos de detección de temperatura. La gestión del tráfico hace que los camiones no accedan directamente al túnel sino que se desvían y pasan por esos arcos que disponen detectores de calor. Si se supera el umbral establecido en un vehículo no se le permite el paso. Se trata de un sistema de elevado coste y no es del todo eficaz ya que los motores de los camiones cada vez están más protegidos y no siempre es posible detectar un sobrecalentamiento.

Túnel de Fréjus

Túnel de Montblanc

Arcos de detección de temperatura

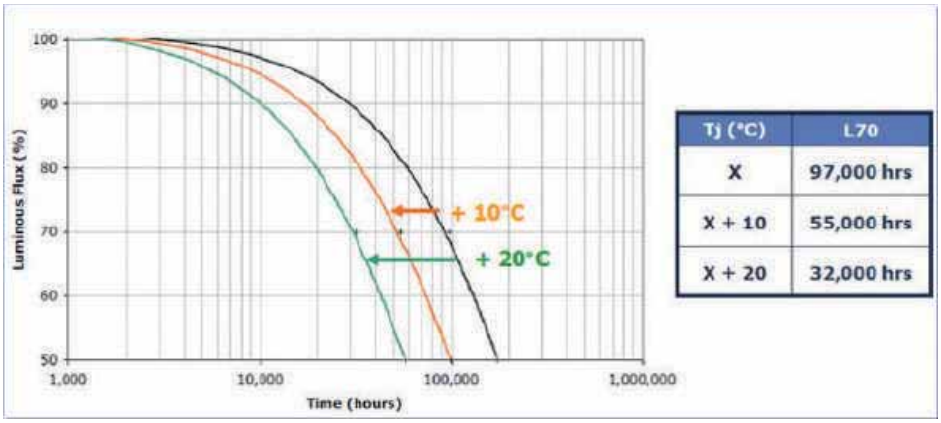
4.6. Sistemas de Iluminación

Cada vez es más frecuente, y es a lo que debe tenderse, el uso de Tecnología LED dado que con ello se consigue una mejor iluminación, ahorro de energía, mayor vida útil y durabilidad. No obstante, previamente habría que hacer un análisis real del Ciclo de Vida. Hay que tener en cuenta el mayor coste de primera implantación y tener muy presente el número de horas de funcionamiento al rendimiento requerido y deseado. La mayor parte de las veces los fabricantes y proveedores "prometen" gran número de horas de funcionamiento

pero al final casi nunca son reales ya que son consecuencia de un funcionamiento en condiciones de laboratorio y sobre la base de ensayos muy controlados, situaciones que sobre el terreno son muy difíciles de alcanzar.

A la hora de analizar los costes para la amortización de la inversión es necesario tener en cuenta un determinado porcentaje de fallos, hacer una previsión de labores de mantenimiento, limpieza, sustitución de determinado número de luminarias antes de lo previsto, temperatura de trabajo y además tener presente que las tecnologías se siguen desarrollando, se establecen nuevos requerimientos, nuevas aplicaciones, etc …

En general, es necesario invertir más en la fase de Proyecto, eliminar fallos de diseño, realizar un estricto cumplimiento de las especificaciones, establecer criterios de aceptación de los productos y definir procedimientos para la puesta en servicio. La vida de los LED depende de la temperatura de trabajo, aún es más, ésta es la Clave del envejecimiento por lo que deben exigirse garantías al respecto.



Evolución del flujo luminoso con la temperatura
La vida de los LED depende de la temperatura

Como conclusión puede establecerse que para garantizar un buen sistema de iluminación, ante los retos de las nuevas tecnologías, y competitivo ante un análisis global de costes, hay que seleccionar productos de larga duración, especificar y analizar su ciclo de vida en función de las condiciones de temperatura y exigir al proveedor que lo garantice.

Hoy en día el precio de primera implantación empieza a ser asequible y ya sale a cuenta por lo que se está instalando tecnología LED en la iluminación de las zonas de transición y de las bocas.

A efectos de explotación es muy importante el control de los consumos, debiendo instalar sistemas de reducción de flujo para adaptar las intensidades de cada situación específica en cada una de las zonas del túnel. Ya está siendo bastante habitual la implantación de sistemas inteligentes de gestión de la iluminación que permiten actuar en cualquier momento en la regulación lumínica, logrando una mejora sustancial en la eficiencia energética de la instalación. Uno de los más novedosos es el control punto a punto mediante el que en cada luminaria existe un controlador que adapta la intensidad y el flujo unidad por unidad dependiendo de una serie de factores (hasta 26 escenarios), siendo uno de los más importantes el del tráfico ya que permite rebajar la iluminación cuando hay poca circulación, principalmente de noche.

Túnel de Caldearenas. A-23. Huesca
Iluminación cenital con LED

Otros sistemas de iluminación y procedimientos de gestión eficientes, que permiten un ahorro energético son:

- bóvedas de transición lumínica,
- apagado de luminarias en túneles vacíos,
- uso de energías alternativas,
- optimización de la factura eléctrica

Sistemas eficientes que permiten el ahorro energético

4.7. Solución alternativa a las galerías de evacuación en túneles existentes

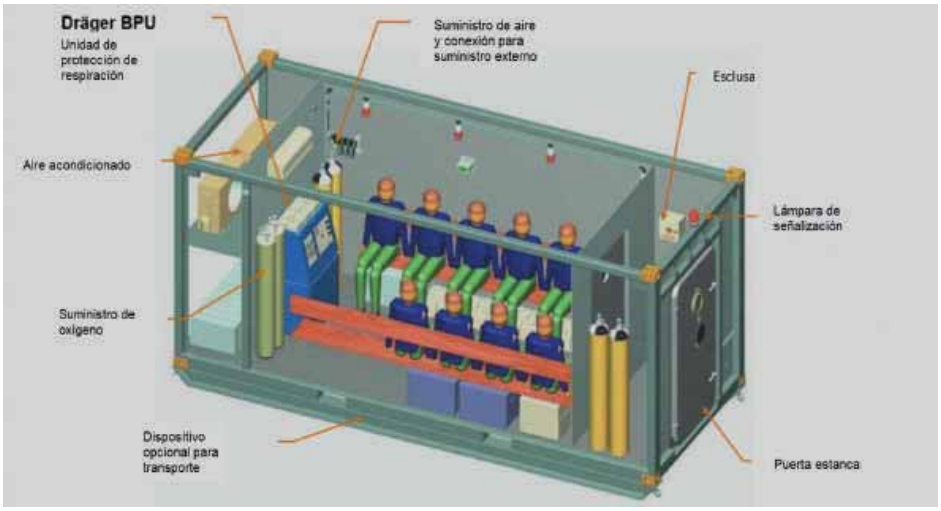
Muchas veces, bien por razones geotécnicas, de espacio, de importantes costes económicos, ambientales o de otro tipo, se hace muy difícil cumplir los condicionados establecidos por la Normativa referentes a la necesidad de habilitar galerías de evacuación en túneles de longitud determinada, existiendo en algunos casos serias dificultades en las zonas de salida.

La Administración noruega está estudiando la posibilidad de utilizar "cubículos de rescate" (rescue room/chamber) en túneles de carretera ya que consideran que la decisión que se tomó a la hora de redactar la Directiva 2004/54/CE, no permitiendo refugios sin salida al exterior, es cuestionable, especialmente en túneles existentes.

Estos cubículos se plantean bien como elementos prefabricados o bien como cavernas excavadas en la roca, resistentes al fuego, estancas y con suministro externo de aire y dispondrían de suministro eléctrico, iluminación, teléfono de emergencia y una cámara de vídeovigilancia. En el caso de elementos prefabricados, podrían estar preparados para ser remolcados por los servicios de emergencia.

Por ello, en Noruega, en varios túneles construidos previamente a la publicación de la Directiva, ya se han dispuesto estos cubículos en plan de prueba. Están excavados en la roca y se ha constatado su eficacia en incendios reales. Tienen menor coste que una galería y su implantación en los túneles en servicio implicaría un menor impacto en el tráfico.

Estos elementos suponen una solución viable en túneles donde la construcción de una galería al exterior no lo es y al ser menor el coste pueden colocarse a distancias menores. La estructura de acero que los componen es muy resistente y estanca y dispone de un relleno de lana mineral ignífuga. Su autonomía es para 20/50 usuarios hasta 36 horas, 200 MW/3h y T 50º C



Sistemas eficientes que permiten el ahorro energético

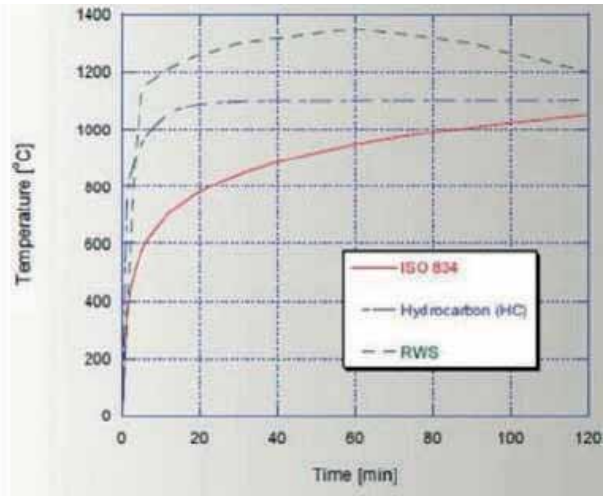
4.8. Sistemas pasivos de Protección contra el Fuego

Para calcular y tener presente la resistencia al fuego de las estructuras e instalaciones y definir los sistemas de protección correspondientes, en general los proyectistas tienen presentes determinadas curvas de comportamiento y de evolución en el tiempo de la temperatura alcanzada consecuencia de un incendio.

Las curvas más habituales son:

- Curva de Hidrocarburos para una duración de fuego de 120 min (2 h);
- Curva ISO 834 para un fuego de 240 min (4 h);
- Curva RWS (Rijkswaterstaat, NL) para una duración de fuego de 120 min (2 h) y 1380 ºC,

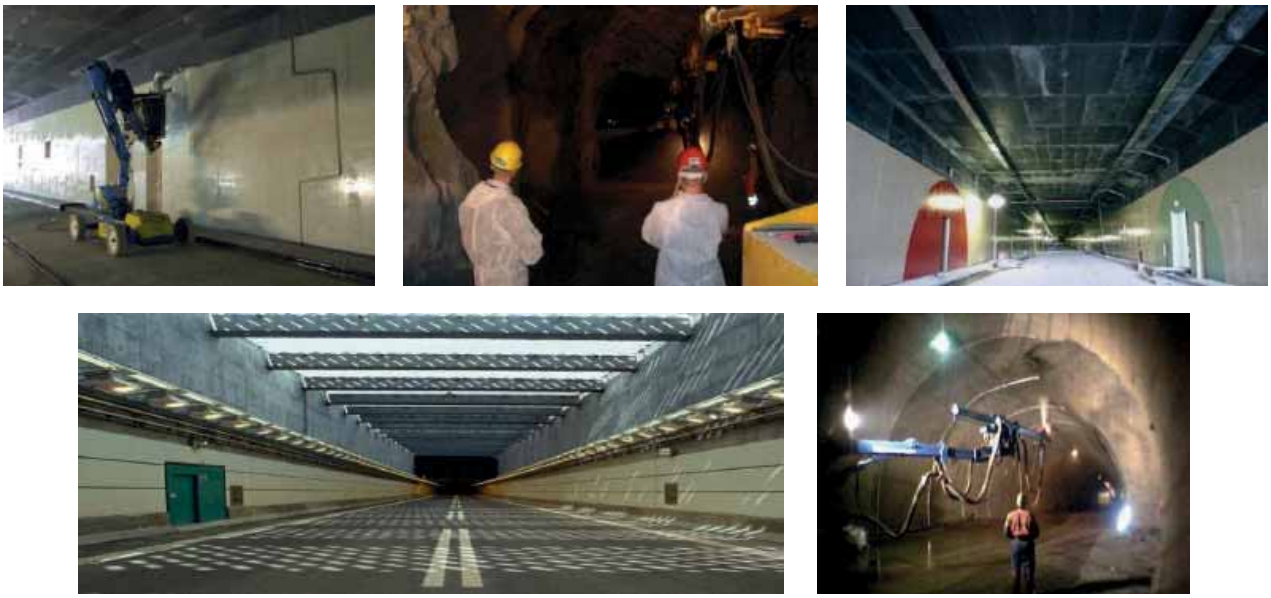
siendo muy frecuente que como criterio para el diseño estructural y la determinación de las cargas máximas se adopte una combinación de las tres.



Curvas de evolución de las temperaturas en un incendio

Los sistemas pasivos de protección contra el fuego comúnmente más utilizados son:

- Paneles prefabricados de entre 40 y 60 mm de espesor en hastiales y clave;
- Hormigón proyectado con fibras en un espesor de entre 40 y 60 mm en hastiales y clave;
- Elementos prefabricados montados contra los hastiales, formando parte además del diseño estético del interior del túnel.



Varios ejemplos de sistemas pasivos de protección contra el fuego

4.9. Sistemas activos de Protección contra el Fuego

Otra opción, muy utilizada en algunos países como Japón y Australia son los sistemas activos, concretamente los Sistemas Fijos de Extinción (FFFS). En Europa y en América se ve en muy pocos túneles la instalación de este tipo de sistemas pero es de creciente interés. En particular el desarrollo de nuevas tecnologías para las instalaciones de extinción fijas basadas en sistemas de alta presión han revelado la importancia de renovar los

conocimientos existentes y de plantear nuevas soluciones como las ya aplicadas en otros campos para solucionar dificultades no muy lejanas a las que puedan darse en los túneles.

Los Sistemas Fijos de Extinción pueden ser de tres tipos: Rociadores, Sistemas de diluvio y Agua nebulizada, atendiendo a distintos factores como son el tamaño de gota, la presión de funcionamiento y el método de activación. El tamaño de gota y la presión de funcionamiento están muy relacionados si bien pueden darse distintas configuraciones en función de la tecnología empleada en el diseño de las boquillas de descarga, en constante estado de evolución.

La National Fire Protection Association (NFPA 750) define los sistemas de agua nebulizada como aquellos en los que al menos el 99% del volumen de agua utilizado se aplica a gotas de diámetro inferior a 1000 micras. Es fundamental el mecanismo de activación y la presión a la que se opere, obteniéndose los mejores resultados con la alta presión.

Se vienen realizando ensayos a gran escala para profundizar en los conocimientos acerca del comportamiento de los humos en caso de incendios en túneles. Los objetivos que se plantean son muy diversos, obteniéndose resultados que afectan a muy distintos campos que permiten establecer recomendaciones sobre el uso de estos sistemas.

Se trata de un tema candente y sensible a debate en el que el Comité de Túneles de PIARC viene estando involucrado desde hace ya muchos años, estableciendo sus criterios.

Entre las principales objeciones a la aplicación de sistemas de extinción en túneles cabe citar:

- La posibilidad de que el agua y el combustible puedan producir explosión;
- El riesgo de que, tras la extinción, se generen gases combustibles que generasen una explosión;
- La generación de nubes de vapor que puedan dañar a los usuarios;
- La interacción con los humos estratificados dificultando las condiciones de visibilidad durante la fase de autoevacuación;
- Reducción de visibilidad para los vehículos lo que puede provocar accidentes, especialmente en caso de falsa alarma;
- Difícil mantenimiento y alto coste.

No obstante a favor de la utilización de sistemas de extinción se han venido posicionando no solo los fabricantes de este tipo de equipos sino también otros colectivos relacionados con las labores de extinción. En este sentido algunos de sus argumentos son:

- El vapor solo se genera en las proximidades de las llamas;
- La expansión del agua evaporada se compensa inmediatamente por el enfriamiento de los gases cercanos;
- El vapor creado por la evaporación de agua nebulizada solo puede ser perjudicial si el volumen de un recinto es comparable con el vapor generado. En un túnel esto no se produce;
- El objetivo de sistemas de extinción es: prevenir la extensión del fuego a otros vehículos, permitir mejores condiciones de evacuación y lucha contra el fuego y proteger la estructura y el equipamiento;
- Las condiciones de visibilidad se pierden rápidamente incluso sin descarga de agua;
- Las falsas activaciones se pueden evitar con procedimientos y medidas adecuadas.

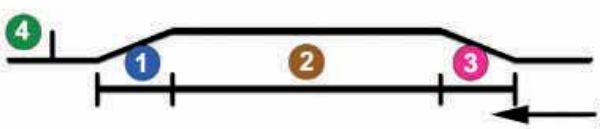
En el momento actual la recomendación de PIARC es que para cada caso, antes de decidir implantar en un túnel un Sistema Fijo de Extinción, se lleve a cabo una evaluación individual basada en el Análisis de Riesgo y

Seguridad, un Análisis de CosteBeneficio y una evaluación holística de la seguridad general del túnel. Además es muy recomendable, si es posible, realizar un ensayo a escala real.

Diferentes Sistemas Fijos de Extinción

4.10. Problemática de los apartaderos y obstáculos laterales

Los apartaderos permiten paradas de emergencia de los vehículos sin afectar al tráfico y facilitan el trabajo de mantenimiento permitiendo al personal acceder a las diferentes partes del túnel igualmente sin afectar al tráfico. La Normativa no establece sus dimensiones, habiéndose hecho por parte de PIARC un resumen de las características geométricas adoptadas en algunos países.



1: Longitud de la cuña de salida
2: Longitud del apartadero
3: Longitud de la cuña de entrada
4: Ancho del apartadero

País	Diseño				Usuario		Condición	
	(1) cuña salida (m)	(2) longitud (m)	(3) cuña entrada (m)	(4) Anchura (m)	Vehículos ligeros	Camiones	Longitud del túnel (m) o clase de túnel	Distancia entre apartaderos (m)
Austria 1)	-	40	-	3,0	X	X	> 1000	1000
Francia 4)	-	40	-	3,0	X	X	> 1000	800
Alemania 1)	7,5	37,5	2,5	2,5		X	> 900	600
Noruega 2)	10	24	10	3	X		B/C/D/E	500/375/250
3)	10	24	10	3	X		E/F	500/500
Suiza 1)	8	33	-	3,0	X	X	?	600 – 900

Nota: únicamente se recoge la información de aquellos países que disponen normativa sobre los apartaderos

1) En el caso de túneles bidireccionales los apartaderos se ubican a ambos lados y enfrentados
2) Túneles de dos carriles con apartaderos ubicados alternativamente en cada lado
3) Túneles unidireccionales con apartaderos ubicados próximos a las salidas
4) En el caso de túneles de dos carriles no se preven apartaderos. Si el tráfico es menor a 2.000 vehículos / día, tampoco se preven apartaderos si el ancho de la calzada permite sobrepasar al vehículo averiado en condiciones de seguridad y sin reducción significativa de la capacidad.

Características geométricas de los apartaderos en algunos países

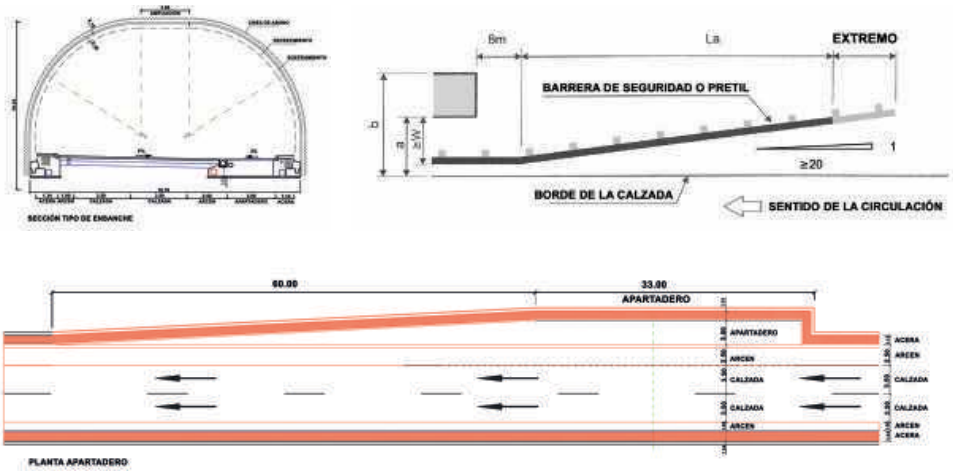
Las colisiones de vehículos con los apartaderos u otros obstáculos laterales afortunadamente son relativamente raras pero sus consecuencias son extremadamente graves y frecuentemente mortales. El ejemplo más dramático ocurrió en el túnel suizo de Sierre en 2012 al chocar un autocar con el muro frontal de un apartadero con la consecuencia de 28 muertos de los que 22 fueron niños. Ello ha hecho que sea necesario buscar soluciones simples y funcionales con el fin de suprimir el riesgo y reducir la gravedad de un accidente de este tipo.

Accidente contra apartadero en el túnel de El Perdón (Navarra). 2013

Para evitar los efectos de una colisión de estas características es posible adoptar muchas soluciones, desde suprimir el obstáculo cuando no se afecten a equipamientos hasta utilizar diferentes medios de prevención tales como bandas sonoras, captafaros laterales, dispositivos de señalización e instalación de elementos de protección. Sin embargo, estas soluciones no siempre resultan eficaces.

Una solución novedosa, que promete ser exitosa dada su concepción, es la que se ha adoptado en el túnel de Caldearenas en la autovía A-23 en el Puerto de Monrepós en Huesca, de la que se debería analizar su conveniencia en recomendarla para otros túneles.

Se basa en la Normativa española para los elementos de contención que establece una desviación máxima de una barrera rígida con la calzada de 2,86 grados. En base a esto se diseñó la transición del hastial del apartadero de modo que llevase esa trayectoria, es decir, eliminando en el sentido del tráfico el muro frontal llevando a cabo una transición muy suave con la inclinación citada en una longitud de 60,00 m. De este modo queda evitado el eventual choque frontal y si tiene lugar una salida de vía el vehículo podrá "volver" hacia su trayectoria.



Transición del sobreancho del apartadero. Túnel de Caldearenas. A-23. Huesca

5. CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO

Desde hace ya varios años, por parte de PIARC se ha identificado la conservación y el mantenimiento de las infraestructuras como una posibilidad clara para cumplir las expectativas de los ciudadanos, siendo un aspecto prioritario para su Comité Ejecutivo.

Se hace muy necesario analizar cómo destinar niveles adecuados de gasto en conservación al objeto de evitar los efectos negativos derivados de una conservación inadecuada, debiendo realizar un análisis de forma sistemática y consistente.

La carretera, y por tanto todos sus elementos, incluidos los túneles, es esencial para el funcionamiento de la economía de los distintos países ya que genera beneficios económicos y sociales y proporciona Accesibilidad. Por tanto es fundamental su buen estado y un buen plan de conservación y mantenimiento. Sin una conservación adecuada el valor patrimonial disminuye y se reducen los beneficios económicos y sociales. Los túneles deben de tener una vida útil superior a los 100 años y hay que intentar alcanzarla. Como consecuencia de la Directiva Europea 2004/54/CE, en todos los países de Europa, incluido España se está llevando a cabo un ambicioso plan de rehabilitación de túneles para su adaptación a los requisitos establecidos en dicha Norma y en el caso particular de España a los definidos en el RD 635/2006 de requisitos mínimos de seguridad en los túneles de la red de Estado que en definitiva es el resultado de la trasposición a la legislación española de la citada Directiva.

El aumento de capacidad de tráfico implica complejas infraestructuras y como ya se ha dicho la incorporación de tecnologías ITS. Las instalaciones de seguridad en los túneles se están incrementando entre otras cosas como consecuencia de la aplicación del RD 635/2006, siendo muy importante la dependencia de sistemas informáticos de vida limitada, lo que requiere intervenciones de mantenimiento más frecuentes que aumentan el coste de la conservación. No obstante, una actuación oportuna ahorra costes futuros ya que no invertir en conservación desperdicia inversiones anteriores. Además invertir en conservación produce múltiples beneficios: seguridad vial, medio ambiente, integración en el territorio, accesibilidad, …

Todos los equipamientos requieren mantenimiento: los del interior del túnel, los de las salas técnicas y el Centro de Control, definiéndose dos tipos principales de mantenimiento. El correctivo que se lleva a cabo tras una avería parcial o completa de un sistema o subsistema y el preventivo que se lleva a cabo de acuerdo con unos criterios preestablecidos con el fin de prevenir la avería del equipamiento. Éste último puede ser periódico en el que las intervenciones se basan en un calendario programado de acuerdo con periodos predeterminados o de acuerdo con los tiempos de funcionamiento o basado en el estado de los equipos en el que las intervenciones se llevan a cabo cuando se alcanzan unos umbrales predeterminados (medida cuantitativa del funcionamiento, ej.: rendimiento).

El mantenimiento correctivo se puede considerar para túneles con un nivel de equipamiento no muy alto, recomendándose el preventivo para la inmensa mayoría de túneles aunque no elimina el riesgo de aparición de averías, pero reduce sustancialmente su ocurrencia.

El sistema de gestión debe de estar basado en la cultura de la seguridad tanto de la infraestructura como de los usuarios y del personal de explotación, debiéndose tener muy en cuenta la disponibilidad y la capacidad de respuesta ya que el túnel debe de funcionar de forma continua y deben especificarse y respetar los tiempos de respuesta para reparar o reemplazar las instalaciones defectuosas. Por último es muy importante el disponer de unos buenos Registros con una base de datos de los equipamientos y el historial detallado de las revisiones, defectos y reparaciones realizadas.

Para llevar un buen Plan de Mantenimiento es necesario disponer de una Plataforma de Gestión adecuada, que en el caso de España es la Plataforma TEREX (Tratamiento de Elementos de Reconocimiento de Estado en Explotación), con un perfecto dominio de la misma. Sin embargo, la exigencia de mejora en la gestión exige la optimización de la información en bases de datos accesibles, por lo que la Plataforma GMAO (Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador) permite una gran ayuda al mantenimiento mediante la aplicación de un moderno Software de Gestión, siendo el futuro el desarrollo y la mejora de este tipo de aplicaciones.

6. MEJORA DE LA ACCESIBILIDAD PARA PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA

En 2006, todos los miembros de las Naciones Unidas firmaron la Convención sobre los derechos de las personas con Discapacidad (Carta de la ONU).

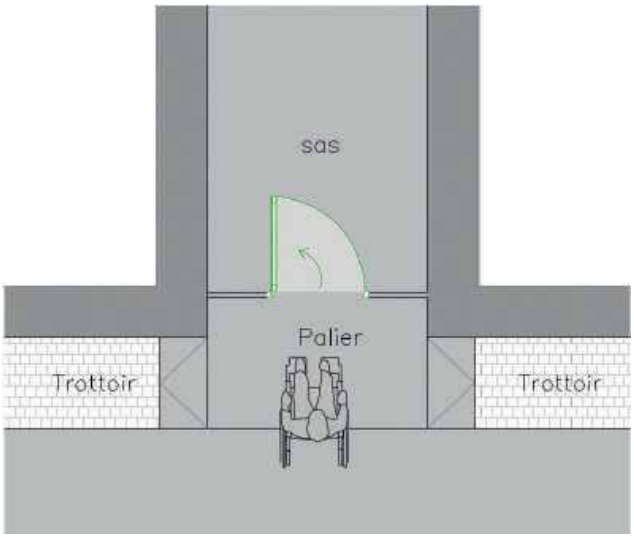
El número de personas con movilidad reducida cada vez va a ser mayor principalmente como consecuencia de una población cada vez más envejecida y el aumento de las enfermedades crónicas como la diabetes, la obesidad y las enfermedades cardiovasculares. El tema de la accesibilidad puede asegurarse que es especialmente complejo en un entorno como es el de un túnel de carretera. Los accesos a los dispositivos de seguridad así como a un lugar seguro en caso de incidente siendo necesaria una autoevacuación merecen una atención muy particular. Si bien los proyectistas de túneles de carretera de ciertos países han comenzado a tener en cuenta las necesidades específicas de este tipo de usuarios todavía queda mucho camino por recorrer antes de que la total accesibilidad a los espacios seguros llegue a ser posible para las personas de movilidad reducida.

Será preciso establecer unos principios generales relativos a la accesibilidad de las personas de movilidad reducida en las instalaciones de los túneles relacionadas con la seguridad. Concretamente en lo referente a equipos como los postes SOS o interfonos, extintores y salidas de emergencia, tanto en el caso de incidentes menores como en el caso de accidentes o incendios.

Aunque a veces la evacuación se lleva a cabo con la ayuda de otros usuarios, de los servicios de emergencia o de equipos de explotación, siempre que sea posible el diseño del túnel debería hacer posible la "autoevacuación" del máximo número de usuarios.

Los tipos de discapacidad y los niveles de movilidad reducida afectan de forma diversa a la capacidad de "autoevacuación" en caso de un incidente importante.

Las discapacidades que deben abordarse principalmente son las derivadas de una minusvalía de origen motriz, visual, auditiva e intelectual y psicológica. Otras personas que ven restringida su normal libertad de movimientos son los de baja estatura, obesas, mujeres embarazadas, personas mayores y personas acompañadas de niños pequeños.



Accesibilidad sin rampa

Puerta de apertura para silla de ruedas

7. VEHÍCULOS CONECTADOS Y AUTOMATIZADOS. NUEVOS SISTEMAS DE PROPULSIÓN. EL VEHÍCULO AUTÓNOMO

La movilidad del futuro será eléctrica, automatizada, conectada y compartida, estableciéndose una conectividad entre vehículos y los diferentes modos de transporte.

La industria de la automoción lleva años trabajando en los sistemas de conducción autónoma y ya existen en el mercado vehículos que los incorporan. La Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE por sus siglas en inglés) ha definido seis niveles de autonomía de conducción de los vehículos, según realicen de forma parcial o total la tarea de conducción dinámica (DDT – Dynamic Driving Task en inglés).

Desde hace unos años se está trabajando para clasificar las infraestructuras viarias en función de sus posibilidades para soportar, en mayor o menor grado, la conducción autónoma. Si bien el escenario en el que todos los vehículos circulen de forma autónoma supondrá un cambio de paradigma tanto en la digitalización como en la gestión de las redes viarias, lo cierto es que dicho escenario tardará en producirse, y hasta entonces se dará una situación híbrida en la que deberán coexistir los vehículos de conducción manual con los de conducción autónoma.

Actualmente existe una tecnología para la comunicación Inter vehicular (V2V) y otra de los vehículos con la infraestructura (V2I), denominadas genéricamente V2X (Vehicleto-Everything). Los fabricantes de vehículos se encuentran en la disyuntiva de tener que decantarse por una u otra tecnología. Así mismo, las infraestructuras de gestión de tráfico deben adaptar su equipamiento y plataformas para facilitar la conectividad con los vehículos, tanto en entorno interurbano como urbano.

Una vez establecidos los marcos en los que se clasifica el nivel de autonomía de los vehículos y la capacidad de las infraestructuras para soportar su circulación, es evidente que el nivel de digitalización de las infraestructuras viales es un factor clave para catalizar el proceso.

Los túneles son tramos especialmente sensibles de estas infraestructuras que, en la mayoría de los casos, cuentan con equipamientos y sistemas de seguridad y control avanzados, de acuerdo con la normativa vigente. Este es un buen punto de partida que puede facilitar la evolución de los túneles equipados con sistemas ITS, a túneles cooperativos.

Los equipamientos que deben incorporar las infraestructuras deberán adaptarse para poder facilitar la cooperación con los vehículos, siendo las tecnologías de comunicaciones las que en la actualidad parecen más preparadas para ofrecer la conectividad necesaria para una conducción autónoma.

En este marco, los túneles deben convertirse en cooperativos, es decir, deberán tener la capacidad de ofrecer información a los vehículos que circulen por su interior, o que se aproximen a él, pero también la de recibir información procedente de éstos que pueda ser de utilidad para una gestión más eficiente y segura.

Es evidente que ante cualquier evento que ponga en riesgo a los usuarios, los servicios C-ITS (Sistemas de Transporte Inteligente Cooperativos) ofrecen la ventaja de poder anticipar a los conductores cualquier incidencia. Ello les permitirá reaccionar con antelación en el interior del túnel o previamente a su entrada, extendiendo su percepción más allá de los sentidos del conductor y de los sensores del propio vehículo. Así mismo se podrá evitar que vehículos que se aproximen al túnel entren cuando en éste se ha producido una situación de riesgo.

En túneles con cierto nivel de equipamiento ITS podrá disponerse de un alto nivel de sensorización y la infraestructura podrá quedar monitorizada por lo que los sistemas de gestión del túnel estarían en disposición de ofrecer:

- Información sobre la infraestructura, en forma de mapas digitales que los vehículos que se aproximen al túnel podrían descargar con toda la información digital necesaria para circular por su interior;
- Información dinámica, relacionada con el estado del tráfico tanto en el túnel como en sus accesos, con las condiciones meteorológicas en el interior y en el exterior del túnel y con las alertas que afecten a la circulación;
- Ayuda al posicionamiento de los vehículos.

Los dispositivos RSU (Acrónimo de RoadSide Unit), consistentes en postes situados a lo largo de la vía para permitir el posicionamiento y la comunicación del vehículo con la carretera, pueden ofrecer una serie de funcionalidades complementarias a las de los sistemas ITS instalados en los túneles, estando disponibles desde el día de su instalación, con independencia de la presencia de vehículos conectados de última generación.

Si el estado del arte sobre el despliegue de los sistemas cooperativos y la conducción autónoma en general está muy limitado todavía a experiencias piloto muy acotadas, en el caso de los túneles la situación es todavía más reducida. El túnel de Cereixal, situado en la autovía A-6 en la provincia de Lugo, se ha convertido en el primer túnel de España con cobertura 5G con la capacidad de conectarse con los vehículos gracias a las comunicaciones C-V2X (celular vehicle-to-everything), la sensorización IoT (Internet of Things) y el edge computing de la red 5G.

Túnel de Cereixal con cobertura 5G

La solución tecnológica incorpora módulos en el Edge (para el procesamiento local distribuido), así como la solución para el análisis del estado del tráfico, la identificación del distintivo ambiental de los vehículos y, en su caso, el tipo de mercancía peligrosa que transporta. Además, el sistema envía alertas relacionadas sobre las condiciones meteorológicas, el nivel de visibilidad o la presencia de peatones en el interior del túnel, detectando así mismo vehículos detenidos, que circulan a una velocidad reducida o en sentido contrario.

Respecto a los nuevos sistemas de propulsión de los vehículos está habiendo avances muy importantes en lo referente a sistemas eléctricos con baterías, gas natural comprimido y gas licuado, sistemas eléctricos con depósito de hidrógeno, biodiesel y etanol y vehículos híbridos combustible – electricidad.

En cuanto al comportamiento de este tipo de vehículos y sus afecciones a la infraestructura del túnel, seguridad de los usuarios y posibilidades de intervención de los equipos de emergencia ante un eventual incidente, especialmente con incendio, se hace absolutamente necesario llevar a cabo nuevas y numerosas investigaciones. Deben tenerse en cuenta, ya en el momento actual, los riesgos asociados al creciente número de vehículos con propulsión mediante nuevos combustibles, la reducción de emisiones y las oportunidades que ello genera para la optimización de los sistemas de ventilación y la consideración de la existencia de nuevos gases en el interior del túnel y la necesidad de la presencia de detectores asociados.

Incendio de vehículo CNG en acceso a túnel - Estocolmo

Respecto a la intervención frente a este tipo de vehículos, en general prácticamente no existe normativa al respecto y no hay procedimientos armonizados, siendo cada responsable de los túneles y cada servicio de bomberos quiénes a la hora de intervenir actúan con sus criterios y con sus protocolos internos que suelen seguir las recomendaciones de los fabricantes.

8. DIGITALIZACIÓN GEMELO DIGITAL / TECNOLOGÍAS BIM

BIM es una metodología digital de trabajo que documenta todo el ciclo de vida de una infraestructura, haciendo uso de herramientas informáticas con el fin de generar un almacén único con toda la información útil para todos los agentes que intervienen a lo largo de él.

Se trata de un método de gestión colaborativo, en un entorno digital común, diseñado para coordinar y gestionar un proyecto en todas sus disciplinas (diseño, planificación, calidad, coste, …) durante las fases de su ciclo de vida.

Varios países están aplicando esta Metodología para mejorar la gestión de los túneles de carretera en las distintas etapas de su ciclo de vida. Es necesario recopilar las mejores prácticas sobre este tema y compartirlas a nivel internacional para hacer recomendaciones que ayuden a los países a aprovechar las ventajas del BIM para la gestión de los túneles.

La aplicación de BIM o el proceso de digitalización debe enmarcarse ya en el contexto de los proyectos de renovación, la construcción de nuevos túneles, la instalación de nuevos sistemas y equipos, el mantenimiento y las inspecciones. Este tipo de proyectos permite mejorar el acceso a la base de datos de información sobre el diseño y el funcionamiento de los túneles, la eficiencia en el diseño y la gestión de los activos y la seguridad.

Además de la aplicación BIM, también hay otros esfuerzos de digitalización de especial interés, por ejemplo, el uso de gemelos digitales para la gestión del ciclo de vida y el apoyo a la puesta en marcha rápida y sin problemas de un túnel nuevo o renovado, incluido su equipamiento, pero también para la formación del personal del Centro de Control, que son los primeros en responder ante un incidente, y para la de cada una de las distintas partes interesadas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Directiva 2004/54 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de la red transeuropea de transportes
- R.D. 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de la red de carreteras del Estado
- "Seguridad frente al fuego". Máster en túneles y obras subterráneas. Rafael López Guarga. XVIII ediciones
- "Sistemas fijos de extinción de incendios en túneles de carretera: sistemas actuales y recomendaciones". Comité de túneles de la AIPCR. 2016
- "Apartaderos y protección contra obstáculos laterales. Prácticas actuales en Europa". AIPCR. Comité Técnico C3.3 de explotación de túneles de carretera. 2016
- "Thermal cameras. Petralba tunnel: A case of success". Rafael López Guarga. 8th Annual. Fire Protection and Safety in Tunnels. Stavanger (Noruega). 2016
- Proyecto Modificación nº 2 del de "autovía A-23, tramo Alto de Monrepós-Caldearenas, provincia de Huesca". Ministerio de Fomento. 2017
- "New studies on new energy carriers". Maximilian Wietek (ILF Consulting Engineers). Conferencia sobre Seguridad en Túneles. Stavanger (Noruega). Junio 2018
- "Combustibles alternativos y el futuro de los túneles de carretera y de su proyecto". Varios autores. Routes/Roads, nº 378, 3er trimestre 2018
- "Emisiones de vehículos y demanda de aire para ventilación". AIPCR. Comité Técnico D5 de explotación de túneles de carretera. 2019
- "Plataformas de Gestión de túneles de tecnología abierta". Fernando Tomás Casado. 2019
- "El Túnel elemental". Urs Welte. 2019
- "Principios Generales para Mejorar la Accesibilidad de las Personas con Movilidad Reducida en Túneles de Carretera". AIPCR. Comité Técnico D5 de explotación de túneles de carretera. 2019
- "Self Rescue in Road Tunnels". Harald Buvik. 2019
- "Concepción y Proyecto de túneles de carretera para el futuro". Rafael López Guarga. 2019

- "Buenas Prácticas para el Proyecto, Construcción y Explotación de un túnel mediante la Metodología BIM". Rafael López Guarga. 2021
- "Improving Road Tunnel Resilience, Considering Safety and Availability". PIARC. Technicall Committee 4.4 Tunnels. 2022

DESAFÍOS PARA LA OPTIMIZACIÓN EN EL PROYECTO DE SISTEMAS DE VENTILACIÓN

Ignacio del Rey Llorente
Jefe de Sección del departamento de Instalaciones de TYPSA
Presidente del Comité Internacional de Túneles C3.3 de PIARC en el ciclo 2012-2015
Vicepresidente del Comité de Túneles de la ATC

La ventilación es un elemento clave para garantizar la seguridad frente a incendio en túneles de carretera. Sin embargo, el diseño del sistema de ventilación debe contemplar otros objetivos adicionales que pueden, en ocasiones, condicionar la solución conceptual y el dimensionamiento del sistema. De hecho, es importante tener en cuenta, que dichos objetivos no son inalterables por el tiempo, sino que han sufrido modificaciones, y lo seguirán haciendo, a lo largo del tiempo. Aunque para un joven ingeniero especialista, esta sensación de evolución no resulta evidente, una revisión histórica de la misma puede hacer entender la necesidad de revisión y de replanteamiento de los criterios que emplea para su incorporación del proyecto.

Además, la complejidad de los entornos colaborativos y multidisciplinares en los que se desarrollan los proyectos de grandes túneles pueden hacer perder la perspectiva de los desafíos que se pretenden afrontar. En este entorno, la aprobación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 pueden entenderse como un nuevo desafío, pero también como una oportunidad de evolución y mejora, además de la satisfacción de integrar una visión social y medioambiental en los diseños. Con este objetivo, el autor realiza una revisión histórica respecto del diseño de sistemas de ventilación e identifica lo que considera los aspectos clave para afrontarlos

CHALLENGES FOR OPTIMISATION IN THE DESIGN OF VENTILATION SYSTEMS

Ventilation is a key element to ensure fire safety in road tunnels. However, ventilation design should consider other objectives that may, in some cases, modify the concept and characteristics of the TVS and reconsider the sizing of the ventilation equipment. Furthermore, it is important to note that the goals are not fixed along the time but have been (and will be) subject to modifications. Perhaps, for a junior engineer, the evolving environment for these goals is not evident and then, an historic review of the evolution might help to understand the need of reviewing and revisiting the design criteria to be implemented in the TVS design.

This is especially relevant given the complexity of the collaborative and multidisciplinary environments where the large tunnels projects are developed which complicate the identification of the challenges to be overcome. In this framework, the SDG within the Agenda 2030 can be interpreted as new challenges but also as an opportunity for evolution and improvement, apart from the satisfaction of being able to integrate the social and environmental pillars of sustainability in the designs.

With that goal, the authors provide an historic overview in relation to the design goals for the tunnel ventilation system, identifying what consider the key aspects for their integration.

LES DÉFIS DE L'OPTIMISATION DANS LA CONCEPTION DES SYSTÈMES DE VENTILATION

La ventilation est un élément fondamental pour assurer la sécurité incendie dans les tunnels routiers. Cependant, la conception de la ventilation doit prendre en compte d'autres objectifs qui peuvent, dans certains cas, modifier le concept et les caractéristiques du système de ventilation et reconsidérer le dimensionnement des équipements. De plus, il est important de noter que les objectifs ne sont pas fixes dans le temps mais ont été (et seront) sujets à des modifications. Peut-être que, pour un ingénieur junior, l'environnement évolutif de ces objectifs n'est pas évident et ensuite, un examen historique de l'évolution pourrait aider à comprendre la nécessité de revoir et de revoir les critères de conception à mettre en œuvre dans la conception TVS. Ceci est particulièrement important compte tenu de la complexité des environnements collaboratifs et multidisciplinaires où se développent les grands projets de tunnels qui compliquent l'identification des défis à relever. Dans ce cadre, les ODD au sein de l'Agenda 2030 peuvent être interprétés comme de nouveaux défis mais aussi comme une opportunité d'évolution et d'amélioration, outre la satisfaction de pouvoir intégrer les piliers sociaux et environnementaux de la durabilité dans les conceptions.

Dans ce but, les auteurs fournissent un aperçu historique par rapport aux objectifs de conception du système de ventilation du tunnel, en identifiant ce que considèrent les aspects clés pour leur intégration.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los términos más empleados en las últimas décadas para reflejar los cambios sociales y tecnológicos ha sido el de la globalización, referido aquí como el enorme incremento de la comunicación e interrelación entre los distintos países del mundo. Este concepto necesariamente ha afectado a la forma de aplicar, desarrollar y entender los trabajos de ingeniería y, en particular, el desarrollo de los proyectos para grandes infraestructuras, por su carácter global y de gran impacto económico.

Más allá de los evidentes avances en las Tecnologías de Información y comunicación o de la imparable utilización de nuevas, complejas y sofisticadas herramientas de gestión y desarrollo de proyectos, a la que la mayoría de los ingenieros nos hemos visto avocados (tanto en sus connotaciones positivas como negativas), resulta interesante observar la profunda evolución en los objetivos, criterios, metodologías o procedimientos en los proyectos de sistemas de ventilación en túneles. Hace tan sólo unas décadas, las fuentes de información de las que disponía un equipo de ingeniería para su desarrollo eran limitadas y estaban basadas, en el mejor de los casos, en proyectos de referencia locales (habitualmente con ámbito nacional o como mucho de las zonas de influencia), algunas referencias bibliográficas (libros de congresos o informes de comités como la propia AIPCR) y en algunos casos del conocimiento más o menos detallado de obras de referencia que se habían podido visitar o conocer.

Las nuevas generaciones de ingenieros se encuentran con la gran ventaja de poder compartir frecuentemente experiencias y conocimientos con especialistas y técnicos de muy distintas procedencias y con formaciones y titulaciones con enfoques muy diferentes. También tiene la suerte, o la desgracia, queda sobre la mesa esta discusión, de disponer de cantidades ingentes de informes, artículos, páginas de internet de diversa procedencia, pero también incierta calidad.

Además, la enorme ventaja que representa la globalización supone desafíos importantes cuando, como resulta frecuente en las grandes empresas de ingeniería del mundo, los equipos de diseño deben afrontar proyectos en muy distintos países donde que los planteamientos conceptuales y criterios subyacentes a las distintas normativas o estándares internacionales pueden ser muy diferentes y, en ocasiones, no complementarios. De hecho, hoy en día es posible encontrar normativas de ventilación tanto prestacionales como prescriptivas, donde un uso combinado de ellas lleva a soluciones irracionales o no coherentes. Esto se une a la necesidad de integración, en el conjunto del proyecto de obra civil, del diseño del sistema de ventilación cubriendo otros muchos aspectos multidisciplinares como los análisis de riesgo, los conceptos RAMS o el coste de ciclo de vida.

Adicionalmente, a dichos objetivos tradicionales de seguridad (tan fuertemente vinculado a la evaluación y gestión del riesgo) y eficiencia (en su sentido más amplio que abarca tanto la obra civil como la operación) desde hace ya varios años se ha identificado la necesidad de incorporar aspectos de sostenibilidad, recogidos ya de forma implícita en la Agenda 2030 de la ONU que, aplicados al proyecto de sistemas de ventilación, fijan objetivos que no tienen por qué ser necesariamente coincidentes con los ya existentes, generando desafíos adicionales. Como analogía del problema se podría referir al clásico problema matemático de optimización de funciones con múltiples variables y la dificultad de identificar máximos globales frente a locales. Y más aún si la forma de evaluar el cumplimiento de los objetivos propuestos presenta métodos no comparables o cualitativos.

Este artículo pretende, desde una perspectiva histórica e inevitablemente abreviada, recorrer la evolución de los objetivos del proyecto de sistemas de ventilación, observar la situación actual y plantear los desafíos a afrontar en las próximas décadas, muchos de los cuales se abordarán en este Simposio.

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La utilización de sistemas ventilación en túneles y espacios subterráneos, para garantizar una adecuada calidad del aire, data de los remotos tiempos del inicio de la extracción minera en el Neolítico, donde se aplicaron los primeros conceptos de ventilación artificial mediante la generación de flujos de aire exterior limpio a través de la generación de incendios controlados en pozos verticales junto a las galerías, como se explica en estudios arqueológicos recientes sobre los pozos de Laurion en Attica (1). Estas técnicas fueron perfeccionadas a lo largo de los siglos, con interesantes ejemplos de ventilación artificial aplicados de forma sistemática en extracciones mineras, que aparecen reflejados en las ilustrativas láminas del libro De re metallica (2), publicado a mediados del siglo SVI.

Esta evolución de las técnicas de ventilación en minería y el desarrollo de artilugios de creciente complejidad, permitieron aplicar estos conceptos de ventilación artificial a la construcción de túneles de mayor longitud y, posteriormente, en aquellos casos en los que se planteaba el uso del túnel para la circulación de vehículos propulsados por motores de combustión (primero los ferrocarriles con máquinas de vapor y posteriormente los automóviles).

Sin embargo, a finales del siglo XIX empezaron a construirse túneles para ferrocarriles a vapor de cierta longitud y como resultado de los ya conocidos efectos tóxicos de los gases de combustión del carbón se comenzaron a producir incidentes de mayor gravedad, incluso con numerosos fallecidos, como el incidente del túnel de St. Clair en Norteamérica en 1904 (3). En un principio, los incidentes involucraban sobre todo al propio personal encargado de las máquinas, y se producían cuando los trenes quedaban detenidos en el interior del túnel por algún incidente, como sucedió en el túnel de Ricken en 1926 con nueve fallecidos entre personal del tren y servicios de emergencia (4). Sin embargo, el mayor uso de trenes de pasajeros en las décadas siguientes llevó a accidentes con trágicas consecuencias en distintos túneles ferroviarios europeos, como el dramático desenlace del tren Balvano donde la parada del tren en el túnel de Armi de unos 2000 metros de longitud, ocasionó en torno a 500 fallecidos intoxicados por monóxido de carbono (5). Como resultado la disposición de sistemas de ventilación se inició con antelación en el ámbito ferroviario, como por ejemplo en el túnel (ferroviario) de Mersey o el de Severn (6).

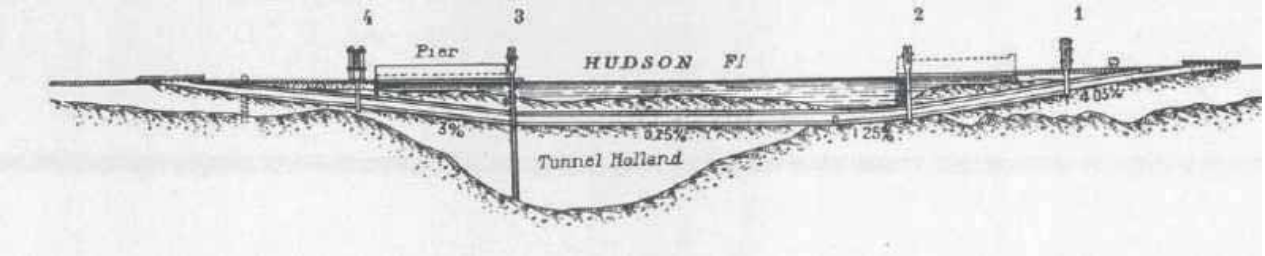
En el ámbito de las carreteras ya a finales del siglo XIX se comenzó la construcción de túneles carreteros (inicialmente para carruajes a caballo) de cierta entidad como por ejemplo el de Tende, de unos 3200 metros, entre Francia e Italia en 1882 o los de Blackwall, bajo el Támesis, en 1897, y Rotherhite, en 1908 ambos con longitud en torno al kilómetro y medio, en el Reino Unido. Todos ellos, a pesar de su longitud, contaban inicialmente con ventilación natural (mediante pozos intermedios en el caso de los británicos).

Sin embargo, el comienzo del uso de los automóviles de una forma más generalizada, a principios del siglo XX, implicó también la necesidad de garantizar la seguridad ante los efectos de los gases producidos por los vehículos en túneles de cierta longitud. Por ello, en los años 20 del siglo pasado en los Estados Unidos, se comenzaron a realizar estudios detallados que contemplaban la disposición de sistemas de ventilación artificial para mejorar la calidad del aire en el interior de los túneles de carretera de cierta longitud destinados a la circulación de vehículos de combustión (7).

Como ejemplo, el túnel de Liberty, iniciado en 1919 e inaugurado en 1924, y con unos 1800 metros de longitud, se convirtió en uno de los túneles de carreteras más largos de la época. En este caso, el túnel inicialmente no disponía de ninguna ventilación artificial ya que, por su configuración de túnel de dos tubos muy empleada para túneles de cierta longitud, se confiaba en la ventilación natural por efecto pistón de los vehículos. Sin embargo, pocos meses después de su inauguración, en mayo de ese mismo año y como consecuencia de una huelga ferroviaria, se produjo un gran atasco de más de 500 vehículos en el túnel, que generó un grave incidente con decenas de intoxicados por emisiones de monóxido de carbono (8). Este incidente conllevó la aplicación, de forma inmediata, de restricciones de tráfico en el acceso al túnel para evitar la creación de atascos (en lo que hoy en día se considerarían medidas compensatorias de seguridad) y posteriormente su reacondicionamiento mediante la incorporación de un sistema de ventilación artificial mediante pozos y ventilación mecánica que se finalizó en el año 1928.

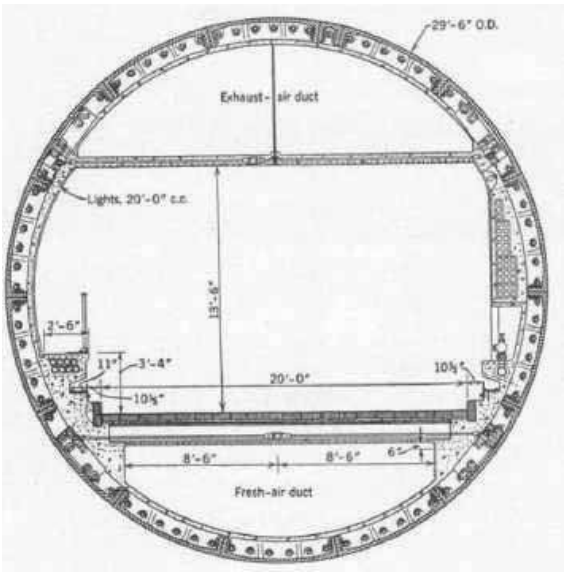
Este hecho reforzó la importancia de la campaña de ensayos y estudios sobre niveles de emisiones de gases por vehículos a motor para las fases de proyecto de túneles de carretera que se estaba realizando, convirtiéndose el artículo del Ingeniero Jefe de la Comisión de túneles y puentes del estado de Nueva York, Ole Singstad, en el Congreso Mundial de Ingeniería en Tokio en 1929, en la referencia principal para el proyecto de sistemas de ventilación durante varias décadas (9).

Los resultados de estos estudios se plasmaron, no solo en el reacondicionamiento del túnel de Liberty, sino también en el proyecto del emblemático túnel de Holland, que fue iniciado en 1920 y completado en 1927 y que, conectando Nueva York y Nueva Jersey bajo el río Hudson, se convirtió en el mayor túnel carretero, con unos 2500 metros de longitud y dos tubos unidireccionales independientes.



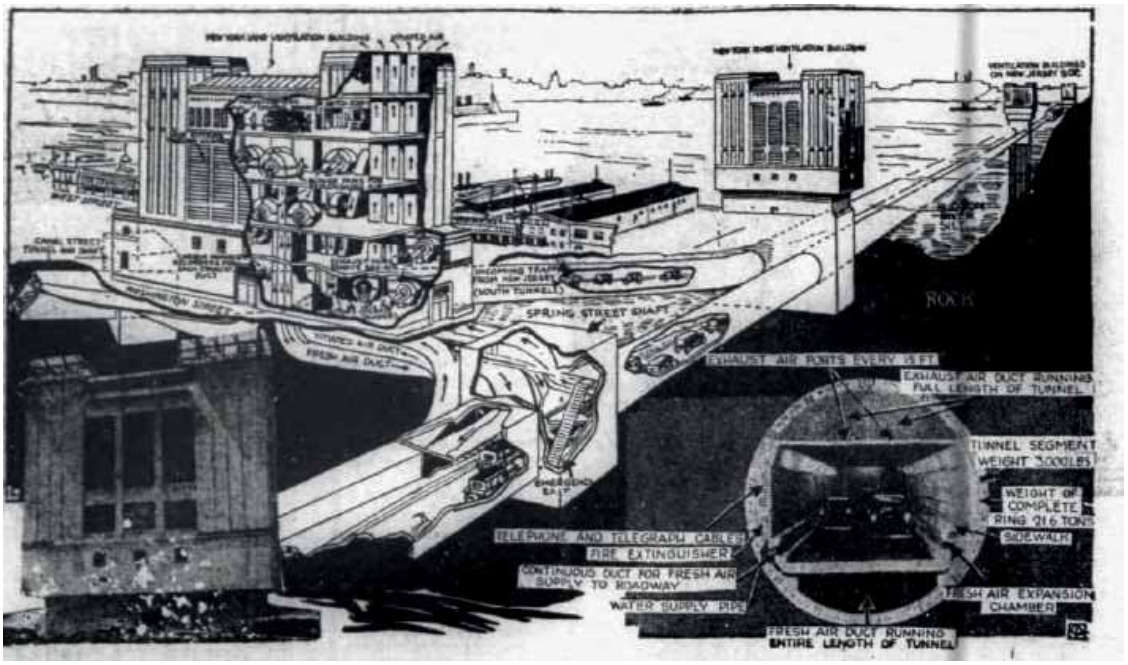
Túnel de Holland. Perfil longitudinal (10)

El proyecto implicó la disposición de un sistema de ventilación transversal puro, con impulsión de aire fresco bajo calzada y extracción por techo (incorporando ya el criterio de que, en caso de incidente con fuego, los humos se extraerían mejor por la parte superior). Los estudios incluyeron tanto ensayos para la determinación de los niveles de emisiones de los vehículos, como la identificación de otros contaminantes aparte del monóxido de carbono y la definición de niveles admisibles para el dimensionamiento del sistema de ventilación, fijados en 250 partes por millón, que se consideró adecuado tanto por permitir una atmósfera limpia en el túnel sino también un criterio de seguridad para los agentes de policía que permanecían en puestos de vigilancia dentro del túnel en periodos de 2 horas (11) y que, comparado con las 30 ppm actuales para labores de mantenimiento en el túnel, muestran la evolución de los criterios de seguridad.



Túnel de Holland. Sección transversal (10)

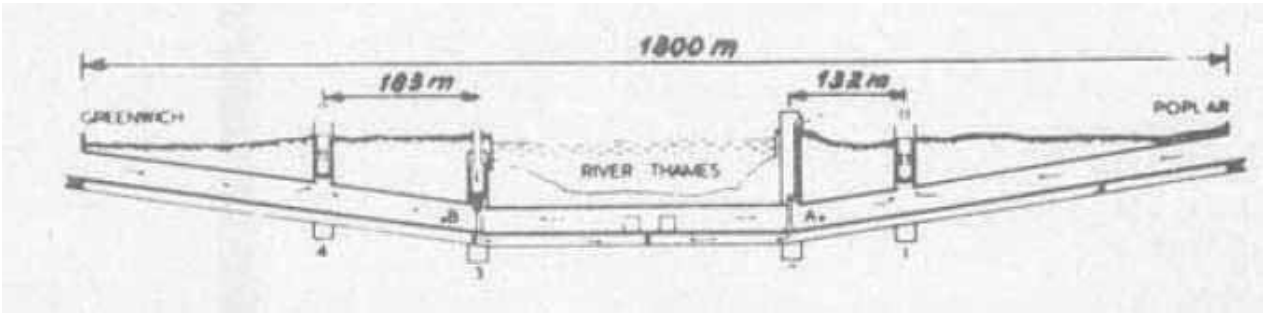
Para dar servicio al sistema de ventilación se dispusieron pozos intermedios con un total de 84 ventiladores centrífugos de impulsión y otros tanto de extracción con caudales unitarios de en torno a 83 m3/s, lo que muestra la magnitud de la obra acometida y que la convirtieron en una referencia internacional en las décadas siguientes.



Túnel de Holland. Diagrama mostrando detalles construcción (12)

Con este impulso en el conocimiento de la problemática, en las décadas posteriores se construyeron más de una decena de túneles de carretera con longitud superior a los 1000 metros en números estados, incluyendo a modo de ejemplo, el Bingham Canyon Tunnel, de 2135 m en 1939 en Utah, el túnel de Wavona, con 1290 metros en 1933, en el parque de Yosemite en California, en los que se emplearon sistemas ventilación longitudinal y que identificaban las posibles limitaciones para el uso de esta ventilación en túneles de cierta longitud al requerir una elevada velocidad del aire para diluir los contaminantes.

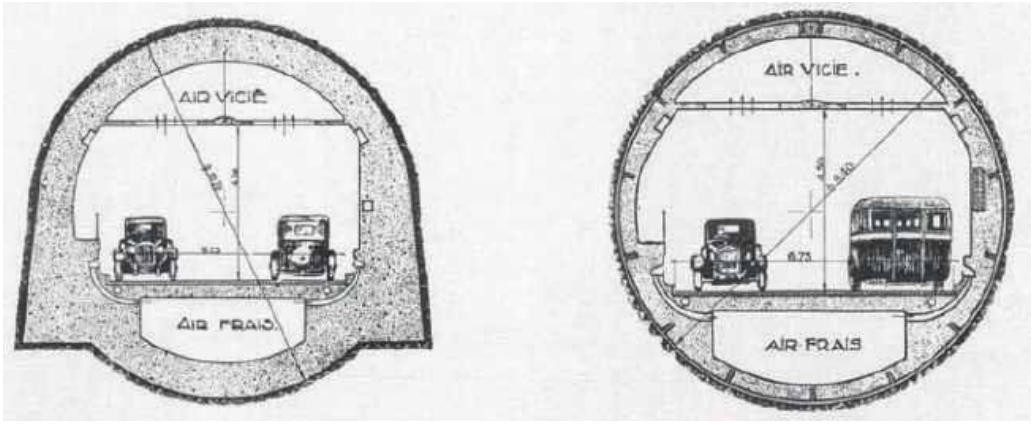
Por su parte, en Europa el incremento de los niveles de tráfico llevó también a la incorporación de ventilación artificial en los túneles más importantes que entonces disponían de una ventilación natural. Así, por ejemplo, el túnel de Blackway bajo el Támesis, mencionado anteriormente y que ya contaba con una ventilación mediante pozos se equiparon con ventilación mecánica (1922 y 1940) como también sucedió con el de Rotherhite reacondicionado con ventilación mecánica en 1924 y 1932 (10).



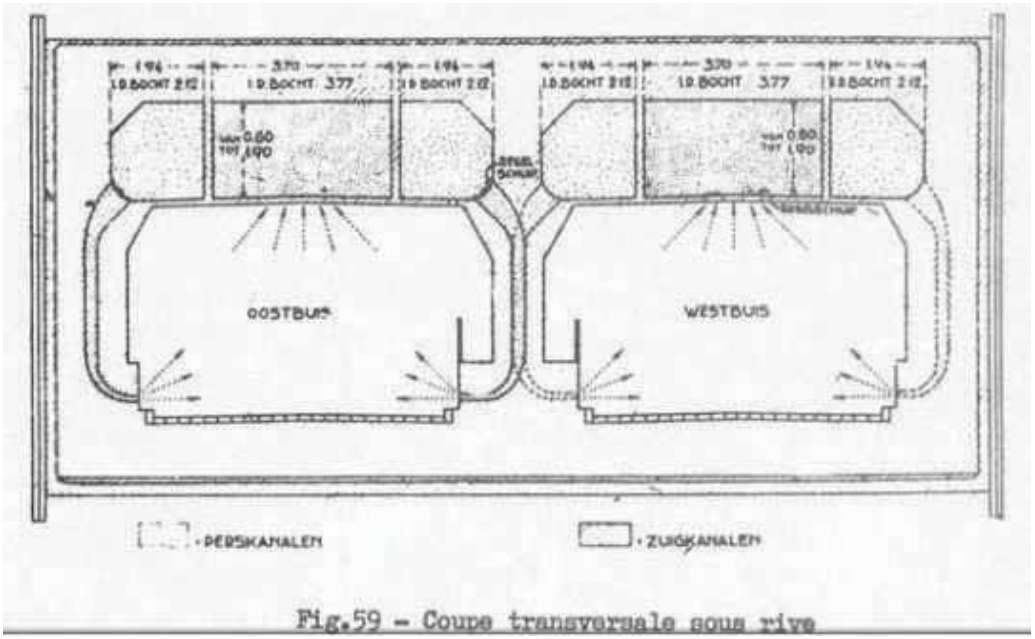
Túnel de Blackwall. Esquema de ventilación (12)

En otros casos, como por ejemplo los túneles de Tende (3186 metros) entre Francia e Italia, o du Chat (1482 m, 1931) y Lioran (1412 m, 1847) en Francia ya se identificó la necesidad de disponer de sistemas artificiales de ventilación al menos para situaciones de emergencia (en esos tiempos la emergencia principal era la formación de atascos con la consiguiente reducción del efecto émbolo).

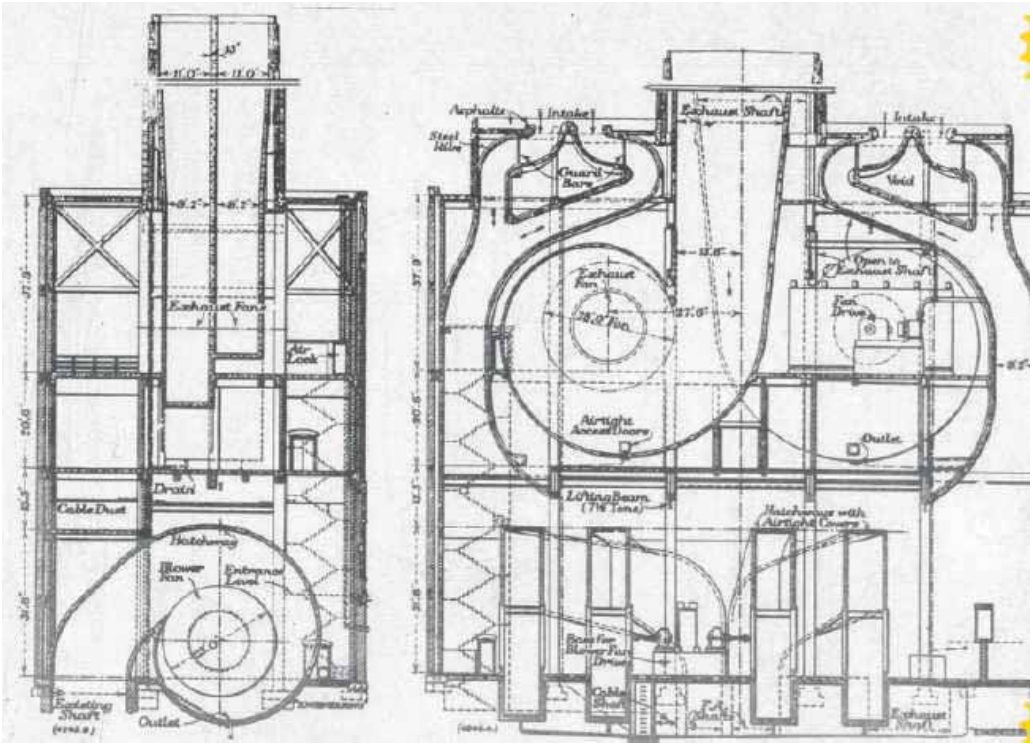
En otros casos, también en túneles con alto nivel de tráfico, se construyeron sistemas de ventilación transversal, como el de Anvers en Bélgica, inaugurado en 1937 con una longitud de 1770 metros y el de Rotterdam en Holanda en 1942, con una configuración similar a los estadounidenses de dos tubos y longitud en torno a los 1000 metros o el de Queensway, construido en Liverpool bajo el río Mersey en 1934 en Reino Unido.



Sección transversal túnel de Anvers, Bélgica (10)



Sección transversal túnel de Rotterdam, Países Bajos (10)



Sección transversal estación de ventilación. Túnel bajo río Mersey, Reino Unido (13)

En (10), (13), (14) y el capítulo 5 del libro (15) el lector puede encontrar abundante información y curiosos detalles de los sistemas de ventilación de estos túneles.

Tras ese periodo y hasta los años 60, con cierta interrupción en Europa por la segunda guerra Mundial, se siguen realizando proyectos de túneles de cierta entidad empleando distintos tipos de sistemas de ventilación en función de los niveles de tráfico, longitud y número de tubos.

En España, el túnel de mayor longitud es el de Viella que, inaugurado en 1948 y con sus cinco kilómetros de longitud, no dispone de ventilación artificial debido a los moderados niveles de tráfico (en torno a 200 vehículos al día, con puntas en las festividades de Semana Santa de 600 vehículos al día) y en los que se emplea la información, bastante detallada, de presiones barométricas entre bocas y viento (10) para lograr la suficiente ventilación para mantener la calidad del aire necesaria.

Como se ha explicado, hasta la década de los 50, el objetivo fundamental del diseño de sistemas de ventilación era mantener unos niveles de calidad del aire aceptables en situación normal de operación, siendo la emergencia principal los posibles escenarios de atasco en el interior del túnel que reducían la posibilidad de emplear el efecto pistón generador por los vehículos en el túnel incrementando los niveles de concentración de CO en el túnel con el consiguiente riesgo para la seguridad de los usuarios. Aunque es preciso recordar que ya desde los ensayos en EEUU en los años 20 se habían identificado las ventajas de los sistemas de extracción por conductos en la parte superior de la sección transversal, los escenarios de incendio no eran empleados para el dimensionamiento de la ventilación sino para la determinación de las medidas de protección contra incendio a disponer en el túnel como la detección, redes de agua o incluso la disposición de agentes de intervención en el interior del túnel.

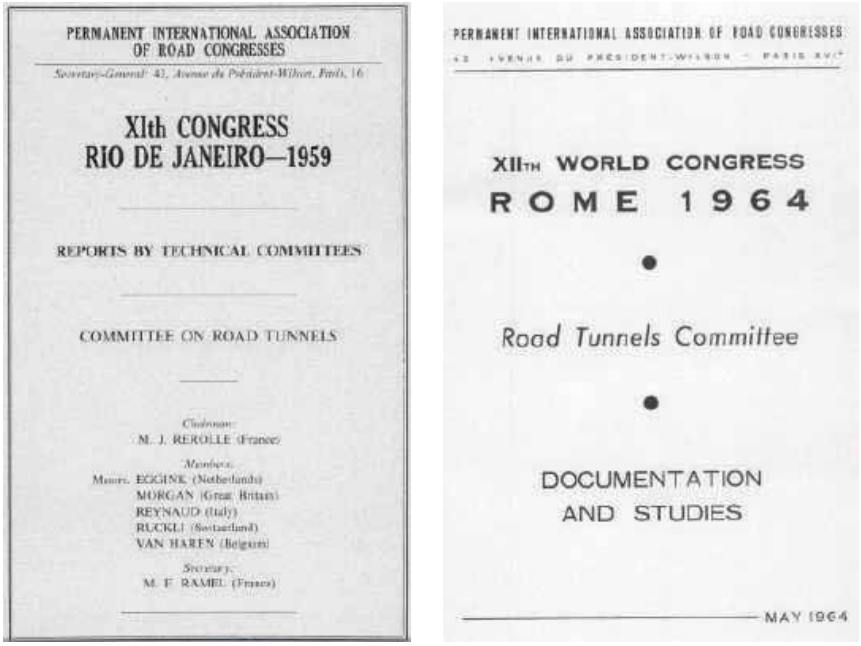
En ese contexto, en el año 1949 se produjo un incidente importante en el túnel de referencia a nivel internacional: el incendio en el túnel de Holland. Este incidente, ocasionado cuando un camión cargado de mercancías peligrosas (210 litros de disulfuro de carbono), a pesar de que estaba prohibido su paso, se incendió oca-

sionando el fallecimiento de un bombero y heridas a 66 usuarios (uno de los cuales falleció posteriormente). La eficacia en la gestión del incidente, a pesar de su dificultad en la evolución, permitió observar el beneficio del uso coordinado de la ventilación (y su incorporación en el diseño) en este tipo de incidentes (16) y debido la singularidad de la carga no supuso un cambio sustancial en los criterios de diseño de la ventilación.

3. COMITE DE TUNELES DE LA AIPCR

A principios de los años 50, desde la Asociación Mundial de la Carretera se identifica la necesidad de establecer un comité para compartir experiencias en el diseño y explotación de túneles. Como resultado, en Julio de 1957, se constituyó el Comité de Túneles, integrado por miembros de países europeos con grandes túneles y mayor experiencia en su diseño y explotación: Francia, Holanda, Gran Bretaña, Italia, Suiza y Bélgica.

Este Comité elaboró un informe específico de túneles que se publicó en las actas del XII Congreso de la AIPCR celebrado en Rio de Janeiro en el año 1959 (11). El hecho de que, de las 15 páginas de este primer informe, 10 estuviesen dedicadas a la ventilación, frente a otras 5 para portada, conclusiones y temas específicos de iluminación, acústica explotación y tráfico, reflejan la importancia que este tema ha tenido en los trabajos del Comité desde entonces.



Portadas de los informes del Comité de Túneles para los congresos AIPCR de 1959 y 1964

En dicho informe del Comité de Túneles, se realizaba un primer análisis (ya que tan sólo había transcurrido un breve periodo desde su creación) sobre geometría y ventilación, pero también sobre otros temas de explotación y seguridad, que fue recopilada en forma de apéndices. Para poder llevar a cabo de forma eficiente la recopilación de información, se realizó un exhaustivo cuestionario que fue enviado a los países miembros, iniciando la metodología que ha formado parte del modus operandi del Comité desde entonces y que ha permitido definir el estado del arte en muy diversos temas.

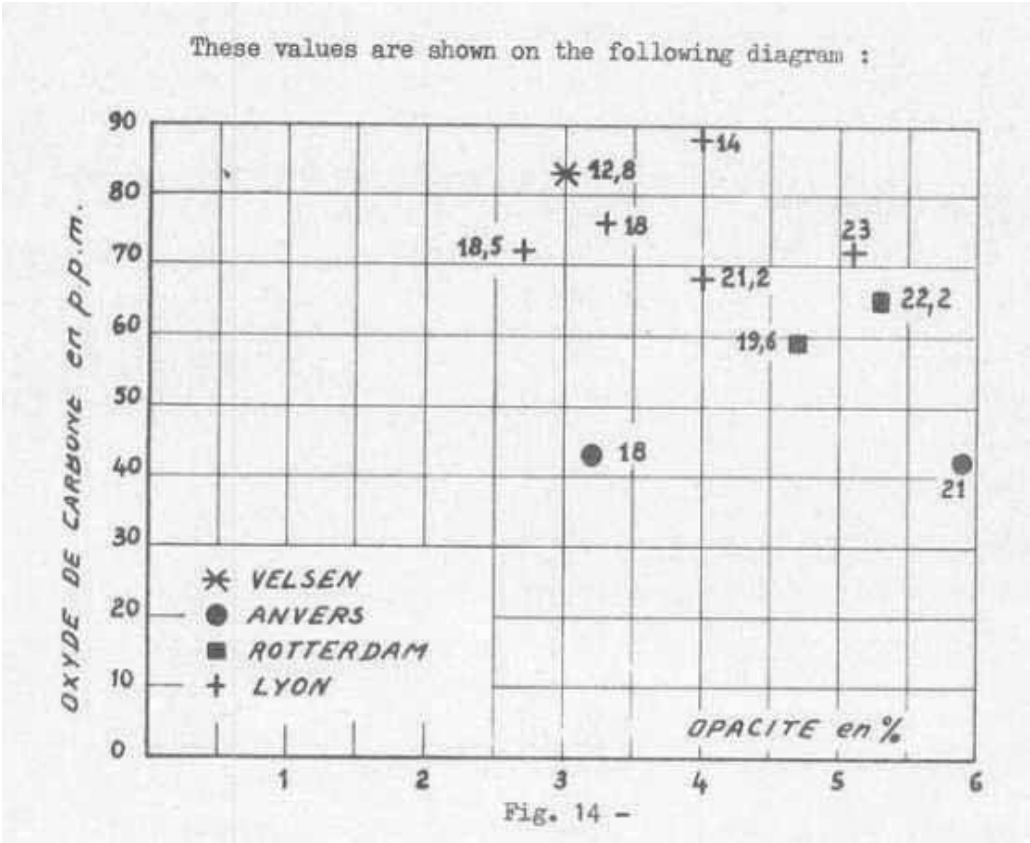
En cuanto al contenido del informe, como se mencionó anteriormente, una parte muy importante se centró en el tema de la ventilación, analizando la problemática de la época, recordando la distinción entre ventila-

ción natural y artificial y estableciendo las clasificaciones típicas de sistemas de ventilación empleadas actualmente: longitudinal, transversal y semitransversal. También se recopilaron los criterios de concentración máxima de monóxido de carbono empleados en distintos países para mantener una calidad percibida del aire aceptable en distintos túneles europeos (Antwerp y Bruselas en Bélgica, Roterdam y Velsen en Holanda y Saint Cloud y Croix-Rousse en Francia o el de Mersey en Reino Unido (con valores entre 100 y 200 ppm según las condiciones de tráfico).

A partir de entonces, el Comité ha ido realizando un constante esfuerzo de recopilación de la experiencia internacional y de las prácticas habituales en túneles de referencia que permiten entender los temas clave en el campo de la ventilación de túneles a lo largo de las últimas décadas.

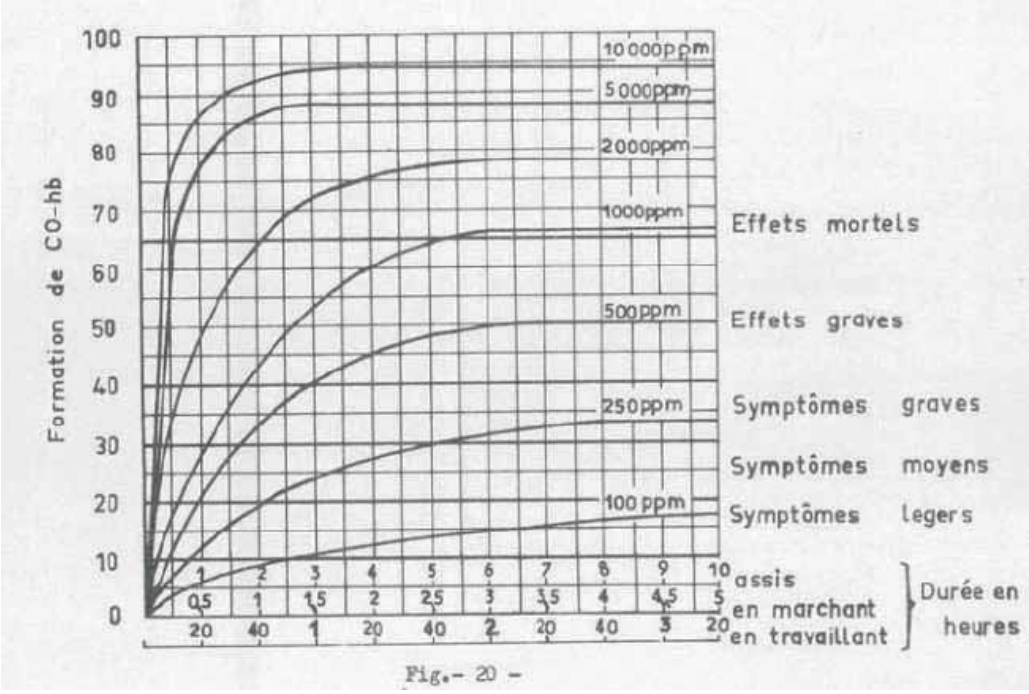
Así, en el siguiente Congreso de la AIPCR que se celebró en Roma en el año 1964, el comité, reforzado además por la incorporación de un miembro de los Estados Unidos (Autoridad del Puerto de Nueva York), generó un informe donde se recopilaba toda la información obtenida hasta la fecha (más de 380 páginas sin incluir los apéndices, de las cuales más de 300 se dedicaron al tema de la ventilación y una buena parte del resto a la operación de los túneles) lo que incluía una descripción detallada de los túneles, y sus sistemas de ventilación, de numerosos países incluidos España o Italia.

En concreto, el informe del Comité, partiendo de los criterios empleados en los Estados Unidos hasta la fecha, recopila distinta información obtenida en estudios en Suiza (producidos por la Swiss Federal Expressways y motivado por un importante incremento en el número de proyectos de grandes túneles que se estaba produciendo en ese país) e importantes campañas de medidas de contaminantes en túneles en otros países europeos (Antwerp en Holanda, varios túneles de Lyon, los túneles de Blackwall y Rotherhithe en Reino Unido), que permitían por primera vez analizar la posible relación entre niveles de monóxido de carbono y opacidad en túneles en explotación.



Resultados de experimentos. Correlación niveles de CO y opacidad (10)

Adicionalmente, el Comité profundizaba en los niveles admisibles de los gases de combustión, principalmente el CO (ver figura del año 1940), pero también otros contaminantes como los benzopirenos, carbonilla, aldehídos, y óxidos de nitrógeno y plomo.



Resultados de experimentos. Correlación niveles de CO y opacidad (10)

Es interesante destacar que ya en 1964 los niveles de CO recomendados para el diseño de túneles de carretera se establecían en umbrales entre 100 y 150 ppm, dependiendo del tipo de túnel, en muchos países, los cuales se consideraban muy difíciles de conseguir en túneles urbanos con altos niveles de tráfico. Los valores máximos de NO y NO2 se fijaban en 20 y 5 ppm respectivamente.

Es interesante observar la enorme cantidad de información específica de los túneles existentes incluida información detallada de geometría, tráfico, y características del sistema de ventilación, así como propuestas para la cuantificación del efecto pistón ocasionado por los vehículos en el túnel y la recomendación de la instalación de sistemas de detección y alarmas para situaciones de emergencia por altos niveles de CO en túneles con ventilación natural.

Hay que recordar que, en aquellos momentos, las soluciones con ventilación artificial de tipo longitudinal se basaban principalmente en la construcción de pozos de ventilación intermedios, en ocasiones con ventilación mecánica, o toberas Saccardo (por ejemplo, el túnel du Havre). De hecho, hasta principios de los años 60 no era habitual el uso de aceleradores para ventilación longitudinal y, aunque los primeros planteamientos teóricos ya se dieron con mucha antelación (17), no se emplearon con cierta frecuencia en proyectos de túneles (inicialmente de moderada longitud) hasta la década de los 60 en túneles de Alemania, Japón, Italia, entre otros.

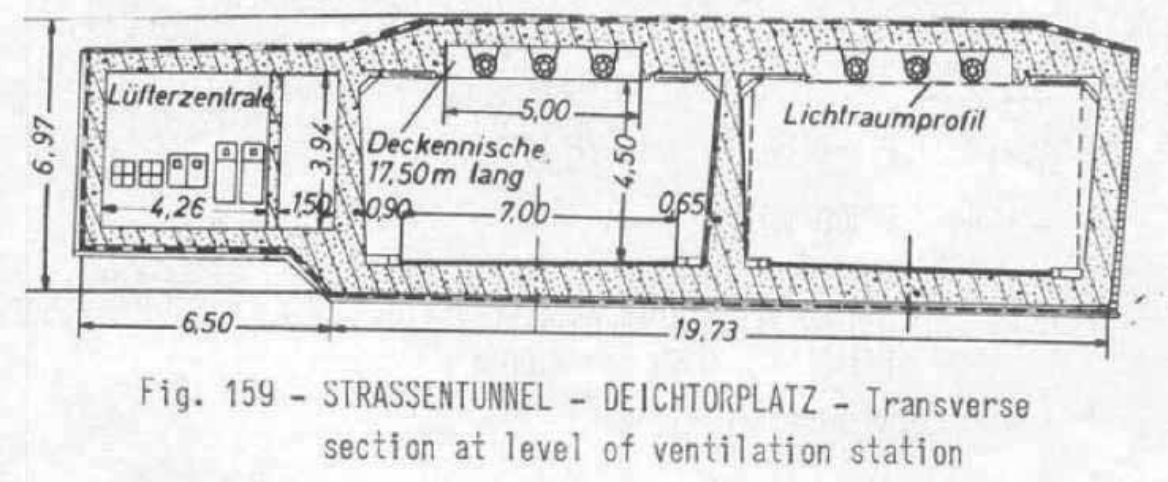


Fig. 159 - STRASSENTUNNEL - DEICHTORPLATZ - Transverse section at level of ventilation station

Sistema de ventilación longitudinal con aceleradores. Alemania (13)

Una vez establecida la metodología de recopilación de información, y gracias al incremento del número de países miembros el informe del Comité, la calidad y cantidad de información recopilada permitió generar informes aún más internacionales y de referencia. Así, el informe del Comité para el XIII Congreso de túneles, celebrado en Tokio en 1967, incluyó casi un millar de páginas (927), abarcado temas generales como el diseño de la obra civil, equipamiento y operación, pero sobre todo un análisis exhaustivo sobre ventilación de más de 200 páginas y una descripción exhaustiva (con casi 400 páginas) de las características del sistema de ventilación de túneles de todo el mundo.

En los capítulos específicos sobre la ventilación, además de las habituales contribuciones de los países miembros del Comité, se recogían aportaciones realizadas por el Publics Works Institute y el departamento de carreteras de Japón, país que se había unido al Comité con motivo del enorme auge en el diseño y construcción de túneles de cierta longitud en el país. De hecho, en la información aportada de constata la inauguración de más de 30 túneles con longitudes por encima de 1000 metros en tan sólo una década y media, incluidos algunos tan importantes como el de Enasan, de 8500 metros, Sasago, con casi 3000, Chiyoda, con unos 3600 metros y Omachi nº2, con casi 5.5 km.

Resulta curioso señalar que en el informe se incluye una contribución, referida a un programa de ensayos de la Autoridad Portuaria de Nueva York, en la que se menciona que "el modelo matemático ha sido modificado para permitir su programación en una computadora", lo que refleja una aplicación muy temprana de los modelos numéricos en este campo.

También es interesante observar la fuerte implantación ya en esa época de soluciones de ventilación longitudinal con aceleradores en túneles de cierta longitud sobre todo para reacondicionamiento de túneles existentes (como los de Tende y Mont du Chat en Francia) debido al fuerte incremento de los niveles de tráfico.

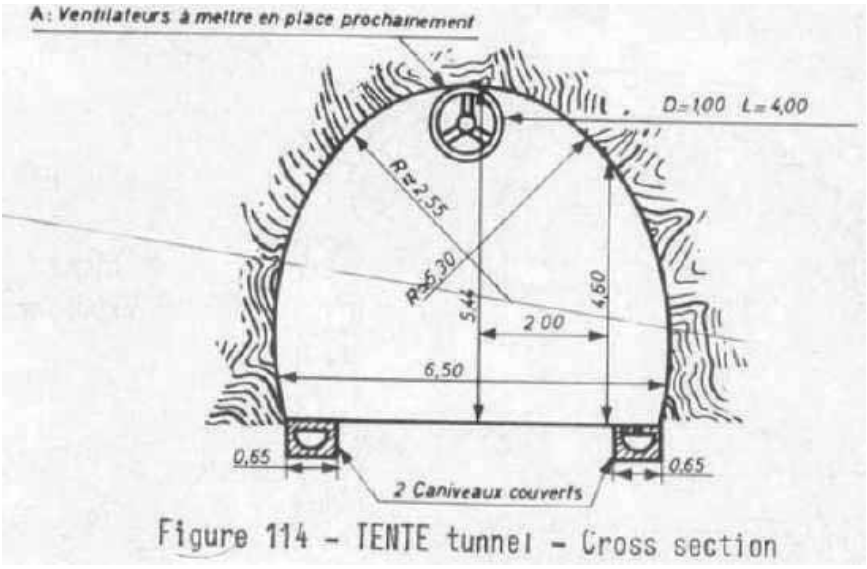


Figure 114 - TENTE tunnel - Cross section

Reacondicionamiento de sistema de ventilación longitudinal con aceleradores. Alemania (13)

Sin embargo, uno de los aspectos más interesantes del informe de 1967 fue la incorporación de un capítulo específico sobre seguridad en caso de incendio, donde se recopilaba el análisis de los resultados de los ensayos de fuego realizados en Suiza en el túnel de Ofenegg en mayo de 1965, con objeto de refrendar, entre otros aspectos, las conclusiones de los ensayos estadounidenses de la década de los 20 respecto de la ventaja de emplear sistemas de extracción de humos por techo. Sin entrar en detalles sobre estos ensayos (se puede encontrar información detallada en las páginas 363 a 379 de las actas de dicho congreso así como otras publicaciones posteriores) merece la pena destacar que permitieron establecer importantes criterios empleados como referencia en décadas posteriores, como por ejemplo, la conveniencia del uso de arquetas separadoras que eviten la propagación de la llama en colectores de drenaje de mercancías peligrosas, identificación de la distancia de 300 metros como elemento clave para la evacuación en caso de incendio o la iluminación de emergencia a baja altura para facilitar la evacuación.

Como aspecto de ámbito nacional, mencionar la inclusión del túnel de Guadarrama, de casi 3000 metros de longitud, inaugurado en diciembre de 1963 en el listado de túneles con ventilación semitransversal y el de Viella aún con ventilación natural a pesar de sus más de 5 kilómetros de longitud.

Un ciclo después, con objeto del XIV Congreso de la AIPCR celebrado en Praga en 1971, el Comité (reforzado con un miembro adicional de Austria, Bruno Freibauer) publicó nuevamente un detallado informe de más de 500 páginas recogiendo la información recopilada mediante cuestionarios sobre las características de obra civil, sistema de ventilación y explotación de túneles. Aunque la cantidad de información sobre ventilación es inferior a informes anteriores hay algunos detalles como la necesidad de limitar los niveles de monóxido en caso de realización de trabajos de mantenimiento, criterio que se sigue analizando hoy en día.

Posteriormente, en el año 1975 el Comité de Túneles (con motivo del Congreso Mundial de la AIPCR celebrado en México y reforzado por miembros de la República Federal de Alemania, Checoslovaquia, Argentina, Suecia y España) publica un nuevo informe de menor extensión que cubre entre otros, los aspectos de ventilación que son asignados por primera vez a dos grupos de trabajo específicos en contaminantes (liderado por el Dr. Ruckli de Suiza) y ventilación (liderado por el profesor Giannini, de Italia). Este informe establece los criterios para la determinación de las necesidades de ventilación en situación de servicio (tanto por monóxido de carbono como por visibilidad), que ha sido objeto de informes periódicos por parte del Comité hasta la actualidad. En cuanto a la ventilación, los temas principales fueron el uso de la ventilación longitudinal por aceleradores (insistiendo en la problemática de su uso en túneles bidireccionales, por las situaciones de incendio) y los métodos de ensayos de ventiladores de túneles.

4. CONFERENCIAS INTERNACIONALES ESPECIALIZADAS

Así como la creación en el año 1957 del Comité Internacional de Túneles de la AIPCR supuso un hito importante por la creación de un foro para la recopilación y diseminación de información asociada a la explotación de túneles de carretera y, especialmente, en el campo de la ventilación, en el año 1973 se celebra en Canterbury, el primer Simposio Internacional de aerodinámica y ventilación de túneles de vehículos, organizado por la British Hydromechanics Research Association (BHRA) Fluid Engineering, actualmente la BHRG, que supuso la creación de un foro fuertemente especializado para la discusión internacional en este campo. Es también especialmente interesante la publicación, en 1976, por esta misma asociación de uno de los más importantes libros de recopilación del estado del arte y revisión bibliográfica de la época (18).

Desde entonces, con una periodicidad de unos 3 años, se han venido celebrando estas conferencias en las que se presentan contribuciones desde ámbitos académicos, presentaciones de casos de estudio, innovaciones o análisis de ingeniería con representación internacional. En estas conferencias se han presentado artículos con gran repercusión en el ámbito de la ventilación y a su vez ha contribuido a aportar información de interés para los trabajos del comité de túneles de la AIPCR.

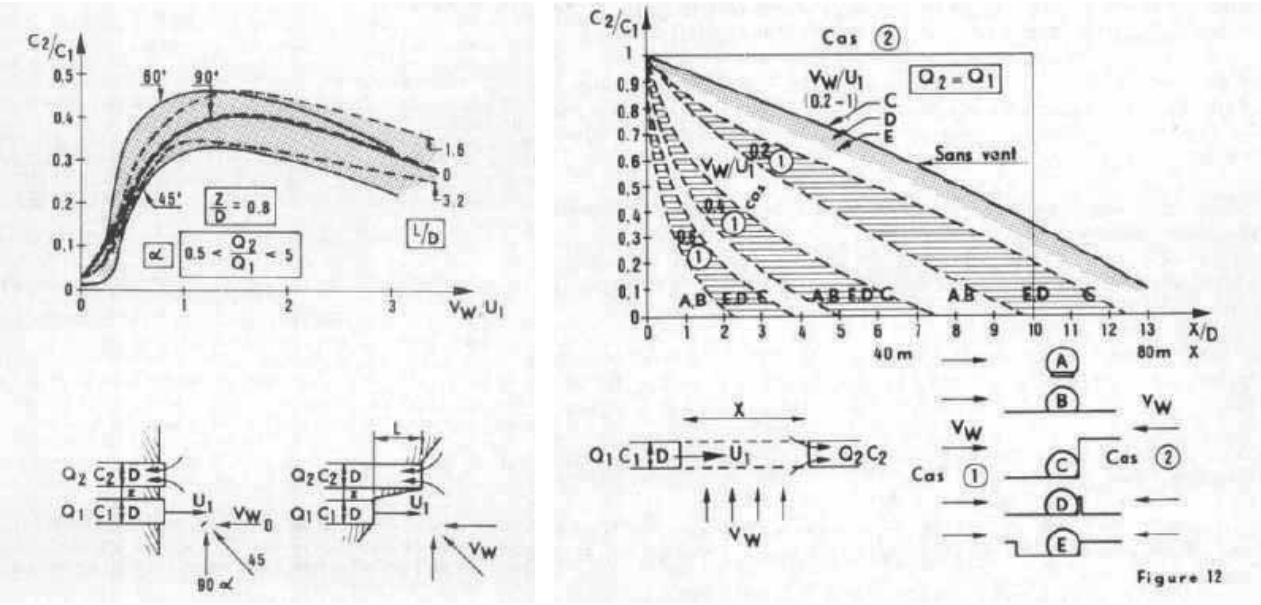
Así, por ejemplo, en el 2º Simposio celebrado en Cranfield en 1976 (19) se incluyeron contribuciones como la de Heselden, del Fire Research Station de Reino Unido, sobre la caracterización de los incendios y el comportamiento de los humos o presentaciones sobre algunos de los ensayos de incendio a escala real que se realizaron en esa década: los del túnel de Zwenberg realizados en 1975 por A.H. Feizlmayr de ILF, y los del túnel de Amikake en Japón realizados en 1975 y presentados por Kawamura, evaluando la efectividad de sistemas de extracción concentrada mediante el uso de compuertas motorizadas.

Es interesante destacar que una parte importante de las contribuciones presentadas en la edición de 1979 (20), celebrada en Sheffield, recogen resultados de ensayos bien a escala reducida o real, vía principal de adquisición del conocimiento en la época. De esos tiempos datan, por ejemplo, algunos de los estudios sobre rendimiento de los aceleradores en ventilación longitudinal (21) que se han empleado en el diseño de sistemas de ventilación durante muchas décadas.

Aunque no pretende este artículo realizar una revisión exhaustiva de todas las contribuciones, es interesante destacar la importancia que algunos de los artículos presentados han significado para los proyectistas de sistemas de ventilación, especialmente en países donde no existen recomendaciones específicas de ventilación o en los que la regulación es fuertemente prestacional (lo que requiere una permanente alimentación del estado del arte en la materia).

Así, por ejemplo, en la cuarta edición del Simposio (22) se encontraban propuestas interesantes para la aplicación de métodos numéricos al control de la ventilación de túneles en Japón (23) que mostraban, junto con otras contribuciones de este simposio, el comienzo de la utilización sistemática de modelos numéricos computacionales de tipo unidimensionales en el análisis de la ventilación (24), o el artículo precursor de Kennedy proponiendo el uso de la fórmula para la determinación de la velocidad crítica en túneles (25).

Por su parte, en el Congreso de la AIPCR de Viena del año 1979, el Comité decide mantener un único grupo de ventilación que fue liderado por A. Haerter, de Suiza hasta el año 1995. Entre los principales temas abordados, además de otros no específicos de ventilación como los túneles urbanos, se tratan nuevamente las necesidades de ventilación en situación normal y los criterios para la elección del tipo de sistema de ventilación, pero se profundiza en la problemática de las emisiones de contaminantes por las bocas y la recirculación de contaminantes entre bocas de tubos adyacentes y consecutivos, con ejemplos como los mostrados en la figura siguiente.



Recirculación de aire contaminado entre tubos adyacentes y consecutivos (26)

Como se ha observado, hasta la década de los setenta, los principales aspectos relacionados con la ventilación estaban asociados a la situación normal asociada a criterios de calidad del aire en el interior y en las bocas. Sin embargo, en el informe del Comité con ocasión del Congreso de 1983 en Sydney (27), se decide incluir un análisis más detallado de los incendios que habían tenido lugar en los años anteriores en varios túneles de cierta longitud: Billweder- Moorfleet en Alemania (1969), Velsen en los Países Bajos (1978), Nihonzaka en Japón (1979) y Guadarrama en España (1975), si bien se sigue considerando que se tratan de incidentes aislados

En relación con el uso de la ventilación para el control de los humos el informe concluye que "La selección del sistema de ventilación deberá tener en cuenta la posibilidad de un incendio. El operador deberá saber cómo ajustar la ventilación para aportar la máxima seguridad tanto para los usuarios como para los servicios de emergencia. Es necesario un 'programa' de ventilación para el caso de incendio". Resulta interesante observar las recomendaciones en cuanto a la ventilación - evacuación para túneles bidireccionales y el valor de 7 m/s como velocidad objetivo en túneles unidireccionales.

Length (km)	Minimum equipment
Up to 1	Reversible fans
1 – 1.5	1 emergency exit at the centre or 1 smoke evacuation point at the centre (min 200 m^3/s) Reversible fans
1.5 – 3	1 smoke evacuation point at the centre +2 emergency exits, one located at about ¼-⅓ of the tunnel length from each portal. If there are no emergency exits continuous smoke evacuation along the tunnel from 300 m from the tunnel portals (min 80 $m^3/s/km$) Reversible fans

If the minimum equipment shown in the table cannot be provided or if the tunnel is longer than 3 km, a reversible semi-transverse ventilation must be installed.

For tunnels with two tubes, with one-way traffic in each tube, the minimum provision is: reversible fans capable of producing a flow of air in the tunnel of 7 m/sec.

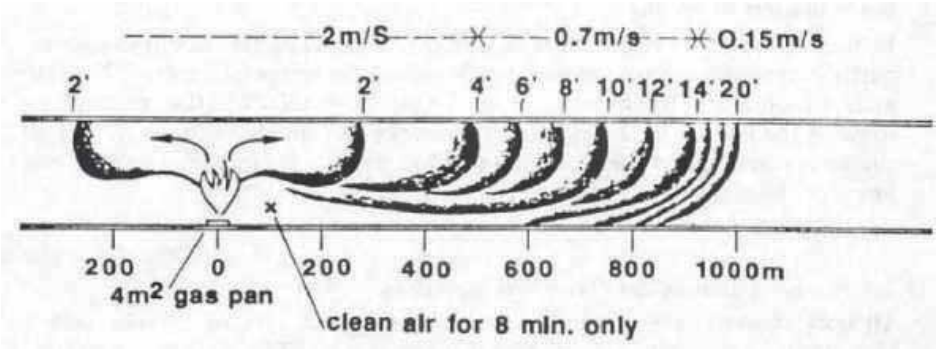
Recomendación sobre medidas de extracción de humos en túneles bidireccionales (27)

El informe también recoge referencias al sistema de clasificación y medidas de seguridad implementadas en Japón como resultado del incendio de Nihonzaka, donde debido al accidente entre 4 camiones y dos automóviles, fallecieron 7 personas quedando envueltos en el fuego un total de 173 automóviles (28).

5. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN COMPUTACIONALES

Como se ha explicado anteriormente, en la década de los ochenta se produce un incremento significativo del uso de herramientas de computación mediante modelos numéricos unidimensionales para la simulación del comportamiento de sistemas de ventilación en túneles, principalmente en modo normal de funcionamiento. Sin embargo, el mayor conocimiento del comportamiento del humo en caso de incendio y la identificación de la importancia de los efectos tridimensionales posibilitan más contribuciones en el campo de la modelización. Así, en el 5º Simposio del BHRA (29), celebrado en 1985, se presentan los primeros usos de modelos de campo (tridimensionales) por Kumar y Cox (30), empleando un modelo con ¡1566 celdas! y se avanza en el uso de modelos unidimensionales en el análisis del comportamiento de los humos (31) en caso de incendio.

Por su parte el informe del Comité de Túneles para el Congreso de la AIPCR de 1987, celebrado en Bruselas, aparte de la habitual actualización de metodologías para ventilación normal, dedica una parte importante a las estrategias de ventilación para la evacuación y la lucha contra el fuego, basándose en los resultados de distintos ensayos recientes de Offeneg, Zwenberg y túneles de Japón. Es interesante observar la realización de recomendaciones sobre criterios de dimensionamiento para la gestión del incendio como, por ejemplo, velocidades del aire de entre 3 y 6 m/s para evitar el retroceso de humos o la evolución de los humos observadas con velocidades en el túnel inferiores a 0.5 metros por segundo (ver figura siguiente).



Evolución de los humos para velocidades inferiores a 0.5 m/s (32)

Es interesante señalar que el informe del Comité (página 68) identifica la capacidad de los nuevos modelos tridimensionales para el análisis de este tipo de escenarios de forma complementaria a los ensayos a escala real ("…de forma que solo se realizarán ensayos para calibrar los modelos numéricos").

Aunque, como se ha explicado antes, hasta la década de los 80 se habían producido algunos incendios importantes en túneles de carretera, incluso con víctimas, los incendios de gran magnitud seguían considerándose eventos singulares y poco frecuentes. En la década de los 90, el incendio del túnel de Caldecott, en Estados Unidos, en el que se vio involucrado en el propio accidente un camión con tráiler transportando gasolina, reforzó la necesidad de revisar los criterios para el paso de mercancías peligrosas en túneles de carreta, si bien, en cuanto a la ventilación, la no activación de la ventilación (ni de forma manual por el operador ni automática) durante las primeras fases del incidente ya pusieron sobre la mesa la importancia de la formación del personal de la operación y el mantenimiento de los equipos de detección (33).

Por ello, durante el Congreso de 1991 celebrado en Marrakech (34), el Comité de túneles (que cuenta ya con unos 25 países de todo el mundo) dedica un esfuerzo importante al análisis del riesgo asociado al transporte de mercancías peligrosas por los túneles. Aunque no se trata de un aspecto específico de ventilación tendrá un impacto enorme en el desarrollo de las metodologías de análisis de riesgo que llegarían más adelante (proyecto conjunto con la OCDE). En esos momentos, tan sólo cuatro países (Reino Unido, Francia, Países Bajos y Alemania) emplean metodologías de análisis de riesgo para la toma de decisiones comparativa entre rutas que incluyen túneles de carretera.

6. ENSAYOS DE INCENDIO A GRAN ESCALA

Como se ha explicado anteriormente, a lo largo de las décadas de los 60 y los 70, se habían realizado algunas campañas de ensayos a escala importantes, pero siempre a nivel nacional. Sin embargo, a finales de la década de los 80, motivado también por la necesidad de abordar la problemática de los grandes incidentes en túneles (que estaban asociados principalmente a los causados por vehículos transportando mercancías peligrosas), se decide impulsar distintas acciones de gran envergadura para mejorar el conocimiento del que se disponía sobre el comportamiento de los incendios en túneles y los sistemas de ventilación.

Por una parte, a nivel europeo, se lanza el proyecto EUREKA 499 "FIRETUN" en el que intervinieron 9 países europeos y para el que se llevaron a cabo, entre 1990 y 1992 más de 20 ensayos a escala real en una galería abandonada de Noruega (Repparfjord). Los resultados del proyecto se presentaron en la conferencia internacional celebrada en Boras, Suecia (35) y aportaron una base de información muy importante respecto de las características reales en grandes incendios en túneles o el comportamiento de los humos y gases producidos.

En paralelo, en los Estados Unidos se lanza, con motivo del proyecto del Central Artery/Tunnel, el Programa de ensayos de incendio y ventilación del Túnel del Memorial (Memorial Tunnel Fire and Ventilation Test Program, MTFVTP), posiblemente el más ambicioso proyecto de investigación sobre sistemas de ventilación en túneles que se ha desarrollado a nivel mundial. Para llevarlo a cabo se empleó un túnel abandonado en el que se realizaron distintas modificaciones para ensayar las seis principales tipologías de ventilación, además de la ventilación natural. En total se llevaron a cabo 98 ensayos con piscinas de combustible desarrollando potencias de incendio entre 10 y 100 MW. Las conclusiones de informe de ensayos (36) no sólo sirvió como base de conocimiento clave en el campo, sino que han sido incorporados en distintas normativas (como la NFPA) y con un impacto definitivo en los principios empleados en los proyectos de ventilación en túneles.

7. INFORMES TÉCNICOS DEL COMITÉ DE TÚNELES DE LA AIPCR

El auge que el análisis de la problemática de los incendios tuvo en la década de los 90 se refleja claramente en las contribuciones del Comité de Túneles al Congreso de la AIPCR del año 1995, celebrado en Montreal, y en el hecho de que por primera vez se creó un grupo de trabajo WG6 sobre "Incendios y control de humos" liderado por D. Lacroix, diferenciado del grupo de trabajo sobre "contaminantes, medio ambiente y ventilación" aún liderado por A. Haerter. Adicionalmente se creó un grupo de trabajo sobre el transporte de mercancías peligrosas en túneles de carretera, que se encargó de apoyar el proyecto conjunto PIARC-OCDE que dio como resultado la creación de una metodología para la identificación y gestión del riesgo asociado a este tipo de transportes (37), así como el desarrollo del DG-QRAM (38), herramienta para uso en computadoras que sigue siendo de aplicación en numerosos países. Por su parte, las contribuciones del grupo de trabajo de ventilación en ese Congreso (39) se centraron en repasar los temas principales abordados sobre ventilación durante los quince años anteriores, mientras que el grupo de incendios se centró en el análisis de los objetivos de los sistemas de control de humos y lucha contra el fuego.

Es interesante señalar que, es a partir precisamente de este congreso, cuando el Comité de túneles inicia la publicación de informes técnicos sobre aspectos específicos, quedando las contribuciones del Comité a los Congresos Mundiales de la AIPCR limitadas a una exposición y discusión de las actividades del Comité duran-

te cada ciclo de cuatro años y la planificación de los trabajos de los ciclos siguientes. Es por ello por lo que, a partir de este punto, se hace referencia a los informes AIPCR como fuente principal de difusión de conocimiento en lugar de a las Actas del Comité a los Congresos.

De hecho, como resultado de las actividades del grupo de trabajo del Comité durante ese ciclo entre congresos y el siguiente, se prepara y publica el informe técnico del Comité sobre Incendio y Control de Humos en túneles (Fire and Smoke Control in Tunnels) (40), el cual se convirtió en una referencia fundamental en la materia.

8. CONSECUENCIAS DE LOS INCIDENTES CATASTRÓFICOS DE FINALES DE SIGLO XX

En este contexto de investigación en los aspectos de seguridad frente a incendio, se producen en Europa varios incendios muy importantes en túneles de gran longitud: los túneles de Mont Blanc (1999) y Frejus (2005) entre Francia e Italia de 11600 y 12900 m de longitud respectivamente, Tauern (1999) y Gleinam (2001) en Austria de 6400 y 8320 metros respectivamente y San Gotardo (2001) en Suiza de 16300 metros (41).

Número especial revista Roads/Routes (42)

A pesar de lo que pueda parecer, la ocurrencia de estos grandes incendios no supuso un fuerte impacto en los conceptos adquiridos en cuanto a la ventilación como herramienta de control de humos, ya que buena parte del conocimiento fundamental y los principios de ventilación habían sido ya adquiridos. Sin embargo, estos incidentes mostraron que la ocurrencia de incendios de gran magnitud era parecían más frecuentes de lo esperado y, sobre todo, que no estaban asociados al paso de mercancías catalogadas como peligrosas. El resultado principal fue la identificación de la importancia de plantear la seguridad frente a incendio de forma global siendo clave la identificación de la necesaria integración de todos los elementos que intervienen (operación, usuarios, vehículos e infraestructura). Estos principios se reflejaron en las recomendaciones UNECE (43) que dieron lugar a una revisión sustancial de las normativas nacionales e internacionales de distintos países, siendo el exponente principal en Europa la publicación de la Directiva Europea 2004/54 sobre requisitos mínimos de seguridad en túneles (44) cuyas transposiciones a las legislaciones normativas nacionales impli-

caron la renovación las normativas de seguridad aplicables a todos los túneles (no sólo a la red Transeuropea) y además sirvió de referencia a otros muchos países no europeos.

En el Comité de Túneles de la AIPCR, estos sucesos motivaron la publicación de un informe multidisciplinar que analiza los sistemas y equipamiento disponible para el control de los incendios y el humo en túneles de carretera (45) en el que comienza a identificarse las herramientas de análisis de riesgo como un elemento fundamental para analizar, de forma integrada, la seguridad del túnel. Es interesante destacar cómo la ventilación ocupa tan sólo 12 de las 243 páginas del informe, aunque sus apéndices contienen muy interesante información sobre la metodología de cálculo para el dimensionamiento de ventilación longitudinal con aceleradores (apéndice 12.3) y las compuertas de extracción en túneles con ventilación por conducto (apéndice 12.4).

Otra de las consecuencias de estos incidentes fue el lanzamiento de redes temáticas y números proyectos de investigación a gran escala (UPTUN, FIT, DARTS, SafeT, etc.). La cantidad de información recopilada y generada como resultado de estos proyectos de investigación fue ingente, con un total de 7 subgrupos que en total generaron más de 4500 páginas de información.

En este marco de investigación se suceden ensayos a gran escala en distintos túneles, como por ejemplo los del túnel de Runehamar en 2003, en los que con cargas no consideradas peligrosas (principalmente pallets de madera) se desarrollaron potencias de incendio muy importantes y que llevaron a reconsiderar las potencias de diseño establecidas en las normativas y recomendaciones internacionales. De igual forma, en otros países europeos se lanzaron otros ensayos a gran escala como los del Benelux en Holanda para profundizar en el funcionamiento combinado de los sistemas fijos de extinción y ventilación que ya se había explorado mediante ensayos y aplicado en otros países como Japón, Estados Unidos o Australia, sistemas que fueron especialmente importantes en el incendio del 2007 en el túnel de Burnley (46).

En estas fechas (2002) también se celebra en Austria, organizada por el Instituto de Termodinámica y sistemas de propulsión sostenible de la Universidad Tecnológica de Graz, la primera conferencia internacional sobre Ventilación y seguridad en túneles, que se convierte, junto a los celebrados por BHRG ya mencionados, en uno de los eventos principales para el intercambio de experiencias y conocimiento sobre ventilación a nivel internacional. El autor de este artículo recomienda, a cualquier lector interesado en este campo, la lectura de las actas de estas conferencias disponibles de forma gratuita en la red (47) y el artículo de resumen del Prof. Peter Sturm sobre las mismas (48).

9. DESARROLLOS NORMATIVOS

Como se ha explicado anteriormente, durante varias décadas se había ido produciendo una evolución de los criterios de ventilación desde considerarla una herramienta proyectada para mantener la calidad del aire (con los criterios de seguridad asociados), que puede y debe ser empleada de la mejor forma posible en caso de incendio, a una herramienta clave que debe ser proyectada para cubrir dichos escenarios. Es importante recordar que, con motivo de la reducción en los niveles de emisiones de los vehículos, es cada vez más habitual que los criterios de incendio condicionen el dimensionamiento de la ventilación frente a los de servicio.

Es también en esos años, cuando autoridades de distintos países se plantean la necesidad de recopilar, empleando normativas específicas de ventilación, la experiencia y buena práctica recopilada en los últimos años y así armonizar criterios y estandarizar la redacción de proyectos a nivel nacional.

En los Países Bajos, la primera recomendación para la ventilación de túneles fue elaborada por el Rijkswaterstaat y publicada por el Royal Institute of Engineers (KIVI) en 1975, y actualizada ya en 1991 (con un interesante enfoque probabilista), siendo finalmente ampliada y revisada en 2005 (49) más enfocada en la problemática de los túneles con ventilación longitudinal para túneles de doble tubo, habitual en ese país.

En Suiza, ya en 1983 se publica la directiva FEDRO (50) sobre principios de ventilación en túneles, aunque ha sido revisada sucesivamente hasta la versión más reciente de 2021 (51).

Por su parte Austria, ya en 1997 disponía de las guías para el diseño de ventilación de túneles de las RVS 9.261 y 9.262 (52), que se ha seguido actualizando hasta la actualidad (siendo las equivalentes actuales siendo RVS 09.02.31 en 2014 y la RVS 09.02.32 en 2020).

En Francia, en 2003, el Centro de Estudios de Túneles (CETU) publica el Dossier Pilote du Ventilation, específico para los temas ventilación (además de otros muchos temas relacionados como modelización, gestión medioambiental, etc.)

En otros países, en lugar de guías o estándares independientes y específicos de ventilación, se opta por incorporar capítulos o secciones dentro de documentos generales de túneles o seguridad en túneles. Así, por ejemplo, en Estados Unidos si bien existían versiones ya desde la década de los 70 es en los años 90 (sobre todo la edición del 98 donde se integran los resultados de los ensayos del Memorial Tunnel) cuando se convierte en un estándar que incluye un capítulo completo sobre ventilación de emergencia, habiéndose actualizado por última vez en el año 2020 (aunque es de esperar que en las fechas de celebración del congreso se haya publicado la versión del 2022). De igual forma, en el Reino Unido la BD 78/99, del año 99, ya incluye el capítulo 5 sobre ventilación que, con 30 páginas, aunque con criterios más prestacionales, es equivalente a las recomendaciones de las que disponían otros países. Esta normativa ha sido sustancialmente revisada en 2020 en el capítulo 5 (requisitos de ventilación) del CD352 – Design of Road Tunnels.

En este punto resulta conveniente destacar un aspecto muy importante respecto de los requisitos de ventilación incluidos en las normativas de los distintos países. Por una parte, algunos de ellos (como por ejemplo Francia o Austria) establecen requisitos fuertemente prescriptivos donde se definen con cierto grado de detalle no sólo los criterios de selección del tipo de sistema de ventilación a proyectar (normalmente en función de las condiciones y niveles de tráfico, la longitud del túnel y el grado de supervisión) sino la metodología de cálculo a emplear o los principales criterios de dimensionamiento (potencia de incendio, velocidad mínima en ventilación longitudinal, capacidad de extracción, etc.)

Por el contrario, otros países presentan metodologías con enfoques más prestacionales (p. e. NFPA, CD352) en los que el proyectista debe demostrar el cumplimiento de unos objetivos de seguridad, confort, etc.

Por último, existen otros muchos países en los que, o bien no existe normativa, o en los que, como en España, se definen unos objetivos globales y algunos criterios prescriptivos mínimos (como la potencia mínima de incendio). En estos casos los proyectistas necesitan apoyarse en recomendaciones o guías de diseño de otros países, así como en informes o documentos de buena práctica internacional, siendo el Comité de Túneles de AIPCR una de las referencias de mayor uso en la actualidad.

La mayoría de estas normativas prestacionales, para poder cumplir el objetivo del control de los humos en caso de incendio, requieren adoptar una visión integral de todos los sistemas del túnel, y emplear herramientas de cuantificación del nivel de seguridad alcanzado para demostrar su cumplimiento. Es este entorno el que crea la necesidad de las herramientas de análisis de riesgo. En el caso de las normativas prescriptivas los análisis de riesgo se suelen emplear como herramienta para identificar peligros no estándar (es decir que no han podido ser considerados en los criterios prescriptivos) y proponer medidas de mitigación complementarias.

10. ANÁLISIS DE RIESGO

Como se explicó anteriormente, el uso de modelos de análisis de riesgo ya se aplicaba en distintos países, principalmente para abordar la problemática del transporte de mercancías peligrosas por túneles de carretera (no hay que olvidar que estas metodologías surgieron precisamente para evaluar la seguridad en plantas y procesos en sectores como el químico). Algunos de ellos, como Países Bajos, Suiza o Noruega, ya

empleaban este tipo de herramientas con un propósito más general mientras que en otros, como Reino Unido o Estados Unidos, el propio planteamiento prestacional llevaba a incorporar los análisis de riesgo como herramienta de demostración de la mitigación requerida del riesgo. En cualquiera de estos casos, sin embargo, no existían metodologías armonizadas a nivel nacional sino implementadas a nivel de proyecto.

En este contexto, la incorporación en la Directiva Europea de los análisis de riesgo como elemento clave para la evaluación de la seguridad de un túnel, hace que se consoliden o desarrollen metodologías en numerosos países, como por ejemplo la TURISMO en Austria, implementado a nivel normativo (51), o el método IRAM en Italia, además de otros países donde su uso ya estaba consolidado (53). A su vez, el Comité de Túneles de la AIPCR publica un informe específico sobre este tema (54), que sería complementado en la década siguiente por una versión revisada y mejorada (55), añadiendo los conceptos de evaluación del riesgo (que implica la definición de criterios de aceptación) y sus implicaciones en los estudios coste-beneficio.

En España, en mayo de 2012 se aprueba la metodología de análisis de riesgo en túneles de la Red de Carreteras del Estado, conocida como MARTE, que integra los modelos de propósito general con los modelos para el transporte de mercancías peligrosas, basado en la metodología DG-QRAM anteriormente mencionada.

Hay que señalar que, a pesar de que la propia Directiva Europea 2004/54/CE en su artículo 13 sugiere la adopción de una metodología común armonizada, en la actualidad cada país emplea la metodología definida a nivel nacional.

11. OTROS OBJETIVOS RELACIONADOS CON LA VENTILACIÓN

Ya en el primer informe del Comité de Túneles, elaborado por Sir Alan Muir Wood en 1995 (56), cuando se describían los objetivos fundamentales de la ventilación, se mencionaban el garantizar la calidad del aire en el interior del túnel y el control de los humos en caso de incendio, atendiendo también a los aspectos medioambientales, que pueden condicionar incluso el tipo de solución conceptual a implementar. Todos ellos se planteaban desde la búsqueda de la eficiencia económica necesaria en este tipo de infraestructuras.

En cuanto a la ventilación en situación normal, aparte de las continuas adaptaciones que se han realizado de los informes técnicos sobre las necesidades de ventilación en 2004, 2012 y la última en 2019 (57), el comité dedicó en 2008 un documento específico a abordar las posibilidades para optimizar la calidad del aire en el entorno de los túneles (58), recopilando el estado actual en cuanto a los medios disponibles: planificación estratégica, técnicas de dispersión, tecnologías de filtrado de contaminantes, control de tráfico o medidas de explotación.

En el ámbito del control de humos, los incidentes de túneles alpinos mencionados anteriormente vuelven a poner el foco en la importancia del control de la ventilación durante los incidentes. Como se ha indicado anteriormente, tras el incidente del túnel de Caldecott se destacaron las consecuencias negativas de la falta de activación de la ventilación, pero fueron las lecciones aprendidas como resultado de los incidentes más recientes (tanto la positivas cuando la respuesta es adecuada, como las terribles consecuencias en caso contrario) las que plantearon la necesidad de poner un énfasis especial en el control de la ventilación. Así, durante la primera década del 2000 el Comité de Túneles desarrollo un informe específico sobre las estrategias de ventilación que fue publicado en 2011 (59).

Adicionalmente a estos objetivos específicos del sistema de ventilación, empiezan a surgir otros aspectos generales, como por ejemplo las estrategias de mantenimiento y su importante peso en los costes globales (construcción y explotación) del túnel. Así, a lo largo de las dos décadas siguientes se publican distintos informes del Comité de la AIPCR sobre gestión del mantenimiento (60), análisis del ciclo de vida (61) y (62) y aplicabilidad de los conceptos RAMS al diseño del túnel (63).

12. SITUACIÓN EN ESPAÑA

Como se ha indicado anteriormente, España se incorporó al comité de túneles de la AIPCR en el ciclo 1972-1975, siendo los túneles de Viella, la Cumbre, los túneles de Guadarrama I y II y Malmasín los más importantes, por su longitud, hasta esas fechas. Sin embargo, en la década de los 80 y 90 se proyectan, construyen o abren al tráfico numerosos túneles con longitudes por encima de los 3000 metros incluyendo, entre otros, los de Cadí, Negrón (I y II) o el túnel binacional del Somport, entre España y Francia, que con sus 8600 metros se convierte en el túnel más largo del país.

La ausencia de normativas nacionales en el campo implica a los técnicos del país, la necesidad de realizar un esfuerzo por conocer y estudiar las buenas prácticas y normativas internacionales, lo que motivó la realización de Jornadas técnicas sobre túneles, siendo las celebradas en Gijón en 1994 (64) sobre la seguridad en la construcción y en servicio.

En estas jornadas, además de poder contar con contribuciones de países punteros incluyendo el Ingeniero A. Caserta de la Federal Highway para presentar los resultados del MTFVTP anteriormente citados, se presentaron ponencias sobre distintos estudios internacionales, la experiencia de la explotación de los túneles existentes (Cadí, Malmasín, Lorca, Guadarrama, San Juan, , etc.) o las primeras experiencias del uso de modelos CFD tridimensionales para su aplicación en el proyecto de la ventilación (65). Entre los ponentes de esas jornadas se encontraban grandes Ingenieros que han sido una referencia para todos los que nos hemos dedicado a al campo de la seguridad en túneles.

Desde esta primera ocasión, y en el periodo de cuatro años entre Congresos Mundiales de la Carretera, el comité de túneles de la ATC (creado en 1984, como comité espejo del internacional) ha venido organizando jornadas técnicas en la que se recogían las experiencias obtenidas de la explotación, compartía las investigaciones y estudios realizados en los proyectos de túneles e identificaba los nuevos desafíos futuros. Esta serie de conferencias se ha continuado con esta 2ª Conferencia International de PIARC sobre la explotación y la seguridad de los túneles de carretera y VIII Simposio Nacional de Túneles, que se celebrará en Granada en octubre de 2022 y que ha motivado la redacción de este artículo.

En el ámbito normativo, en España se realizó la transposición de la Directiva Europea incrementando los requisitos exigidos y extendiéndola no sólo a los túneles de la Red Transeuropeas sino a los túneles de la Red de Carreteras del Estado, mediante el Real Decreto 635/2006 (66). En éste, se establecen una serie de requisitos mínimos, en función del tipo de tráfico (unidireccional o bidireccional) y sus niveles, su longitud y si es o no un túnel urbano, incluyendo la definición de en qué casos la ventilación es un requisito obligado. Además, especifica el incendio mínimo de diseño (30 MW) y la necesidad de disponer un sistema de ventilación independiente para las galerías de evacuación. Es importante destacar que, tanto la ausencia de una normativa específica de ventilación nacional, como el hecho de que para túneles bidireccionales como unidireccionales con congestión (que dispongan de ventilación mecánica) se proponga la utilización de un análisis de riesgo si se quiere emplear un sistema longitudinal, obligan al proyectista a realizar un diseño fuertemente prestacional. Para el desarrollo de los análisis de riesgo, se cuenta con la metodología de análisis de riesgo MARTE mencionada más arriba.

Otras administraciones con competencias legislativas en túneles de carretera, como por ejemplo la Diputación Foral de Vizcaya, han desarrollado también Instrucciones técnicas de Seguridad y Explotación de Túneles de Carretera (67)

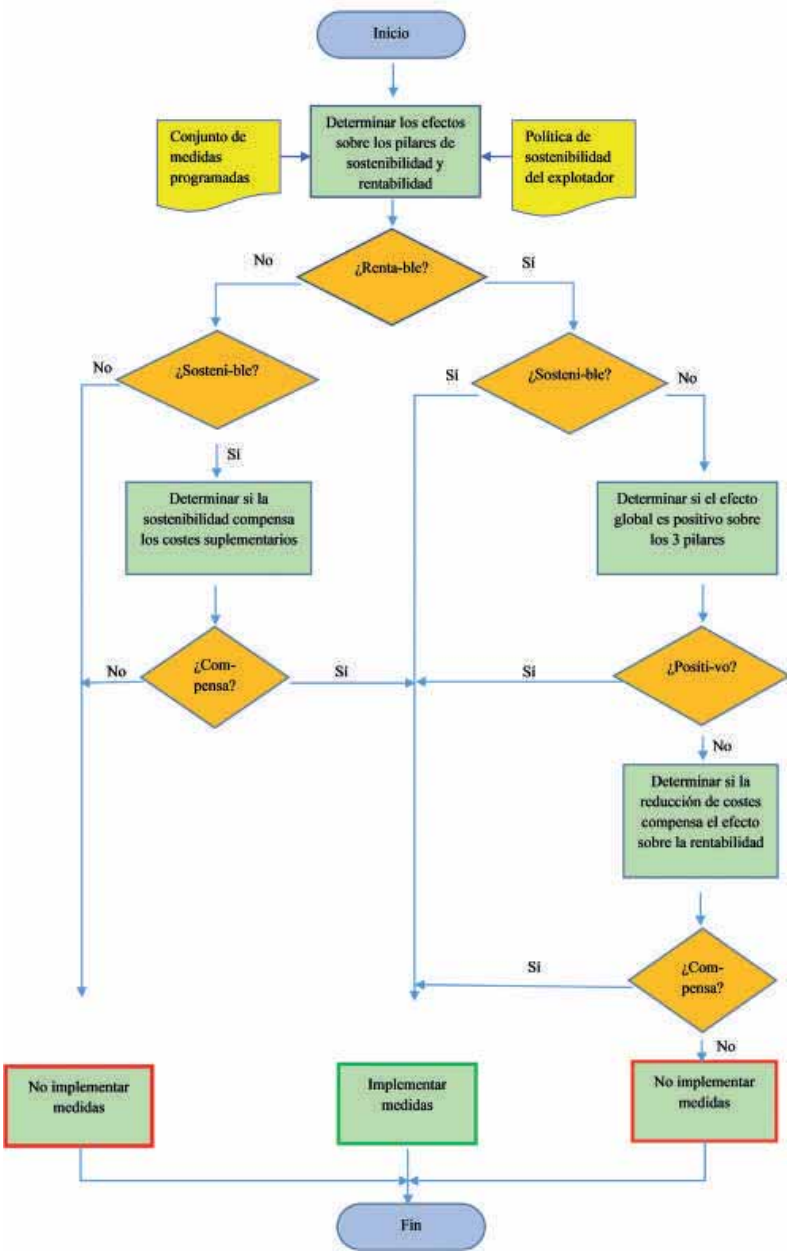
13. SOSTENIBILIDAD Y OBJETIVOS AGENDA 2030

A pesar de que la consideración del concepto de sostenibilidad en el ámbito de túneles puede parecer reciente, en la sesión del Comité Técnico de Túneles del Congreso de 1991, en Marrakech (34), su presidente, Sir A. Muir Wood ya expuso, entre los tres temas a abordar en los futuros trabajos el de la sostenibilidad, como

"un concepto ya abordado en el siglo anterior aplicable tanto a la sociedad como a la ecología (donde se usa principalmente en la actualidad)".

Aunque los aspectos medioambientales y económicos ya se habían abordado en el comité es finalmente, en el ciclo 2012-2015, cuando en el Plan Estratégico de la AIPCR se incluye el tema de la sostenibilidad en la explotación de túneles de carreteras para el comité de túneles TC3.3, bajo la presidencia del autor de este artículo. Como resultado de los trabajos de ese ciclo en 2017 se publica el informe (68) que plantea el primer enfoque sobre sostenibilidad a la explotación de túneles.

Entre otros aspectos, el informe analiza la importancia que tienen las distintas fases de la vida de un túnel (planificación, proyecto, construcción, explotación) en los tres pilares de la sostenibilidad: económico, social y medioambiental y además propone metodologías para la toma de decisiones en cuanto a la identificación e implementación de medidas de sostenibilidad.



Número especial revista Roads/Routes (42)

Sin embargo, la aprobación por la Asamblea General de la ONU en el año 2015 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la correspondiente Agenda 2030 hace necesario impulsar para la implementación de los objetivos en todos los ámbitos, incluidos los túneles.

14. LOS ODS Y LA VENTILACIÓN DE TÚNELES

Aunque los ODS se vienen considerando en el desarrollo de numerosos proyectos de túneles, y esto incluye las implicaciones que el proyecto del sistema de ventilación tiene en el cumplimiento de estos objetivos, en general los planteamientos suelen pasan por contemplar el impacto sobre el consumo energético, aspecto que, por motivaciones puramente económicas, ya forma parte de los objetivos a tener en cuenta en el diseño del sistema.

Por ejemplo, en las conferencias del BHRG mencionadas anteriormente como referente en temas de ventilación, hasta la edición de 2019 no se encuentran referencias al término sostenibilidad y en esos casos asociándose principalmente a una reducción del consumo. Tan sólo en la edición de 2019, es posible encontrar una contribución al beneficio social (mediante la reducción de exposición a contaminantes en las proximidades de las bocas) se puede alcanzar con una modificación de la operación sobre la ventilación (69). Sin embargo, en la edición celebrada en septiembre de 2022 (unas pocas semanas antes de la celebración de este congreso) su programa incluía una sesión específica titulada "Hacia el diseño sostenible de sistema de ventilación", además de una interesante sesión de debate sobre el tema de si la huella de carbono asociada al ciclo de vida completo por la instalación de grandes sistemas de ventilación compensa los beneficios de seguridad que pueden aportar.

Por su parte, ya en la 10ª Conferencia Internacional sobre Seguridad en Túneles del año 2020 en Graz, ya se incluyeron interesantes contribuciones respecto de la sostenibilidad, pero también desde un punto de vista cercano a la eficiencia energética (70).

Ha sido en la edición de este mismo año 2022, en la que los aspectos de la ventilación y los ODS se han abordado con detalle. Así, merece especial atención la contribución del Prof. A. Dix sobre la ventilación de los túneles y los objetivos 2030 (71).

Al igual que sucedió en periodos anteriores de la historia con los desafíos y nuevos objetivos asociados con la ventilación, es ahora necesario realizar un esfuerzo adicional para poder incorporar los ODS a este campo. Por ello, aprendiendo de las experiencias del pasado, parece evidente que será necesario seguir el mismo camino que pasa por la implementación, análisis y estudio dentro de los desarrollos de los proyectos, pero sobre todo la puesta en común en los foros especializados (congresos, informes, etc.) y la incorporación en las normativas nacionales y organismos internacionales específicos.

Es de esperar que estas Jornadas brindarán la oportunidad de conocer los avances en este campo y comenzar a establecer el marco de conocimiento para integrar estos objetivos lo antes posible.

A diferencia de lo que sucedía en generaciones pasadas el flujo de información y la velocidad en su diseminación a nivel mundial alcanza niveles sin precedentes. Las generaciones actuales de ingenieros especialistas en ventilación tenemos la oportunidad de aprovechar esta ventaja para recoger el guante e introducir en los proyectos de sistemas de ventilación los objetivos de la agenda 2030. Y no sólo la oportunidad sino la obligación de aceptar este compromiso. No la desaprovechemos.

15. DESAFÍOS PARA LA OPTIMIZACIÓN

A lo largo de este artículo se ha descrito cómo han ido variando, a lo largo de las décadas, los objetivos que ha tenido que emplear un especialista de ventilación para poder desarrollar un proyecto cumpliendo dichos objetivos.

De hecho, un diseño de ventilación se podría considerar óptimo si fuese capaz de alcanzar sus objetivos específicos, todos los requisitos normativos y concretos del cliente para ese proyecto, si los hubiese, y a la vez minimizando los costes globales y de explotación del sistema. Sin embargo, lo que podría considerarse un éxito de disciplina en absoluto tiene por qué ser un éxito global del proyecto, ya que la optimización o eficiencia debe serlo para el conjunto del mismo. Una de las dificultades habitualmente en los proyectos es encontrar equipos integrados donde el "óptimo" global prime sobre los "óptimos" individuales. En este caso el especialista de ventilación debe hacer un gran esfuerzo de comprensión de la problemática conjunta y de integración. Esta labor de visión global multidisciplinar es clave durante las fases de planificación, donde las decisiones sobre la solución conceptual de ventilación afectan enormemente a la obra civil y a los posteriores condicionantes durante la explotación, y es uno de los mayores desafíos del ingeniero de ventilación donde es necesaria una combinación importante de conocimientos con experiencias previas. Sin embargo, este trabajo de tipo cualitativo es el que más se suele trabajar en los proyectos y donde hay un camino muy importante que recorrer para la integración de los ODS.

Sin embargo, en las fases siguientes de proyecto de detalle suele ser habitual considerar que el diseño ya está muy "cerrado" y que, en el fondo, diseñar es emplear las herramientas de simulación para demostrar el cumplimiento de los requisitos de proyecto. En esta fase, identificar y posteriormente integrar los ODS como objetivos del diseño es complejo.

A modo de ejemplo, si se quisiese realizar el diseño de un sistema de ventilación longitudinal (a priori el más sencillo de realizar) el diseñador debería seguir unos pasos estándar que simplificando podrían ser los siguientes:

- adoptar una serie de criterios de diseño principales: por ejemplo, en ventilación normal los valores admisibles de calidad del aire, en incendio la velocidad objetivo o la potencia de incendio, etc.
- identificar y caracterizar los datos de partida: por ejemplo, los niveles de tráfico, las condiciones ambientales, etc,
- proponer la metodología de cálculo: la selección de una serie de escenarios de comprobación, posiciones de incendio, distribuciones de tráfico, tiro natural, etc. También el tipo de herramienta (analítica, modelos 1D, modelos 3D, etc.)
- plantear una serie de alternativas: por ejemplo, distribuciones de aceleradores a lo largo del túnel, tamaños de equipos, empujes, etc.
- evaluarlas para comprobar el cumplimiento de los criterios: verificando si se cumplen los criterios de aceptación (calidad del aire, control de humos, medioambientales, etc)
- Seleccionar aquellas que optimizan la solución (idealmente en términos de costes fijos o globales),

En general, hasta ahora, uno de los objetivos era el más desfavorable y su cumplimiento garantizaba el de los otros (como se ha ido viendo a lo largo del artículo por ejemplo inicialmente era la ventilación de calidad del aire y hoy en día el control de humos). De hecho, si se pudiese "asignar" un índice a cada objetivo se podría comprobar el cumplimiento de un índice de confort o un índice de riesgo de incendio.

Sin embargo, los objetivos sobre la ventilación derivados de los ODS, a priori y simplificando mucho, son inversos a los anteriores. Si se analiza ese mismo sistema de ventilación longitudinal con un "índice" de sostenibilidad, exagerando el análisis, éste sería mucho mejor si no se dispusiesen equipos de ventilación. Evidentemente, una primera aproximación sería identificar, a partir de la solución escogida que cumpla el resto de los objetivos, aquellos factores que pueden "mejorar" la sostenibilidad como por ejemplo máquinas más eficientes (en las referencias mencionadas a lo largo de este artículo ya pueden encontrarse numerosos artículos en este sentido) pero esto no dejaría de ser una mejora tangencial.

Sin embargo, un enfoque ambicioso pasaría por una revisión de los criterios de diseño a adoptar. En países con normativa prescriptiva el margen del proyectista es menor y serían las administraciones y los reguladores los que podrán, mediante la revisión de los criterios de seguridad decidir cuánto es posible reducir los ni-

veles de seguridad (sabiendo que la seguridad absoluta no existe) y el beneficio alcanzable en aspectos de sostenibilidad.

En países con normativa prestacional la situación es más compleja porque si se deja al proyectista la decisión de justificar la solución "segura y sostenible" parece razonable que se decantará por primar los aspectos de seguridad (por las posibles implicaciones legales frente a los de sostenibilidad).

Esto mismo sucede en países, como España, en los que no existe normativa específica de ventilación (y por tanto es el proyectista el que debe asumir la responsabilidad del cumplimiento de los aspectos de seguridad).

Es por tanto necesaria una reflexión sobre lo lejos que se pueden incorporar los ODS.

16. CONCLUSIONES Y DESAFÍOS FUTUROS

Este artículo pretende mostrar cómo los especialistas en ventilación han tenido un papel clave para adaptar los nuevos objetivos identificados en el proyecto de túneles de carreteras, desarrollando y empleando las herramientas de análisis necesarias para su cumplimiento. Cada vez más esa tarea depende de muchos otros equipos multidisciplinares de sistemas e instalaciones y con necesidad de conocimientos transversales: RAMS, seguridad, análisis de riesgo, medio ambiente, etc.

La reciente incorporación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible supone un desafío que, en algunos casos, requerirá cuestionar o revisar algunos de los otros objetivos actualmente contemplado. Pero son los especialistas de ventilación los únicos que están en disposición de identificar qué hacer para integrarlos.

No obstante, no sería justo pensar que esta labor es exclusiva de los ingenieros de ventilación. Organizaciones como la AIPCR se encuentran en una posición inmejorable para recopilar, analizar y valorar las posibles actuaciones, compartiendo la información para su discusión y consideración internacionalmente, pero, sobre todo, permitiendo a otros países con menor experiencia en el campo de los túneles incorporarlos en sus proyectos y normativas nacionales.

Por último, no debería olvidarse el importantísimo papel que las normativas nacionales tienen en la incorporación de requisitos específicos a considerar en el proyecto. La ausencia de normativa específica de ventilación facilita, por una parte, que los proyectos no incorporen los ODS en el diseño de la ventilación, y por otra, dificultan al proyectista para, de forma unilateral y personal, decidir respecto de la importancia que los objetivos de sostenibilidad tienen frente a los de aceptación de riesgo (que en muchas ocasiones son contrapuestos).

17. AGRADECIMIENTOS

No quiero finalizar este artículo sin agradecer al CEMIM de la FFII y a la ETSII de la UPM el permitirle acceder al excelente fondo bibliográfico sobre ventilación y seguridad de túneles, especialmente las actas de los congresos BHRA, actualmente solo disponibles en formato papel. También quiero agradecer a todos esos miembros de los comités nacionales e internacionales con los que ha compartido durante décadas el entusiasmo e interés por los temas de explotación y seguridad en túneles. De todos ellos, especialmente al Ingeniero D. Rafael Lopez Guarga, con quien ha compartido más de 20 años de participación en el Comité Internacional, sin cuyo apoyo y vocación no habría podido disfrutar de esa trayectoria experiencia. Y por último a mi gran maestro, el Profesor D. Enrique Alarcón Álvarez, por inculcarme no sólo un enorme espíritu de esfuerzo, sino la pasión por el conocimiento, no sólo en ventilación o seguridad sino en otros muchos aspectos de la ingeniería y las humanidades.

18. REFERENCIAS

1. The Laurion shafts, Greece: ventilation systems and mining technology in antiquity. Herbach, Richard, Rosenthal, Patrick y Morin., Denis E. J. s.l. : Historical Metallurgy Society, 2012, Vol. Historical metallurgy.
2. De Re Metallica de Geourgios Agricola. Bauer, Georg. 1556.
3. Engineer suffocated in Tunnel. Los Angeles Herald. 1904, Vol. XXXII, 9.
4. La tragedia nella galleria del Ricken, in Isvizzera. La Domenica del Corriere. 1926, Vol. XXVIII, 42.
5. The world's worst train disasters. Railway-technology. 2014.
6. Historia y funcionamiento de los sistemas de ventilación en túneles de carretera. Abella, García-Arango, Hacar. s.l. : Obras y Proyecto, 2021, Vol. 29.
7. King, Pursall et. The Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. s.l. : BHRA fluid engineering, 1976.
8. Panic, deadly fumes inside the Liberty Tunnels. Pittsburgh Post-Gazelle. 1927.
9. Ventilation of Vehicular Tunnels,. Singstad, O. Tokyo : World Engineering Congress, 1929.
10. XII Congreso Mundial de la Carretera. Roma : AIPCR, 1964.
11. XI Congreso Mundial de la Carretera. Rio de Janeiro : s.n., 1959.
12. Great Vehicular Tunnel Under Hudson Opens Soon . Buffalo Courier Express. . 1927.
13. XIII Congreso Mundial de la Carretera. Tokio : s.n., 1967.
14. XIV Congreso Mundial de la Carretera. Praga : s.n., 1971.
15. Abella, García-Arango, Hacar. Túneles de Carretera: Seguridad, Normativa, Instalaciones y Explotación. 2020.
16. Underwritters, National Board of Fire. The Holland Tunnel chemical fire. New York : s.n., 1949.
17. Investigation on an improved jet blower for tunnel ventilation. Henschke. Berlin : s.n., 1937.
18. Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. King, Pursall et. Canterbury : BHRA Fluid Engineering, 1973.
19. Proceedings of the Second International Simposium on The Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Cambridge : BHRA Fluid Engineering, 1976.
20. Proceedings of the Third International Simposium on The Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Sheffield : BHRA FLuid Engineering, 1979.
21. The friction losses on walls caused by the jet flows of booster fans. Rhone, E. Paper C1, Sheffield : BHRA FLuid Engineering, 1979.
22. Proceedings of the Forth International Simposium on The Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. York : BHRA Fluid Engineering, 1982.
23. A new ventilation method for the Kan-etsu Road Tunnel. Ohashi, Mizuno, Nakahori, Ueki. A3, York : BHRA Fluid Engineering, 1982.
24. Study on a road Tunnels ventilaton system nased on the ocntinuous mechanical extraction and the natural distributed supply. Moret. York : BHRA Fluid Engineering, 1982.

25. Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood Canyon Tunnels. Kennedy, Danzinger &. York : BHRA Fluid Engineering, 1982.

26. XVI Congreso Mundial de la Carretera. Viena : s.n., 1979.

27. XVII Congreso Mundial de la Carretera. Sydney : s.n., 1983.

28. Horikawa, Masahiko Kunishima & Kenich. The fire disaster in the Tokyo-Nagoya Nihon-zaka tunnel. 1979.

29. Proceedings of the Fifth International Simposium on The Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Lille : BHRA Engineering, 1985.

30. Matematical modelling of fires in road tunnels. Cox, Kumar &. Lille : BHRA Engineering, 1985.

31. Emergency operation of ventilation for the Kan-Etsu Road Tunnel. Mizuno, Ohashi, Nakahori & Okubo. Lille : BHRA Fluid Engineering, 1985.

32. XVIII Congreso Mundial de la Carretera . Bruselas : s.n., 1987.

33. Highway accident Report - Multiple Vehicle Collisions and Fire Caldecott. s.l. : U.S. National Transportation Safety Board, 1982.

34. XIX Congreso Mundial de la Carretera . Marrakesh : s.n., 1991.

35. Proceedings of the Intenational Conference on Fires in Tunnels . Boras : SP REPORT, 1994.

36. Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program – Test Report. s.l. : Massachusetts Highway Department and Federay Highway Administration, 1995.

37. PIARC, OCDE -. Safety in Tunnels - Transport of dangerous goods through road tunnels. 2001.

38. PIARC. https://www.piarc.org/es/PIARC-Base-Conocimiento-Carreteras-y-Transporte-Por-Carretera/Infraestructura-Vial-Resiliente/Tuneles-Carretera-Explotacion/software-qram. [En línea]

39. XX Congreso Mundial de la Carretera. Montreal : s.n., 1995.

40. Fire and Smoke Control. s.l. : PIARC, 1999.

41. A comparative analysis of the Mont Blanc, Tauern and Gotthard Tunnel Fires. Dix, Voeltzel &. s.l. : Routes/Roads, 2004, Vol. 324.

42. Fire Safety in Tunnels. 324, s.l. : ROUTES/ROADS, 2004, Vols. IV-2004.

43. Tunnels, Ad hoc Multidisciplinary Group of Experts on Safety in. Recommendations of the group of experts on safety in Road Tunnels - Final Report. s.l. : United Nations Economic Commission for Europe, 2001.

44. 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. s.l. : DOUE, 2004.

45. Carretera, Comité C3.3 de Explotación de Túneles de. Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels. s.l. : AIPCR, 2007.

46. Dix, Arnold. Expert report for the Victorian Coroner - The fatal Burnley Tunnel Crashes . 2007.

47. https://www.tunnel-graz.at/archive/. [En línea]

48. Tunnel Ventilation and Safety, 10 conferences - The story so far. Sturm, Prof. Peter. Graz : 11th International Conference "Tunnel Safety and Ventilation", 2022.

49. AANBEVELINGEN VENTILATIE VAN VERKEERSTUNNELS. s.l. : Steunpunt Tunnelveiligheid, 2005.

50. Haerter. Grundlagen der Belüftung von. s.l. : Swiss Federal Roads Authority FEDRO, 1983.

51. LÜFTUNG DER STRASSENTUNNEL -Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung. s.l. : ASTRA 13001, 2021.

52. Design Guidelines Tunnel Ventilation - RVS 9.261 & 9.262. s.l. : FSV, 1997.

53. Modelos de riesgo para túneles. Estado del arte. Alarcon, I. del Rey & E. 3511, s.l. : Revista de Obbras Publicas, 2010.

54. Análisis de riesgo para túneles de carretera. s.l. : AIPCR, 2008.

55. Current practice for risk evaluation in road tunnels. s.l. : AIPCR, 2012.

56. Muir Wood, Sir Alan. The first Road Tunnel - A planner guide for cpuntries without previous experience of new Road Tunnels. s.l. : AIPCR, 1995.

57. Road Tunnels. Vehicle emissions and air demand for ventilation. s.l. : AIPCR, 2019.

58. Road Tunnels: A guide to optimising the air quality impact upon the environment. s.l. : AIPCR, 2008.

59. Road tunnels operational strategies for emergency ventilation. s.l. : AIPCR, 2011.

60. Recommendations on management of maintenance and technical inspection of road tunnels. s.l. : AIPCR, 2012.

61. Best practive for life cycle analysis for tunnel equipment. s.l. : AIPCR, 2016.

62. Life cycle aspects of electrical road tunnel equipment. s.l. : AIPCR, 2012.

63. Introduction to the RAMS concept for road tunnel operations. s.l. : AIPCR, 2019. 2019R05.

64. Jornadas técnicas sobre túneles - La seguridad en la Construcción y en servicio. Gijón : Demarcación Carreteras Estado en Asturias y otros, 1994.

65. Problemas en los estudios de ventilación en túneles de carretera. Mochón, Hernández, Crespo & Alarcon. Gijón : Jornadas técnicas sobre túneles, 1994.

66. Real Decreto 65/2006 sobre requisitos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado. s.l. : BOE núm 126 - Ministerio de Fomento, 2006.

67. Decreto Foral de la Diputación Foral de Bizcaia 91/2012 . s.l. : BOB núm 84 - Departamento de Obras Públicas y Transportes.

68. Road Tunnel Operations: First Steps Towards a sustainable approach. s.l. : AIPCR, 2017. 2017R02EN.

69. Project Borée: controlling road-tunnel ventilation by means of a network of microsensors, in order to reduce the exposure of the local population to pollutants - Background, methodology and initial results . Burkhart, Yaghzar, Vidal, Grand, Robin, Castel et Boissat. s.l. : BHRG fluid engineering, 2019.

70. The path to highly available, sustainable and efficient operation of road tunneles - use of energy generation and storage opportunities in the future. List, René. Graz : TU Graz, 2020.

71. Tunnel Ventilation and UN2030 Sustainability Development Goals - we have a story to tell. Dix, Prof. Arnold. Graz : 11th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation, 2022.

72. XV Congreso Mundial de la Carretera . Ciudad de Mexico : s.n., 1975.

73. Longitudinal ventilation of road tunnels with jet blowers. Meidinger. 1964.

74. On the longitudinal ventilation of road tunnels by jet fans. Rohne. 1964.

75. Veroffentlich als Mitterlung Nr 10. s.l. : Institut des Strassenbau an der E.T.H.

76. Beard, Carvel y otros. Handbook of Tunnel Fire Safety. s.l. : ICE Publishing, 2005.

77. SOLIT Safety of Life in Tunnels - Annex 2 Selected Results of Full Scale Fire Tests. s.l. : German Ministry of Economics and Technology, 2012.

78. RVS 09.03.11 Tunnel-Risikoanalysemodell. s.l. : FSV - Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr , 2015.

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

SECOND SESSION:

Operation and sustainable management of tunnels (I)

Topic: "Resilience in tunnels"

LIMITING NUISANCE FOR TRAFFIC DURING THE REFURBISHMENT OF THE HEINENOORD TUNNEL IN THE NETHERLANDS; IN SEARCH OF RESILIENCE POSSIBILITIES

Ronald Mante
Rijkswaterstaat (RWS),
Ministry of Infrastructure and Water Management, The Netherlands.
Chair of PIARC TC 4.4 Working Group 2 on Safety and Resilience.

The Heinenoord Tunnel in The Netherlands connects the Hoeksche Waard Island with the city of Rotterdam. The tunnel is 614m long, consists of two unidirectional tubes (3 lanes each) and has an average daily traffic load of 92,100 vehicles. The tunnel was opened for traffic in 1969. The structure is basically still sound, but a full refurbishment of the installations and systems is required, because they are end of life.

A long closure of the tunnel (or even one tube) is not possible, because alternative routes are scarce and require significant extra travel time, not suitable for the high traffic load. Thus, various scenarios were considered to assure the accessibility of the Hoeksche Waard during the works, scheduled for 2023-2024. Multi-criteria analyses were performed for each scenario, taking into account the total project cost, societal cost (due to extra travel time) and the total required time span for the works.

Refurbishment through "parallel assembly" proved to be optimal. This concept means that the new installations and systems are installed next to the current ones, that will remain in service until the end phase of the refurbishment. The existing installations and systems are only dismantled after integral testing has shown that the completed new ones work properly. This approach allows most of the works to be carried out during a series of night and weekend closures of just one tube. This limits nuisance, because one driving direction is always left undisturbed, while the closure for the other driving direction takes place in low-traffic periods.

This paper describes the applied method to select the optimal refurbishment approach, as well as the (partly unconventional) measures that are implemented to enhance the resilience of the tunnel system to assure as much availability for traffic as possible, also during future maintenance works.

LIMITACIÓN DE LAS MOLESTIAS PARA EL TRÁFICO DURANTE LA REMODELACIÓN DEL TÚNEL DE HEINENOORD EN LOS PAÍSES BAJOS; EN BUSCA DE POSIBILIDADES DE RESILIENCIA

El túnel Heinenoord en los Países Bajos conecta la isla Hoeksche Waard con la ciudad de Róterdam. El túnel tiene una longitud de 614 m, consta de dos tubos unidireccionales (3 carriles cada uno) y tiene una carga media diaria de tráfico de 92.100 vehículos.

El túnel se abrió al tráfico en 1969. La estructura sigue siendo básicamente sólida, pero se requiere una renovación completa de las instalaciones y sistemas, ya que se encuentran al final de su vida útil.

No es posible un cierre prolongado del túnel (o incluso de un tubo), porque las rutas alternativas son escasas y requieren un tiempo de viaje adicional significativo, no adecuado para la alta carga de tráfico. Así, se consideraron varios escenarios para asegurar la accesibilidad del Hoeksche Waard durante las obras, previstas para 2023-2024. Se realizaron análisis multicriterio para cada escenario, teniendo en cuenta el costo total del proyecto, el costo social (debido al tiempo de viaje adicional) y el tiempo total requerido para las obras.

La renovación mediante "montaje en paralelo" resultó ser óptima. Este concepto supone que las nuevas instalaciones y sistemas se instalen junto a los actuales, que permanecerán en servicio hasta la fase final de la rehabilitación. Las instalaciones y sistemas existentes sólo se desmantelan después de que las pruebas integrales hayan demostrado que los nuevos terminados funcionan correctamente. Este enfoque permite que la mayoría de los trabajos se lleven a cabo durante una serie de cierres nocturnos y de fin de semana de un solo tubo. Esto limita las molestias, porque una dirección de conducción siempre se deja tranquila, mientras que el cierre de la otra dirección de conducción se produce en períodos de poco tráfico.

Este documento describe el método aplicado para seleccionar el enfoque de renovación óptimo, así como las medidas (parcialmente no convencionales) que se implementan para mejorar la resiliencia del sistema de túneles para asegurar la mayor disponibilidad posible para el tráfico, también durante futuros trabajos de mantenimiento.

LIMITATION DES NUISANCES POUR LE TRAFIC PENDANT LA RÉNOVATION DU TUNNEL HEINENOORD AUX PAYS-BAS ; À LA RECHERCHE DE POSSIBILITÉS DE RÉSILIENCE

Le tunnel Heinenoord aux Pays-Bas relie l'île Hoeksche Waard à la ville de Rotterdam. Le tunnel mesure 614 m de long, se compose de deux tubes unidirectionnels (3 voies chacun) et a une charge de trafic quotidienne moyenne de 92 100 véhicules. Le tunnel a été ouvert à la circulation en 1969. L'ouvrage est fondamentalement sain, mais une remise à neuf complète des installations et des systèmes est nécessaire car ils sont en fin de vie.

Une longue fermeture du tunnel (ou même d'un tube) n'est pas possible, car les itinéraires alternatifs sont rares et nécessitent un temps de trajet supplémentaire important, inadapté à la charge de trafic élevée. Ainsi, différents scénarios ont été envisagés pour assurer l'accessibilité du Hoeksche Waard lors des travaux, prévus en 2023-2024. Des analyses multicritères ont été réalisées pour chaque scénario, prenant en compte le coût total du projet, le coût sociétal (dû au temps de déplacement supplémentaire) et la durée totale nécessaire aux travaux.

La rénovation par « assemblage parallèle » s'est avérée optimale. Ce concept signifie que les nouvelles installations et systèmes sont installés à côté des actuels, qui resteront en service jusqu'à la phase finale de la rénovation.

Après que des tests intégraux aient montré que les nouveaux systèmes et installations fonctionnent correctement, ceux existants sont démantelés.

Cette approche permet d'effectuer la plupart des travaux lors d'une série de fermetures de nuit et de week-end d'un seul tube. Cela limite les nuisances, car un sens de circulation est toujours laissé intact, tandis que la fermeture pour l'autre sens de circulation s'effectue en période de faible trafic.

Cet article décrit la méthode appliquée pour sélectionner l'approche de rénovation optimale, ainsi que les mesures (en partie non conventionnelles) qui sont mises en œuvre pour améliorer la résilience du système de tunnel afin d'assurer autant que possible la disponibilité pour le trafic, également lors de futurs travaux de maintenance.

1. INTRODUCTION

Rijkswaterstaat (RWS) is the executive organisation of the Dutch Ministry of Infrastructure and Water Management. RWS develops and manages the main (state-owned) infrastructure in The Netherlands, like the primary road network, the primary waterways, as well as the main water systems. RWS's mission focuses on protection against flooding, sufficient clean water, a smooth and safe transport by road and water, reliable and useful information and a sustainable living environment. As such, RWS fulfils three social roles: as public-oriented network manager, leading project manager and effective crisis manager.

As part of the primary road network (highway network) RWS manages numerous bridges, viaducts and tunnels. One of these tunnels is the Heinenoord Tunnel. This paper deals with the refurbishment of that tunnel, taking place during a two-year period (2023 – 2024). Currently, the preparations for the refurbishment works are in full swing, involving detailed planning, design, measures to limit nuisance, coordination with stakeholders, applications for the required permits and an information campaign.

To limit the nuisance of the refurbishment works for the region and the through-traffic, various measures were considered and evaluated for their effectiveness, cost and other aspects. In other words, the characteristics of the existing tunnel system to be resilient for the refurbishment works were analysed for their potential effect. Additional measures to enhance resilience were also considered.

Working Group 2 of PIARC TC 4.4 on Tunnels defined road tunnel resilience as follows:

"The ability of the tunnel system to prepare, plan for, resist, absorb, recover from, more successfully adapt to actual or potential negative effects of events or developments affecting the availability of a road tunnel in a timely and efficient way. In this context, an acceptable safety level is a mandatory constraint for the availability of the road tunnel".

Moreover, according to the PIARC Road Dictionary, the tunnel system can be defined as the whole of the structure, installations, internal and external infrastructure, operation and management organization of a road tunnel.

In this case, the refurbishment works are the event the Heinenoord Tunnel System should be resilient for.

2. TUNNEL LOCATION AND CHARACTERISTICS

The Heinenoord Tunnel crosses the Oude Maas River, just south of Rotterdam, as part of the A29 highway (see figures 1 and 2). The A29 is not only important for through traffic, but also for local traffic, because it connects The Hoeksche Waard (a municipality as well as an island) to other parts of the Rotterdam region, including the seaport, the biggest and busiest in Europe.

The Hoeksche Waard Island (88,742 inhabitants, spread over various towns and villages) is surrounded by four rivers:

- The afore-mentioned Oude Maas river on the north side, crossed by the Heinenoord Tunnel for highway traffic (A29) and the smaller Second Heinenoord Tunnel for pedestrians, cyclists, mopeds and agricultural traffic (tractors);
- The Dordtsche Kil River on the east side, crossed by the Kil Tunnel for motorized traffic, pedestrians, cyclists and mopeds;
- The Hollands Diep River on the south side, crossed by the Haringvliet Bridge for highway traffic (A29);
- The Spui River on the west side, crossed by a ferry service for pedestrians, cyclists, mopeds and motorized traffic.

Figure 1: Location of the Heinenoord Tunnel in The Netherlands

The Heinenoord Tunnel is by far the busiest river crossing, processing as much as 91,200 vehicles per day (counting both directions). In case of closure for traffic, the most suitable detour would be through the Kil Tunnel. But this route partly runs over a secondary road (N217), not really suitable for the highway traffic volume. Consequently, the resulting extra travel time to cross the Oude Maas River could run up to 30 or even 60 minutes during peak periods, introducing high economic / societal cost.

The Heinenoord Tunnel has a length of 614m. The total length of the structure (tunnel including ramps) is 1,064m. The tunnel consists of two unidirectional tubes, one for each direction. Each tube has three lanes. Each tube is equipped with, among other things, longitudinal ventilation, CCTV, various detection systems, a PA-system and emergency exits. Moreover, the tunnel is fully operated from a regional traffic centre.

It is a submerged tunnel, consisting of five elements. The ramps and tunnel portals (including the service buildings, visible as yellow buildings on both sides of the river in figure 2) were constructed through cut and cover.

Figure 2: Heinenoord Tunnel crossing the Oude Maas River; view to the north, showing the Rotterdam skyline on the horizon

Currently, the tubes are separated by a single middle wall (see figure 3), whereas most tunnels in The Netherlands have a central gallery between the tubes, containing a separated emergency escape gallery and service gallery, for tunnel installations and cables. In the Heinenoord Tunnel, the escape route in case of emergency currently leads through the neighbouring tube, that is accessible through emergency exit doors in the middle wall. Moreover, the installations and cables that are normally in the service gallery, are currently located in the tunnel tubes, not accessible for maintenance without closing (at least two lanes of) the tunnel tube.

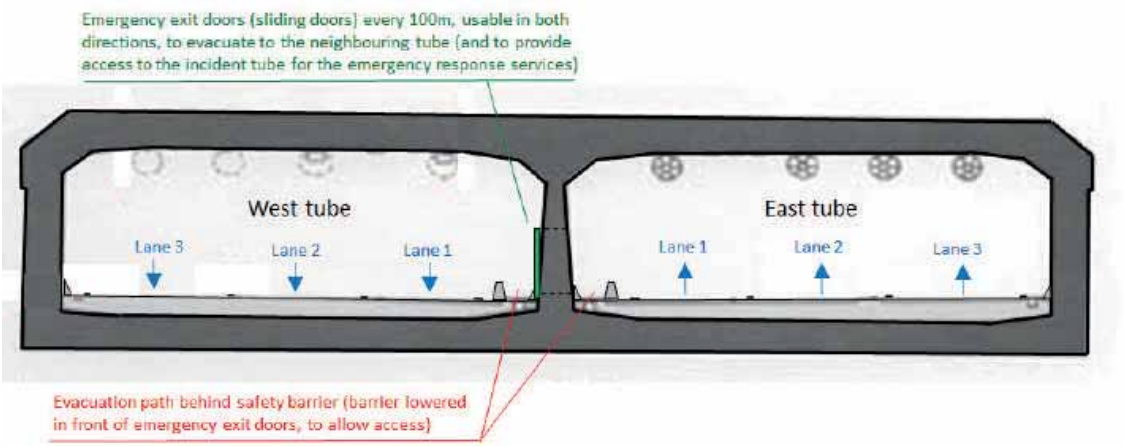


Figure 3: Cross section of the Heinenoord Tunnel in the current situation

3. HISTORY

The tunnel was opened for traffic in 1969. The construction took about three years (excavation works started in 1966).

The tunnel is a replacement for the Barendrecht Bridge, a movable bridge that had to be opened regularly to allow shipping to pass, a feature not suitable for the growing traffic volume. Moreover, the bridge had become too narrow to handle the traffic volume in the first place. After the Heinenoord tunnel was opened, the bridge was demolished.

At first, because the Barendrecht Bridge was used by both highway traffic and slow traffic (pedestrians, cyclists, mopeds and tractors) the Heinenoord Tunnel had to service all these traffic categories. To provide for this accommodation, one lane in each tube was reserved for slow traffic and two lanes for highway traffic. However, after a few decades a subsequent capacity bottleneck appeared, because of the continuous growth of the highway traffic volume. As a temporary solution, the lane for slow traffic in the eastern tube was scrapped in 1991, providing an extra lane for the highway traffic. This meant that the lane for slow traffic in the western tube became bi-directional from then on.

The permanent solution consisted of the construction of a separate tunnel for slow traffic, the Second Heinenoord Tunnel. This tunnel, opened in 1999, was the first bored tunnel (using a Tunnel Boring Machine, TBM) in The Netherlands. The Second Heinenoord Tunnel is 941m long. It consists of two bores, with an outer diameter of 8.3m. The width of the roadway is about 6m in both bores. One bore is used by cyclists and pedestrians, the other bore by tractors (agricultural traffic) and mopeds. The traffic in both bores is bi-directional, although there is a traffic light system allowing the bore for agricultural traffic to be closed temporarily in one direction, to allow the passing of a tractor with a voluminous load from the other direction. The south entrance of the Second Heinenoord Tunnel is visible in figure 2, to the right of the Heinenoord Tunnel. The white-coloured ramp is used by the tractors and mopeds, the cyclists and pedestrians use an escalator as well as an elevator to enter the tunnel.

The construction of the Second Heinenoord Tunnel was a pilot project, to gain experience with the possibilities to use a TBM in soft soils, under high groundwater level circumstances. This experience was used later on for the construction of the second bored tunnel, the much larger and much more important Westerschelde Tunnel (opened in 2003). The Westerschelde Tunnel is the longest tunnel in The Netherlands (6.6km).

4. REFURBISHMENT

After more than 50 years of service, the structure of the Heinenoord Tunnel is still sound, apart from some relatively minor issues, but a full refurbishment of the installations and systems is required, because they are end of life. The refurbishment allows the tunnel system to be upgraded according to the RWS Tunnel Standard. However, even the current tunnel system complies with the legal safety requirements and works well in terms of availability for traffic. Moreover, the capability to deal with disruptive (traffic) events is on par with the RWS requirements. Therefore, no specific objectives were set to improve resilience, beside the main goal to organize the refurbishment itself (as well as future maintenance works) in a resilient way, to limit the nuisance for traffic as much as possible.

A long closure of the tunnel (or even one tube) to carry out the refurbishment is not possible, because alternative routes are scarce and require significant extra travel time, not suitable for the high traffic load. Thus, various scenarios were considered to assure the accessibility of the Hoeksche Waard during the refurbishment works, scheduled for 2023-2024. Multi-criteria analyses were performed for each scenario, mainly taking into account the total project cost, total societal cost (due to extra travel time during the refurbishment) and the total required time span for the works (calendar time).

In the end, refurbishment through "parallel assembly" proved to be optimal. This concept means that the new installations and systems are installed next to the current ones, that will remain in service until the end phase of the refurbishment. The existing installations and systems are only dismantled after integral testing has shown that the completed new ones work properly. This approach allows most of the works to be carried out during a series of night and weekend closures of just one tube. This limits nuisance, because each time one driving direction is left undisturbed, while the nuisance for the other driving direction (extra travel time connected due to the alternative route) is limited because the closures take place in low-traffic periods. Before reopening the tunnel tube after a night or weekend closure, a series of simple regression tests are performed (see section 6) to demonstrate the current installations and safety systems have not been compromised by the refurbishment works and still function properly.

To facilitate the parallel assembly, and to create better evacuation facilities for the future, a central gallery (consisting of an escape gallery and a service gallery) will be constructed in the west tube, during one of the first phases of the refurbishment. The width of the cross section allows for this, because in the current situation there is an evacuation path behind the safety barrier on the left side of the roadway in both tubes (see figures 3 and 4).

The rationale for this approach is that, as research shows, normally 50% of the tunnel installations is located in the service buildings, 40% in the service gallery and only 10% in the tunnel tubes. This means that, when a central gallery is present, most of the parallel assembly works can take place outside the night and weekend closures, while the tunnel tubes are still in service for traffic (provided the escape gallery remains available for possible evacuation situations, which is normally the case, since the service gallery is in a different compartment).

Moreover, a central gallery will enhance the possibilities for future maintenance and refurbishments without the necessity to close a tunnel tube, thus enhancing the resilience of the tunnel system.

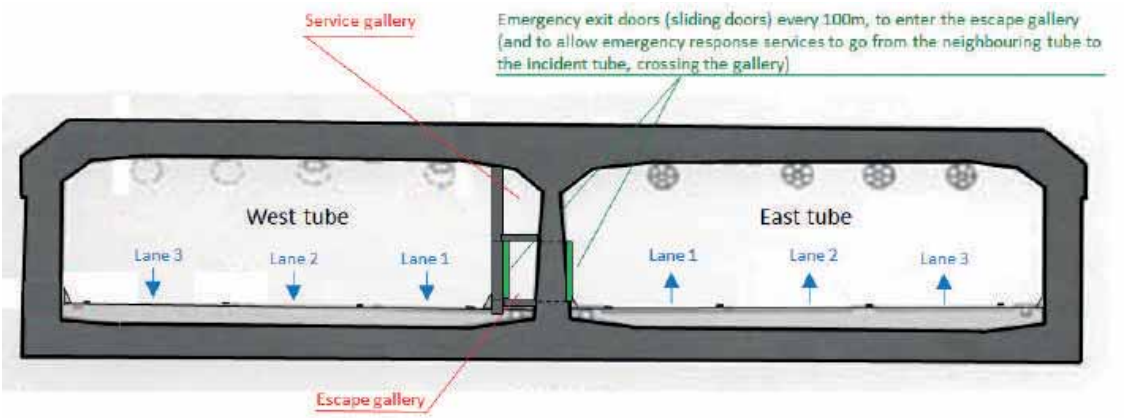


Figure 4: Cross section of the Heinenoord Tunnel in the future situation, after the refurbishment, including a central gallery (escape gallery and service gallery)

The disadvantage of constructing a central gallery is that the tunnel has to be fully closed for a certain time period, because both tubes are needed as a site to facilitate the works and the accompanied logistics. However, using prefab components and an "industrial" construction process (validated by practicing in a mock-up tunnel resembling the actual situation) the main structure of the gallery can be finished in two calendar weeks, scheduled in the summer holiday period of 2023. In this period, the traffic load is somewhat lower compared to normal working days (and maybe the habit of working at home more often, introduced by the COVID 19 pandemic, will also help in this case). This two-week closure will therefore produce less nuisance than the total nuisance that would follow from additional night and weekend closures that would be required without constructing a central gallery.

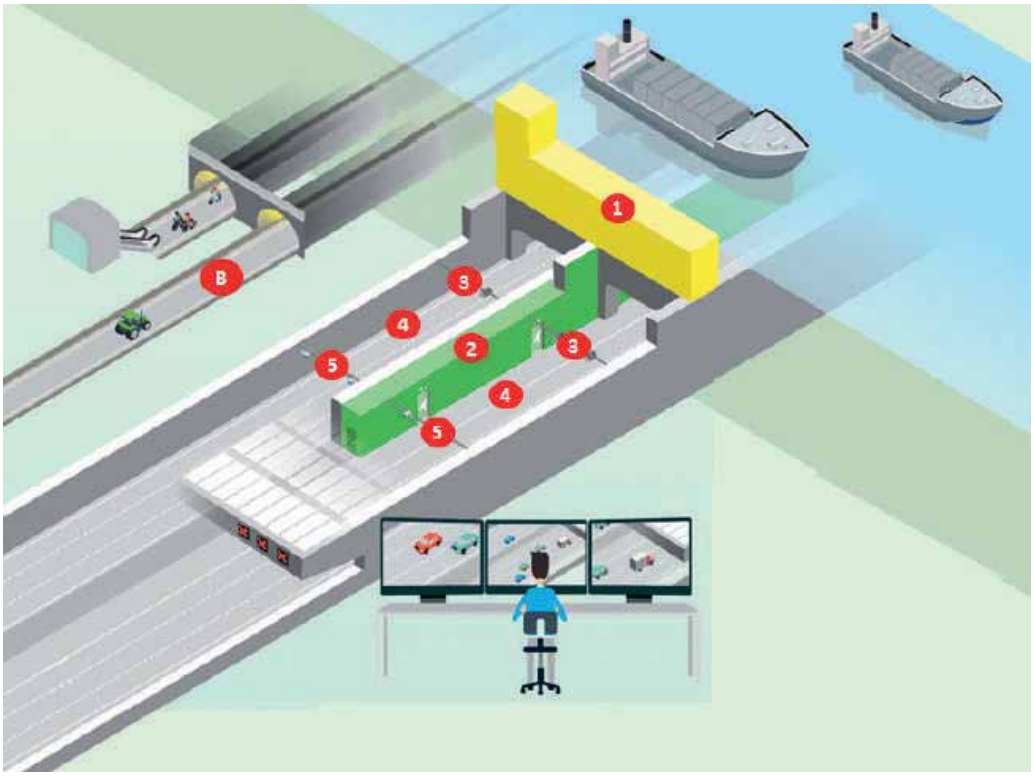
A second two-week full closure of the tunnel will be required in the end phase of the refurbishment, for integral testing of the new installations and systems and for training of the tunnel staff (including operators) and emergency response services. This second full closure is also scheduled in a summer holiday period (in 2024).

To summarize, the total number of closures to facilitate the refurbishment is as follows:

- 30 Weekend closures and 40 night closures of one tube;
- Two periods of two weeks (and one extra weekend) in which the tunnel is fully closed (both tubes) in the summer of 2023 and 2024 respectively.

To mitigate nuisance for the traffic, public transport is promoted by running extra bus services during closures. In combination with this, the detour route for busses is shortened by temporarily allowing them to pass through the bore of the Second Heinenoord Tunnel that is normally used by tractors and mopeds. To make this possible, several temporary extra safety measures have to be implemented (see section 7). Since the detour route for the other traffic through the Kil Tunnel is significantly longer, it is expected that, during refurbishment closures, many people will choose to travel by bus rather than by car.

A schematic overview of the refurbishment phases and scope is presented in figure 5 (part of an infographic for the public). In addition, figure 7 shows an artist impression of the end result of the refurbishment.



B = temporary bus transport through tube of Second Heinenoord Tunnel (normally used by tractors and mopeds)

Refurbishment phases:

1 = Refurbishment service building; civil works: 10 weekend closures and 10 night closures of 1 tube
2 = Construction of central gallery (escape gallery and service gallery): full closure both tubes during 2 weeks + 1 weekend
3 = Installation works in tunnel and service gallery: 15 weekend closures and 30 night closures of 1 tube
4 = Switching from old to new installations (including testing and training): full closure both tubes during 2 weeks
5 = Removing old installations: 5 weekend closures of 1 tube

Figure 5: Infographic on the refurbishment of the Heinenoord Tunnel

5. SELECTION OF REFURBISHMENT APPROACH (IN SEARCH OF RESILIENCE)

The main objective ("mission") was to find an approach for the refurbishment works that balances safety, nuisance for traffic (accessibility of regional destinations), technical feasibility and project cost, see figure 6.

Various scenarios for the execution of the refurbishment works were considered and evaluated in order to select the optimal solution to be implemented in the contract. This approach was "holistic", and could be tackled from various angles, but basically, the starting point was to consider a certain scenario, like closing one tube for refurbishment while temporarily allowing bidirectional traffic in the other tube. Then, for that concept, the required measures to assure traffic safety, tunnel safety and the occupational safety for the construction workers were defined. Subsequently, the consequences for the accessibility (traffic flow) were determined, as well as the possibilities to execute the works effectively and efficiently within these boundary conditions. Based on these analyses, the total project cost, total nuisance for the traffic and the required time schedule / lead time for the scenario could be determined.

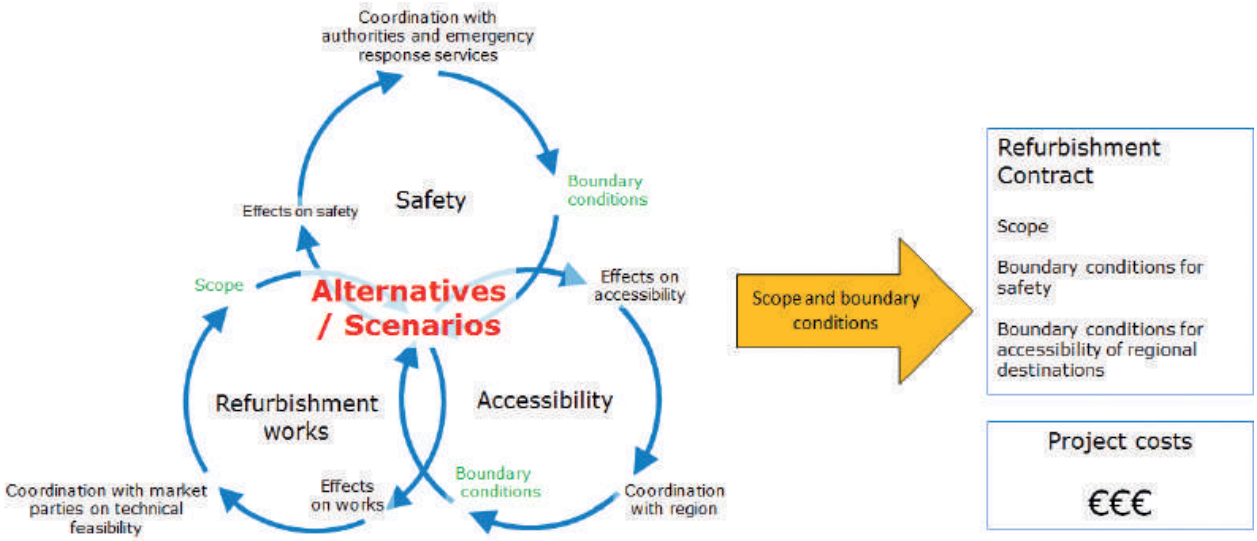


Figure 6: Balancing possibilities for refurbishment works, safety, accessibility and project cost

By analysing all relevant scenarios along this way, the optimal solution, as mentioned above, could be selected, by applying a multi-criteria analysis. The following criteria, related to the aspects presented in figure 6, were taken into account:

- Technical impact:
  - Scope of the works that can be included in the refurbishment (given the scenario)
  - Possible technical issues, uncertainties or risks
  - Expected life span of the results, before a next refurbishment would be required (goal: structure 30 years and installations/systems 15 years)
- Accessibility / nuisance for traffic:
  - Total travel time delay (per trip during rush hour) due to detour and/or congestion
  - Total duration of the nuisance during the period of refurbishment
  - Required measures (infrastructure, mobility, communication) to assure or improve accessibility
  - Direct societal / economic damage (monetized in euro) caused by loss of time / travel time delay during the total period of refurbishment; the monetized damage is based on validated cost of loss of time, taking into account the shares of business traffic, freight traffic and private / social traffic; the loss of time is determined on the basis of traffic flow models
  - Expected cost of compensation for freight transporters (to be paid by the ministry); this cost obviously is related to the calculated economic damage mentioned above
  - Effects on image (public opinion)
  - Possible effects on motivation of traffic participants to travel outside peak hours
  - Required communication to the public
- Project cost:
  - Total expected costs (in millions of euro's)
  - Possible additional cost, due to risks

- Safety and sustainability:
  - Main points of attention to assure safety (cost of required safety measures already included in total project costs as mentioned above)
  - Main points of attention to assure sustainability
- Summary of opportunities and threats
  - Opportunities
  - Threats
  - Further required studies

In the above list, accessibility (limitation of nuisance for traffic) is a very important criterion, more so than project cost, although, of course, the required budget had to be feasible within a certain acceptable range.

The main challenge in the process was to find or create possibilities to perform the refurbishment works, while maintaining an acceptable travel time for the traffic, under acceptable safety conditions. In general, more (safe) availability for traffic means fewer possibilities to perform the work, resulting in a longer period in which the refurbishment takes place. Thus, balancing the degree of nuisance and the duration of nuisance, two important resilience aspects, was also important. That is why the total monetized economic damage, based on the total loss of time (travel time delay) during the refurbishment period, was chosen as a fitting criterion.

Figure 7: Artist impression of the Heinenoord Tunnel after the refurbishment [Syb van Breda & Co Architects], view of the south portal; the green door between the tubes is one of the two exits of the escape gallery (the other one is at the north portal)

The following scenarios were considered:

1. Limit the refurbishment scope to the most urgent installations and systems: no civil works and some installations not yet completely end of life remain in service, resulting in an additional refurbishment later on;
2. Parallel assembly during weekend and night closures (the chosen alternative);
3. Same as 2, but only night closures (resulting in a longer time span for the refurbishment, because the performance of the works is less efficient);

4. Closure of one tube at the time for refurbishment and allowing bi-directional traffic in the other tube (without allowing trucks and dangerous goods that could cause a large fire, because the longitudinal ventilation is not fit for bi-directional traffic);
5. Same as 4, but not a full closure of a tube, leaving one lane available for traffic (requiring safety measures for the construction workers and severely limiting the efficiency of the works, resulting in a long required time span for the refurbishment and nuisance);
6. Construction of a temporary bridge to cross the river (in one or two directions) and then close a tunnel tube or the entire tunnel for refurbishment;
7. Same as 6, but construction of a new tunnel (one or two tubes) instead of a temporary bridge.

The multi-criteria analyses showed that scenario 1 would not meet the goals for the life span of the tunnel system. Scenario 3 would be less effective than scenario 2 and scenario's 4 and 5 would cause heavy congestions on weekdays that are not acceptable. Scenario 6 proved to be technically difficult, because of the required height of the bridge and/or required bridge openings during peak hours (to let tall sea-going vessels pass).

Scenario 7 would be (too) expensive and the required time span to finish the refurbishment would be too long (also considering the risks connected to the fact that the tunnel systems are end of life). Scenario 2 proved to be best for accessibility / availability, and also positive for the total project cost.

6. SAFETY ASPECTS

Since the selected approach implies that the tunnel still will be used by traffic during the refurbishment period, special attention is to be given to the safety of both the road users and construction workers. Safety is also a mandatory constraint for resilience, see the definition in section 1.

As a starting point, the following characteristics of the approach contribute to safety:

- The new facilities (installations and systems) will be mounted next to the existing ones (parallel assembly); the existing facilities will remain in function until the new ones are fully completed and demonstrably functioning properly. Only then, the existing facilities will be dismantled.
- When work is being carried out in a tube, it is generally closed for traffic.
- For this reason, work in a tube takes place at low traffic times as much as possible, during weekend and night closures. Two periods of two weeks (during low-traffic summer holiday seasons) have been reserved for the more time-consuming activities, during which the entire tunnel (both tubes) will be closed.
- During closures of tubes, measures are taken to guarantee accessibility in the region as much as possible (to avoid the creation of dangerous traffic situations elsewhere).
- As far as possible, work installations and systems outside the tunnel tubes (e.g. in the service gallery or the service building) can also be carried out while the tunnel is open for traffic, provided that the functioning of the existing facilities (which are still operational to ensure safety) is not hindered.

In line with these characteristics, the following safety boundary conditions are included in the refurbishment contract:

- During the refurbishment, the adequate functioning of the operational safety facilities (installations and systems) must be guaranteed. This not only means that adequate conservation and maintenance

is required (including inspections and tests), but also that the newly installed facilities must not hinder the functioning of the existing ones (e.g. a new camera should not block the air flow from an existing ventilation unit and a new ventilation unit should not block the view of an existing camera).

- When an operational facility fails, it must be repaired in accordance with the recovery priorities of failure definitions of the RWS Tunnel Standard, taking into account the compensatory measures that are normally implemented until the repair is finished, in accordance with the current Safety Management Plan for the Heinenoord Tunnel.
- The work may not affect the functioning of the facilities that play a role in guaranteeing tunnel safety for those present in the tubes that are fully or partially open for traffic at that time. In addition, it is not permitted to temporarily take these facilities out of use. Taking temporary measures to safeguard the continuity of functioning during the work is permitted. If it is not possible to prevent the functioning of the facilities from being disrupted during the work, the entire tunnel must be closed for the purpose of carrying out the work in question.
- When working in a tube, it must be completely closed for traffic, with the following exceptions:
  - Emergency response services may use the closed tube for passage in case of emergency. The work must be arranged in such a way that this is possible in a safe way. Moreover, in the event of a disaster in the tube that is still open for traffic, the emergency response services must at all times be able to use the neighbouring work tube as a support tube when dealing with the disaster (e.g. to approach the disaster location in the traffic tube through the emergency exit doors).
  - During the phases in which the entire tunnel is closed for traffic (phase 2 and phase 4), bus traffic with a frequency according to the current timetable must be allowed to pass through one of the traffic tubes, in a driving direction to be determined. The work must be arranged in such a way that this is possible in a safe way (bus traffic in the opposite direction will be guided through the Second Heinenoord Tunnel).
- Before a tube is reopened for traffic after work in the tube in question, it must be demonstrated that the existing facilities are still working properly. This regression tests must include at least:
  - Emergency test: activate the emergency button in the traffic control centre and verify that all actions associated with this command are performed correctly (like activation of the tunnel ventilation and closure of the tunnel);
  - Evacuation test: activate the evacuation button in the traffic control centre and verify that all actions associated with this command are performed correctly (like activation of the evacuation lighting, evacuation messages through the PA-system and activation of the sound beacons above the emergency exit doors);
  - Sensor test: verify that (a representative sample of) the sensors in the tunnel (SOS, emergency telephones, smoke detectors and sensors that indicate the use of emergency aid cabinets, etc.) work correctly, including all actions that should follow a detection (e.g. automatic activation of the tunnel ventilation). In addition, the emergency telephones should establish an automatic connection with the operator when the receiver is picked up.
- It is not permitted at any time during the refurbishment to set up bi-directional traffic in one tube.
- If one or more tubes are (partially) open for traffic, neither the escape routes nor the approach routes for the emergency response services may be blocked by the work. The accessibility of the emergency aid cabinets may not be blocked either. Exception: if it can be assured that a blockade of a route can and will be lifted within 2 minutes after an emergency alarm by the tunnel operator, this precondition is considered to be met as well.

Very much related to these boundary conditions to assure safety, intensive coordination was required with the local authority (municipality) that is responsible for issuing the building permit and the permit for the re-opening of the tunnel after refurbishment, to align the phases of the works with legal decision-making process and the legally required facilities when a tunnel is in operation. The chosen concept of parallel assembly helped in this context, because it is transparent that current safety systems remain in service until the very end of the refurbishment.

Figure 8: May 2022; the bore of the Second Heinenoord Tunnel for tractors and mopeds is closed for the assembly of temporary technical measures to facilitate public transport (busses) during the refurbishment period [picture by Robin Witkamp, RWS]

7. MITIGATING MEASURES

Various measures are being prepared and implemented to mitigate the nuisance that will occur for the traffic, despite the "public-friendly" refurbishment approach described above.

First of all, an information campaign is running, about the scope and the schedule of the works. The dates for the tube and tunnel closures in 2023 and 2024 are already set and included in the communication, involving newspapers, websites and local radio and television. Although the full tunnel closures will be limited to two times two weeks in the relatively traffic-low summer holiday seasons, it is expected that these closures will cause the most nuisance. The campaign is aimed to prepare the public to, for example, plan their holiday during those periods, or to work at home, or to use alternative transport means, like the bus, train, bicycle or moped.

For the local people who are still dependent on their car, the designated alternative route to and from Rotterdam will run via the Kil Tunnel (part of the secondary road N217) and the A16 highway. Therefore, the traffic flow on the N217 will be optimized by increasing the capacity of a roundabout that will otherwise form a bottleneck.

It is expected that the through traffic from outside the Hoeksche Waard will also use the A16 instead of the A29. Therefore, the emergency lane of the carriageways for both directions will locally and temporarily be used as extra driving lane, combined with a reduction of the speed limit for reasons of both safety and traffic flow.

Public transport is promoted by running extra bus services during tube or tunnel closures. As already mentioned in section 4, busses will be allowed to temporarily pass through the bore of the Second Heinenoord Tunnel that is normally used by tractors and mopeds. To make this possible, several temporary extra safety measures are being implemented, in intensive coordination with the local authority and the local fire brigades. This has to do with the fact that there are no emergency exit doors present in the Second Heinenoord Tunnel (there are no cross connections between the bores). Moreover, the tunnel ventilation is only suitable for air exchange, not for smoke control in case of fire. This is acceptable for the normal traffic, occasional tractors and mopeds with one driver, but for busses with lots of people on board a complete new safety concept had to be developed to compensate for the lack of emergency exits: "back to the drawing board" to re-invent safety from scratch, relying more heavily on operational measures.

The solution was found by installing temporary longitudinal ventilation units (jet fans) at one of the portals (see figure 9) with enough capacity to control bus fires (20-50MW). When busses go through the bore the ventilation is permanently fully activated, a preventive measure to maximise effectiveness in case of fire. In addition, on-site traffic officers control the arriving busses (traffic metering) in a way that only one bus at the time is present in the tunnel: the next bus is only allowed to enter when the previous bus has left the tunnel. That way, in case of fire, people from the bus can evacuate smoke free by walking out of the tunnel in the direction opposite of the direction of ventilation. The ventilation direction is always to the north, making use of the dominant wind direction. This means that the evacuation direction is always towards the south portal. The bus drivers are instructed to guide this evacuation, supported by a steward (emergency response officer) that is also present on every bus. Lastly, a quick response fire-fighting team is present on site. This concept allows a bus to pass every two minutes. The timetable for the bus service is organised on this basis.

During a certain day's service, busses will only go through the bore in one direction. This adds to the robustness of the concept. Busses in the opposite direction will use the tunnel tube of the Heinenoord Tunnel that is still available for traffic. In the periods of full closure of the tunnel (works going on in both tubes) the busses in the opposite direction will still be allowed to pass through one allocated (most suitable) tube; the works have to organised in such a way that this is safely possible.

Moreover, during the days that the Second Heinenoord Tunnel is used by busses, the bore in question is closed for the normal traffic (tractors and mopeds). The mopeds are then allowed to use the bore for cyclists and pedestrians. The tractors have to wait until the bus service of the day has ended. However, the bus service will be interrupted when the emergency response services have to use the bore for a priority ride (use of the bore to reach a calamity location on the other side of the river). All these principles underline that the traffic management by the on-site traffic officers is a crucial part of the safety concept.

Additional temporary measures to support the safety concept involve an extra fire extinguishing installation (water pipe) for the quick response fire-fighting team and evacuation lights and signing to guide people out of the bore in the very-low-probability case that the ventilation malfunctions at the exact moment of a fire (see figure 10). Moreover, to support the operational procedures, an intensive tailor-made training programme is implemented for all the involved personnel, validated by a full exercise. Finally yet importantly, the effectiveness of the operational measures will be monitored and evaluated on a daily basis, resulting in improvement measures when necessary.

The assembly of the temporary technical measures in the Second Heinenoord Tunnel has already started in May 2022 (see figures 8 to 10) because the availability of the bore for busses is an important constraint to start the "real" refurbishment works.

Figure 9: May 2022; the temporary extra jet fans to support public transport (busses) through the Second Heinenoord Tunnel are being mounted [pictures by Robin Witkamp, RWS]

8. CONCLUSION

It is not possible yet to evaluate the refurbishment approach itself, because only a few preparatory works have been carried out at the moment (May 2022). However, the process to select the approach has been proven very useful. It has provided crucial insights into the different impacts of the works and has served as a basis for coordination and communication with the numerous stakeholders in the region. This has created support for the measures. In addition, it provides a blueprint or pilot for the preparation of a larger tunnel refurbishment programme that is scheduled after the Heinenoord Tunnel.

From a resilience point of view, two aspects prove to be relevant:

- The inventory of the resilience of the current tunnel system, of which the tunnel manager may not be (fully) aware in advance: what possibilities does the current tunnel system offer to reduce nuisance in case of maintenance or refurbishment? The findings of this inventory ought to be documented in the maintenance plan for the tunnel;
- Possibilities / provisions, to be included in the refurbishment scope, to enhance the resilience for future maintenance and refurbishment works (like, in this case, a service gallery).

Figure 10: May 2022; the temporary evacuation lighting and fire extinguishing installation to support public transport (busses) through the Second Heinenoord Tunnel are being mounted

[pictures by Robin Witkamp, RWS]

In addition, we became even more aware that standardized modules for tunnel installations and systems are very beneficial for reducing the required time to replace existing end-of-life installations during a refurbishment. Thus, standardized modules support the reduction of nuisance for the traffic. This will be taken into account when preparing the subsequent refurbishment programme for other tunnels.

SEISMIC AND TSUNAMI RESILIENCE ASSESSMENT OF ROADWAY TUNNELS IN EARTHQUAKE PRONE REGIONS

Bijan Khaleghi
PhD, PE, SE
State Tunnel & Structures Design Engineer
WSDOT, Tunnel & Structures Office
Adjunct Professor, Saint Martin's University

The resilience of road networks, defined as their ability to withstand, adapt to, and rapidly recover after a disruptive event, is a challenging issue of paramount importance towards holistic disaster risk mitigation and management. Intercity networks constitute a highly important civil infrastructure in developed countries, as they contribute to the prosperity and development of the connected communities. This was evident after recent strong earthquakes that caused extensive structural damage to key transportation components, such as tunnels, overpasses, tunnels and geotechnical works, that in turn led to a significant additional loss associated with the prolonged traffic disruption. In cases of seismic events in developed societies with complex and coupled intercity transportation systems, the interdependency between citizens' life and road functionality has further amplified the seismically induced loss.

This paper takes into account the network resilience to earthquake and tsunami loading and establishes a comprehensive, multi-criterion framework for the overall loss expected to be experienced in future events. In order to reflect the multidimensional nature of loss, a set of novel, time-variant indicators is herein introduced, while cumulative indicators are proposed for assessing the total loss incurred throughout the entire recovery period.

EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA SÍSMICA Y DE TSUNAMIS DE TÚNELES VIALES EN REGIONES PROPENSAS A TERREMOTOS.

La resiliencia de las redes viales, definida como su capacidad para resistir, adaptarse y recuperarse rápidamente después de un evento disruptivo, es un tema desafiante de suma importancia para la mitigación y gestión holística del riesgo de desastres. Las redes interurbanas constituyen una infraestructura civil de gran importancia en los países desarrollados, ya que contribuyen a la prosperidad y desarrollo de las comunidades conectadas. Esto fue evidente después de los fuertes terremotos recientes que causaron daños estructurales extensos en componentes clave del transporte, como túneles, pasos elevados, túneles y obras geotécnicas, que a su vez generaron una pérdida adicional significativa asociada con la interrupción prolongada del tráfico. En casos de eventos sísmicos en sociedades desarrolladas con sistemas de transporte interurbanos complejos y acoplados, la interdependencia entre la vida de los ciudadanos y la funcionalidad vial ha amplificado aún más la pérdida inducida sísmicamente.

Este documento tiene en cuenta la resiliencia de la red ante la carga de terremotos y tsunamis y establece un marco integral de criterios múltiples para la pérdida general que se espera experimentar en eventos futuros. Para reflejar la naturaleza multidimensional de la pérdida, se introduce aquí un conjunto de indicadores variables en el tiempo, mientras que se proponen indicadores acumulativos para evaluar la pérdida total incurrida a lo largo de todo el período de recuperación.

ÉVALUATION DE LA RÉSILIENCE SISMIQUE ET AUX TSUNAMIS DES TUNNELS ROUTIERS DANS LES RÉGIONS SUJETTES AUX TREMBLEMENTS DE TERRE.

La résilience des réseaux routiers, définie comme leur capacité à résister, à s'adapter et à se rétablir rapidement après un événement perturbateur, est un défi d'une importance capitale pour l'atténuation et la gestion globales des risques de catastrophe. Les réseaux interurbains constituent une infrastructure civile très importante dans les pays développés, car ils contribuent à la prospérité et au développement des communautés connectées. Cela était évident après les récents tremblements de terre violents qui ont causé d'importants dommages structurels aux principaux éléments de transport, tels que les tunnels, les viaducs, les tunnels et les travaux géotechniques, qui ont à leur tour entraîné une perte supplémentaire importante associée à la perturbation prolongée du trafic. Dans les cas d'événements sismiques dans les sociétés développées avec des systèmes de transport interurbains complexes et couplés, l'interdépendance entre la vie des citoyens et la fonctionnalité de la route a encore amplifié la perte induite par les séismes.

Cet article prend en compte la résilience du réseau aux tremblements de terre et aux tsunamis et établit un cadre complet et multicritères pour la perte globale attendue lors d'événements futurs. Afin de refléter la nature multidimensionnelle de la perte, un ensemble de nouveaux indicateurs variant dans le temps est présenté ici, tandis que des indicateurs cumulatifs sont proposés pour évaluer la perte totale subie tout au long de la période de rétablissement.

INTRODUCCIÓN

Road tunnels as defined by the American Association of State Highway and Transportation Officials Technical Committee for Tunnels (T-20), are enclosed roadways with vehicle access that is restricted to portals regardless of type of the structure or method of construction. The committee further defines road tunnels not to include enclosed roadway created by highway bridges, railroad bridges or other bridges. This definition applies to all types of tunnel structures and tunneling methods such as cut-and-cover tunnels, mined and bored tunnels in rock, soft ground , and difficult ground, immersed tunnels and jacked box tunnels.

Road tunnels are feasible alternatives to cross a water body or traverse through physical barriers such as mountains, existing roadways, railroads, or facilities; or to satisfy environmental or ecological requirements. In addition, road tunnels are viable means to minimize potential environmental impact such as traffic congestion, pedestrian movement, air quality, noise pollution, or visual intrusion; to protect areas of special cultural or historical value such as conservation of tunnel properties; or for other sustainability reasons such as to avoid the impact on natural habit or reduce disturbance to surface land.

Figure 1: SR99 Tunnel, Seattle, Washington

SEISMIC RESILIENCY OF TUNNEL STRUCTURES

Tunnels, in general, have performed better during earthquakes than have above ground structures such as bridges and buildings. Tunnel structures are constrained by the surrounding ground and, in general, cannot be excited independent of the ground or be subject to strong vibratory amplification, such as the inertial response of a bridge structure during earthquakes. Another factor contributing to the reduced tunnel damage is that the amplitude of seismic ground motion tends to reduce with depth below the ground surface. Adequate design and construction of seismic resistant tunnel structures, however, should never be overlooked, as moderate to major damage has been experienced by many tunnels during earthquakes,

The greatest incidence of severe damage has been associated with large ground displacements due to ground failure, i.e., fault rupture through a tunnel, land sliding (especially at tunnel portals), and soil liquefaction. Ground shaking in the absence of ground failure has produced a lower incidence and degree of damage in general, but has resulted in moderate to major damage to some tunnels in recent earthquakes.

The most recent reminder of seismic risk to underground structures under the ground shaking effect is the damage and near collapse at the Kobe Rapid Transit Railway during the 1995 Kobe Earthquake in Japan. Near surface rectangular cut-and-cover tunnels and immersed tube tunnels in soil have also been vulnerable to transient seismic lateral ground displacements, which tend to cause racking of a tunnel over its height and increased lateral pressures on the tunnel walls. Their seismic performance could be vital, particularly when they comprise important components of a critical transportation system to which little redundancy exists.

The general procedure for seismic design and analysis of tunnel structures should be based primarily on the ground deformation approach (as opposed to the inertial force approach); i.e., the structures should be designed to accommodate the deformations imposed by the ground. The analysis of the structure response can be conducted first by ignoring the stiffness of the structure, leading to a conservative estimate of the ground deformations. This simplified procedure is generally applicable for structures embedded in rock or very stiff/dense soil. In cases where the structure is stiff relative to the surrounding soil, the effect of soil-structure interaction must be taken into consideration.

Other critical conditions that warrant special seismic considerations include cases where a tunnel intersects or meets another tunnel (e.g., tunnel junction or tunnel/cross-passage interface) or a different structure (such as a ventilation building). Under these special conditions, the tunnel structure may be restrained from moving at the junction point due to the stiffness of the adjoining structure, thereby inducing stress concentrations at the critical section.

SEISMIC GROUND MOTION PARAMETERS

Once the design earthquake events are defined, design ground motion parameters are required to characterize the design earthquake events. Various types of ground motion parameters may be required depending on the type of analysis method used in the design. In general, ground motions can be characterized by three translational components such as longitudinal, transverse, and vertical with respect to the tunnel axis.

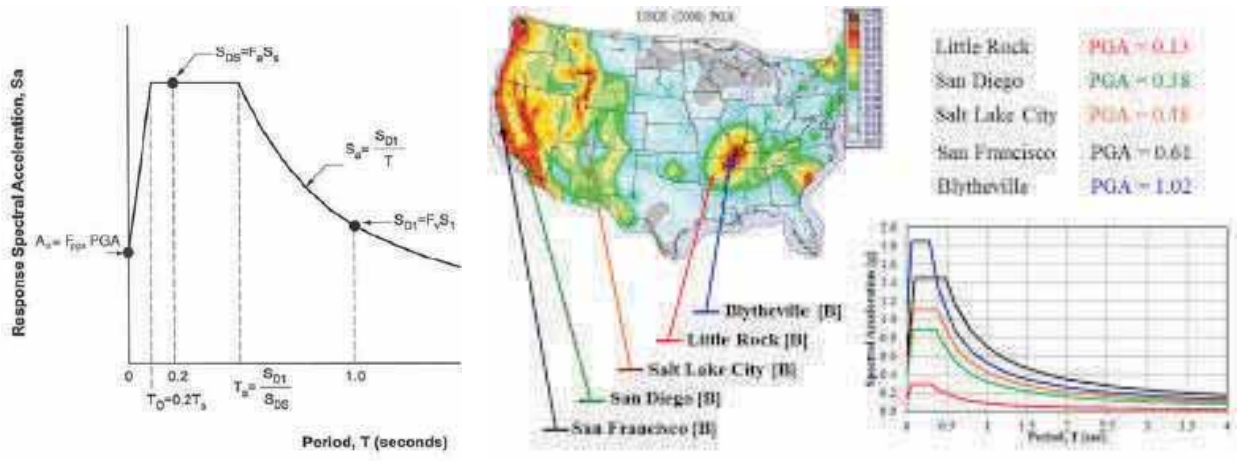


Figure 2 . Design Response Spectra Constructed Using the NEHRP Procedure

For long structures such as tunnels, different ground motions may be encountered by different parts of the structure. Thus, it is sometime necessary for the tunnel to be evaluated for the spatially varying ground motions effects, particularly when the longitudinal response of the tunnel is of concern. In this case the differential displacements and force buildup along the length of the tunnel could be induced due to the spatially varying ground motion effects. In deriving the spatially varying ground motion time histories, as a minimum the following factors should be taken into considerations:

- Local soil site effect
- Wave traveling/passage effect
- Extended source effect
- Near-field effect.

For more accurate assessment of the ground motion parameters at depth, site-specific dynamic site response analysis should be performed to account for detailed subsurface conditions and site geometry.

Results from the dynamic site response analysis would provide various aspects of ground motion parameters as a function of depth (in a one-dimensional site response analysis) or as a function of spatial coordinates (in a two- or three-dimensional site response analysis).

Table 1 Ground Motion Attenuation with Depth Tunnel Depth (m) Ratio Of Ground Motion At Tunnel Depth To Motion At Ground Surface

Table 1: Ground Motion Attenuation with Depth

Tunnel Depth (m)	Ratio Of Ground Motion At Tunnel Depth To Motion At Ground Surface
≤ 6	1.0
6 -15	0.9
15 -30	0.8
≥ 30	0.7

Seismic Performance Guidelines of Tunnels

There are certain conditions that would clearly indicate a potentially significant seismic risk to a bored tunnel, cut-and-cover tunnel, or submerged tube and thus require more detailed evaluations. These conditions include:

- An active fault intersecting the tunnel;
- A landslide intersecting the tunnel, whether or not the landslide is active;
- Liquefiable soils adjacent to the tunnel, and
- History of static distress to the tunnel such as local collapses, large deformations, cracking or spalling of the liner due to earth movements, unless retrofit measures were taken to stabilize the tunnel.

SEISMIC EVALUATION PROCEDURES - GROUND SHAKING EFFECTS

Underground tunnel structures undergo three primary modes of deformation during seismic shaking: ovaling/racking, axial and curvature deformations. The ovaling/racking deformation is caused primarily by seismic waves propagating perpendicular to the tunnel longitudinal axis, causing deformations in the plane of the tunnel cross section. Vertically propagating shear waves are generally considered the most critical type of waves for this mode of deformation. The axial and curvature deformations are induced by components of seismic waves that propagate along the longitudinal axis.

Free-Field Racking Deformation Method It has been proposed in the past that a rectangular tunnel structure be designed by assuming that the amount of racking imposed on the structure is equal to the "free-field" shear distortions of the surrounding medium, as shown in Figure 4 (i.e., Δfree-field = Δs). The racking stiffness of the structure is ignored with this assumption.

The free-field deformation method serves as a simple and effective design tool when the seismically induced ground distortion is small, for example when the shaking intensity is low or the ground is very stiff.

Under the loading from the design earthquake, inelastic deformation in the structure may be allowed depending on the performance criteria and provided that overall stability of the tunnel is maintained.

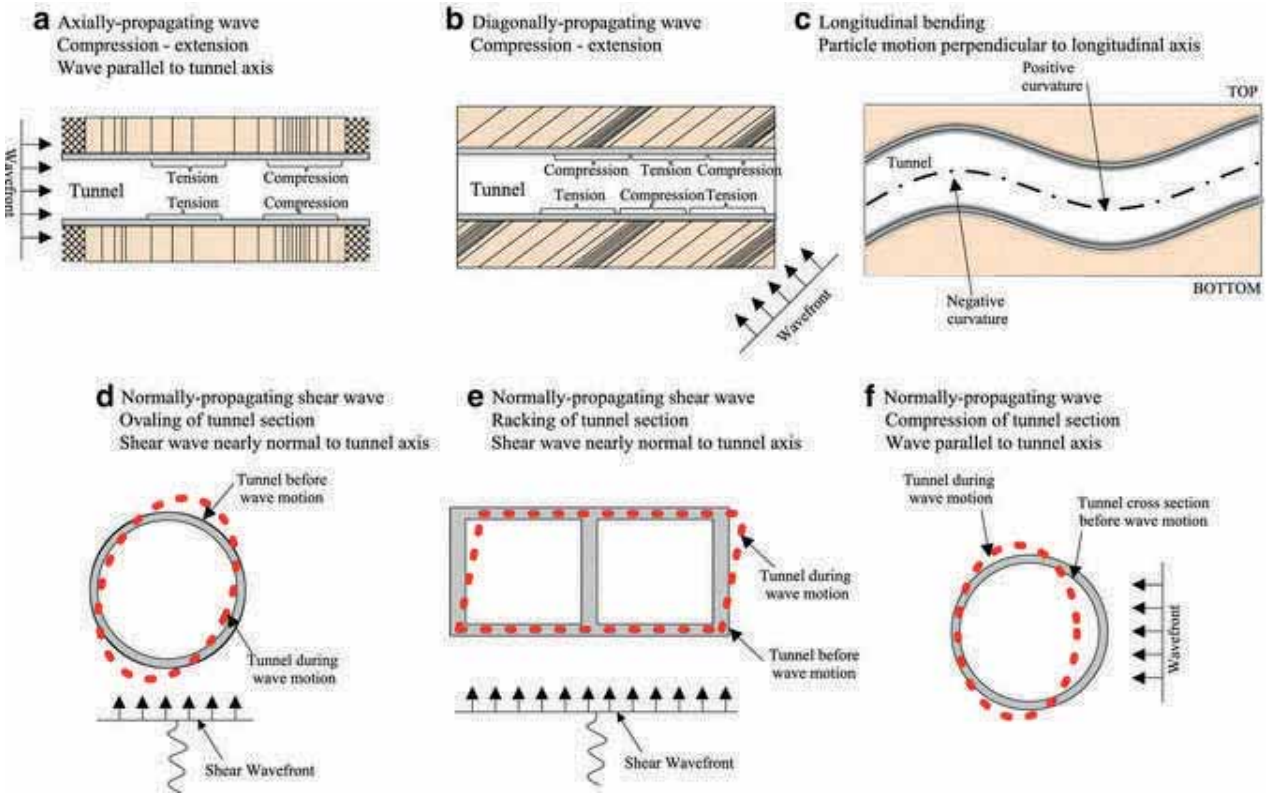


Figure 3 Tunnel Transverse Ovaling and Racking Response to Vertically Propagating Shear Waves

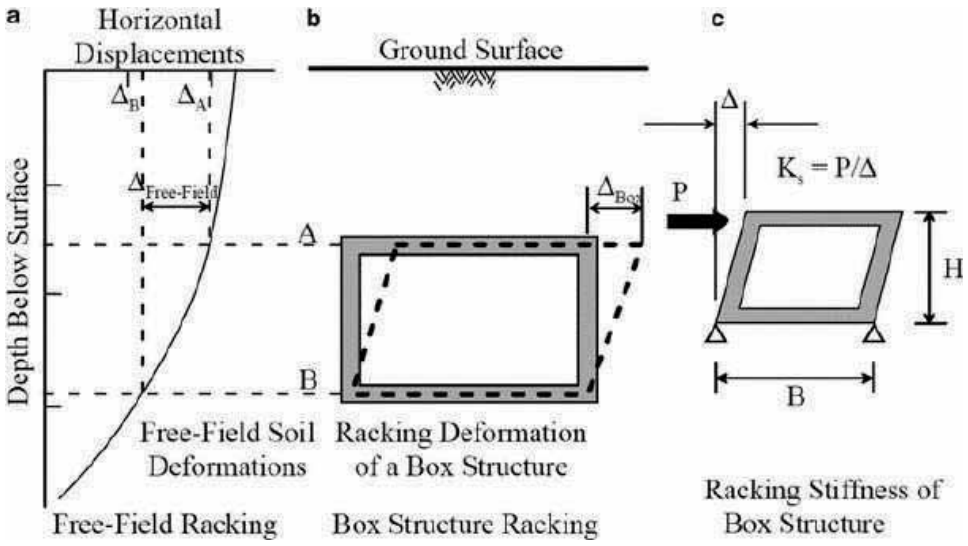


Figure 4: Soil Deformation Profile and Racking Deformation of a Box Structure

Detailing of the structural members and joints should provide for adequate internal strength, and ductility and energy absorption capability if inelastic deformation is anticipated.

Pseudo-Dynamic Time-History Analysis The procedure employed in pseudo-dynamic analysis is similar to that for the pseudo-static seismic coefficient deformation method, except that the derivation of the ground

displacements and the manner in which the displacements are imposed to the two dimension continuum system are different. The pseudo-dynamic analysis consists of stepping the soil-structure system statically through displacement time-history simulations of free-field displacements obtained by a site response analysis performed using vertically propagating shear waves.

Under the pseudo-dynamic loading, the transverse section of a tunnel structure will be subject to these induced ground distortions. Figure 5 shows an example of a two-dimensional continuum finite element analysis performed for an immersed tube tunnel structure subject to static stepping of a pseudo-dynamic displacement time history. In this model both the geologic medium and the tunnel structure were modeled as continuum solid elements. As indicated, in addition to the natural in-situ soils, the model can also consider the effect of the backfill material (within the dredged trench) on the ovaling/racking response of the tunnel structure. If warranted, the inelastic behavior of the tunnel structure can also be accounted for and incorporated into the model.

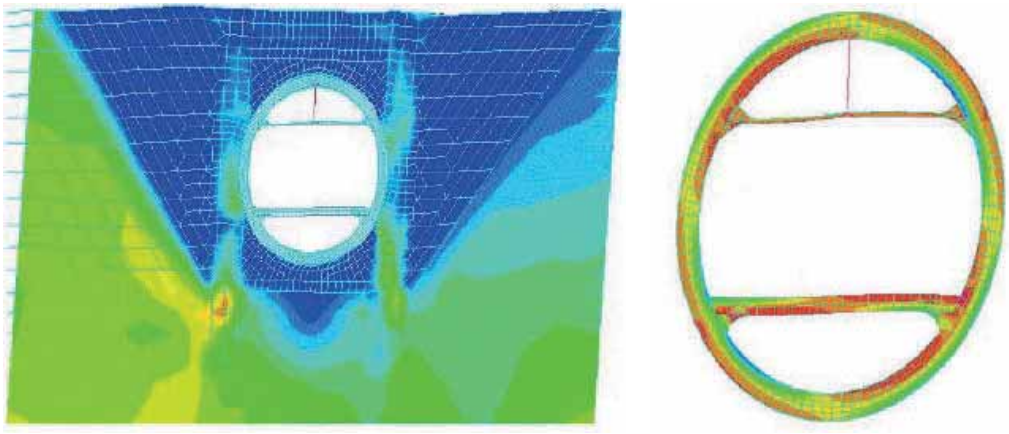


Figure 5 Example of Two-dimensional Continuum Finite Element Model in Pseudo- Time-History Analysis

The model shown in Figure 5 includes both the geologic medium and the structure in one model. Alternatively, the analysis can also be performed in a de-coupled manner, where the tunnel structure is analyzed separately from the surrounding geologic medium. This de-coupled analysis involves the following two general steps:

- Computing the scattered ground displacements at the perimeter of the tunnel cavity subject to the design earthquake, without the tunnel structure (note that these are the scattered motions and not the free-field motions, due to the presence of the cavity in the ground).
- Impose the displacements obtained at the perimeter of the tunnel cavity onto the tunnel structure through interaction soil springs to evaluate the seismic response of the tunnel structure. When appropriate, the interface conditions between the tunnel frame and the surrounding soil should allow for the formation of gaps as well as slippage.

Figure 5 shows a sample dynamic time history analysis using a two-dimensional continuum finite difference model for a cut-and-cover box structure. It should be noted that, the side boundary conditions in a dynamic time history analysis should be in such a manner that out-going seismic waves be allowed to pass through instead of being trapped within the soil-structure system being analyzed.

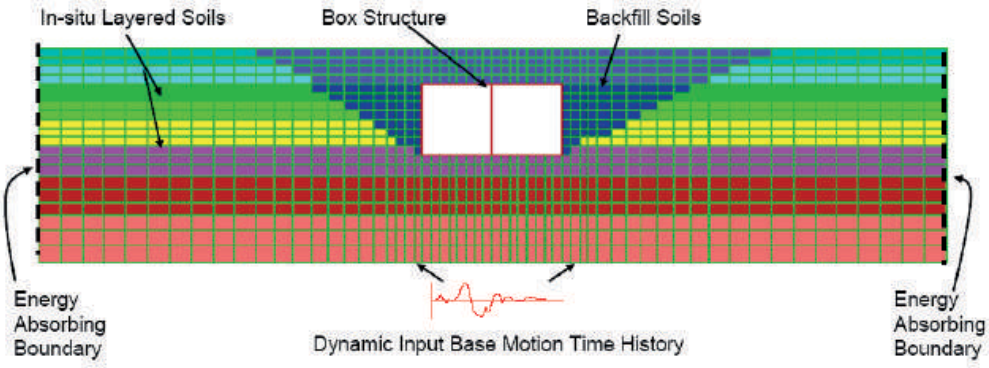


Figure 6: Sample Dynamic Time History Analysis Model

In general, analytical procedures for evaluating tunnels subjected to fault displacements can follow those used for buried pipelines. Three analytical methods have been utilized in the evaluation and design of linear buried structures. For detailed evaluation of transportation tunnels at fault crossing, however, it is generally believed that finite element method is more appropriate than other methods. The finite element method is preferred because it can incorporate realistic models of the tunnel and surrounding geologic media. The tunnel is modeled using finite elements, which may incorporate nonlinear behavior.

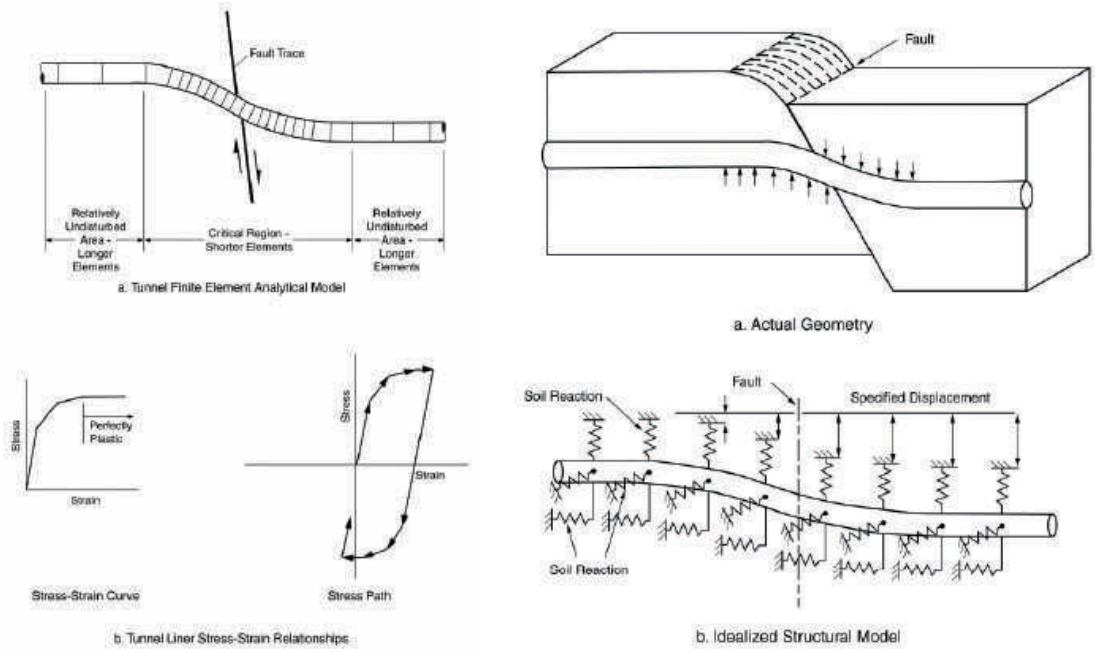


Figure 7: Analytical Model of Tunnel at Fault Crossing

Transverse and axial springs connected to the tunnel model soil normal pressures on the tunnel lining or walls and axial frictional resistance; these springs may also incorporate nonlinear behavior if applicable. Many commercially available finite element codes may be considered for analyzing the response of tunnels to fault displacement.

ANALYSIS OF CALCULATION RESULTS

Modal Analysis. .e modal analysis of the established model is carried out to determine the vibration frequency characteristics of each working condition. The surface acceleration is obviously larger than the free field, and the surface acceleration outside this range is different much to free field. Aanalyzing the effects of different types of seismic waves and the surface acceleration of the free field, and the soil-station model and soil displacement map are obtained in the depth direction under different seismic waves.

It can be seen from the figure that the influence law and degree of influence of different seismic waves on the soil response are different. Based on the surface acceleration response and soil displacement response, the influence of the El-Centro wave is larger than that of the Kobe wave.

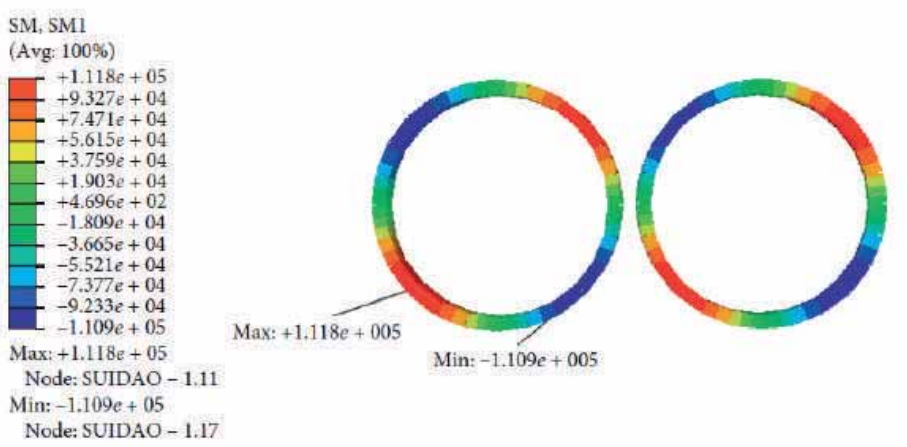


FIGURE 17: Bending moment cloud diagram of the tunnel structure.

Figure 8: Bending moment cloud diagram of the tunnel structure.

TSUNAMI WAVE IMPACT ON COASTAL TUNNELS

In the last two decades humanity has witnessed large magnitude earthquakes with epicenters in the ocean such as Indian Ocean 2004, Chile 2010 and Japan 2011, which generated tsunami waves of significant heights that caused unprecedented damage on coastal communities. Ports, buildings and infrastructure were severely damaged and tunnels were washed away, cutting lifelines and hindering the efforts of rescue team to provide help to the people in need. In the 2004 Indian

Ocean Tsunami 81 tunnels located on the coast of Sumatra were washed away. In the 2011 Great East Japan Earthquake in Japan, many tunnels were able to withstand the strong shaking, however approximately 252 tunnels were washed away or moved by the tsunami. The most severe and common type of failure in these tunnels was the breaking of the connections between the superstructure and the substructure, which resulted in the unseating and wash out of the tunnel deck by the tsunami waves.

The extensive damage of tunnels in recent tsunamis triggered the response of the society and research world in an attempt to improve the understanding of tsunami inundation of tunnels. The academic community from around the world has responded to this need and several studies have been published in recent years.

On-site investigations conducted by various research teams analyzed the failed tunnels and revealed that the overflow can occur either in the form of transverse drag due to large horizontal wave forces or in the form of uplift and overturning due to the combination of large vertical and horizontal tsunami. In addition, one of the studies, which investigated the tunnel performance in the Tohoku area after the 2011 tsunami, revealed

that concrete tunnels are less susceptible to tsunami inundation than steel tunnels due to their increased weight and thus inertia.

These experiments demonstrated that the offshore bearings were uplifted while the onshore were compressed meaning that there exists significant overturning moment. In addition, trapped air between girders and a rotating flow in the chambers was observed during the inundation of the tunnel.

While the majority of the aforementioned studies focused on the quantification of the tsunami induced horizontal and vertical forces, some recent studies revealed the application of significant overturning moment on tunnel decks.

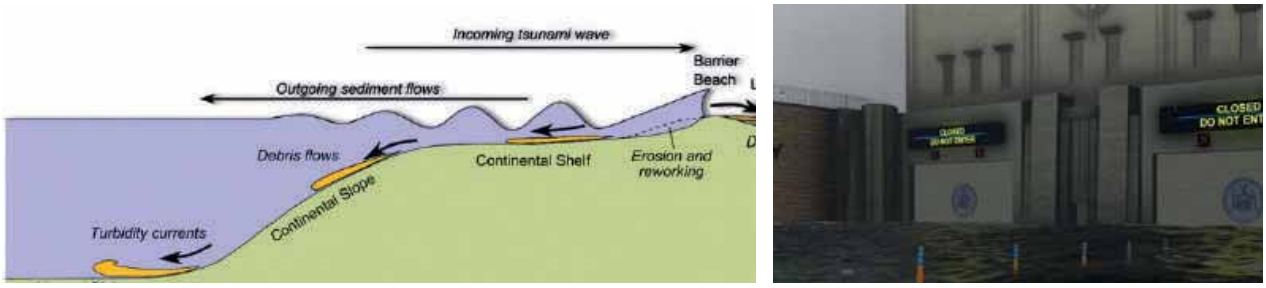


Figure 9: Tsunami Waves and Prevention Measures

CONCLUSIONS

In summary, the earthquake resiliency and risk assessment of tunnel structure may be achived by considering:

1. Influence of the underground structure on the dynamic response of soil: the station structure has a great impact whereas the tunnel structure has less impact on the surface response. .e range within which the station structure has a great impact on the surface response is five times the width of the station.
2. Impact of the tunnel on the dynamic response of the station: the existence of the tunnel can reduce the acceleration of the column in the station by pproximately10%; the impact of the net spacing between the tunnels is not obvious.
3. When the distance between the tunnel and the station is large, the acceleration of the column in the station is greatly weakened. .e existence of the tunnel structure increases the interlayer displacement angle of the station structure; the smaller the distance between the tunnel and the station and the smaller the spacing between the tunnels, the greater the increase in the displacement between the stations.
4. Impact of the station on the dynamic response of the tunnel: the station influences the acceleration of the shallow buried tunnel and the deep buried tunnel differently. In the case of the shallow buried tunnel, the existence of the station slightly amplifies the acceleration response at the top of the tunnel. In the case of the deep buried tunnel, the presence of the station weakens the acceleration response at the top of the tunnel.
5. As the spacing between the tunnels increases, the degree of attenuation decreases. .e presence of the station reduces the difference in displacement between the top and bottom of the tunnel, and with an increase in the spacing between the tunnels, the degree of attenuation decreases. presence of the station is conducive to reducing the internal force of the tunnel.

The tsunami resiliency and risk assessment of coastal tunnel structure may be achieved by considering:

6. The maximum total loads applied on rigid structures, but also the distribution of this load to individual structural components that are necessary for the survival of the structure,
7. The structural dynamics, which can have a major effect on the demand in structural members and connections, and
8. More realistic tsunami-like waves (e.g. bores) in addition to simplified unbroken solitary waves.

REFERENCES

1. Seismic Response Study of Tunnels Running underneath a Subway. Hindawi Shock and Vibration Volume 2020, Article ID 8822981, 15 pages https://doi.org/10.1155/2020/8822981
2. Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels. U.S. Department of Transportation Publication No. FHWA-NHI-10-034 Federal Highway Administration December 2009

INFLUENCIAS ADMISIBLES DE LOS TÚNELES SOBRE LA SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL Y SOCIOECONÓMICA DE LOS ACUÍFEROS ATRAVESADOS

César Fernández - Nespral Pérez
Dirección General de Carreteras. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana

El diseño, construcción y mantenimiento en servicio de un túnel, ejecutado en un acuífero, supone una interacción entre ambos, que debe ser analizada, a fin de hacerla compatible, de modo sostenible, con los condicionantes hidrogeológicos de sus entornos medioambiental y socioeconómico. Todo ello implica la realización de un Estudio Hidrogeológico, con notable esfuerzo en tiempo y coste económico, cuyo alcance y desarrollo deben ser graduados según las distintas fases del proyecto, comprendiendo también, la comprobación de sus resultados y previsiones durante la construcción y posteriormente en la vida en servicio.

Esta ponencia, basada en el contenido de la Guía técnica al respecto, de la Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas (AETOS), en avanzada redacción, define: la metodología, alcance, inversión económica y plazos de ejecución del Estudio Hidrogeológico necesario en cada fase del proyecto y ejecución de un túnel, graduándolo según las condiciones de este y del acuífero atravesado; las interacciones del túnel con el acuífero que deben ser consideradas y evaluadas, definiendo sus variables y parámetros para caracterizarlas; y los criterios y valores límites, que hacen admisibles las posibles influencias del túnel sobre el acuífero, teniendo en cuenta los condicionantes ambientales y socioeconómico del entorno.

Por último, como casos ilustrativos en Asturias, se describen la solución para mitigar el efecto pantalla en el Proyecto del nuevo túnel de Jove de acceso al Puerto de Gijón; y el aprovechamiento, en Ribadesella, del agua drenada por el túnel de El Fabar en la autovía A-8.

ADMISSIBLE TUNNEL INFLUENCES ON THE ENVIRONMENTAL AND SOCIO-ECONOMIC SUSTAINABILITY OF THE CROSSED AQUIFERS

The design, construction and service maintenance of a tunnel, executed in an aquifer, entails a mutual interaction with each other, which must be analysed, in order to make it compatible in a sustainable way with the hydrogeological conditioning factors of their natural and socio-economic environments. Accordingly, it involves the preparation of a Hydrogeological Study with a major economic and time effort, whose scope and development must be graded according to the different project phases, which also comprise the verification of their results and forecasts during the construction and subsequently in its service life.

This lecture is based on the contents of the Technical Guide of the Spanish Association of Tunnels and Underground Works (AETOS), which is currently being drafted to define: the methodology, scope, economic investment and execution periods of the Hydrogeological Study required in each project and execution phase of a tunnel, also grading it according to tunnel conditions and that of the crossed aquifer; the tunnel's interactions with the aquifer must be considered and assessed, defining their variables and parameters in order to characterize them; as well as the criteria and limit values, which make the potential tunnel influences admissible on the aquifer, taking into account the environmental and socio-economic conditioning factors of the surrounding area.

Finally by means of illustrative cases in Asturias, the solution is described to mitigate the screen effect in the new Jove Tunnel Project to access the Port of Gijón; and in Ribadesella, the use of the water drained from the El Fabar Tunnel in the A-8 Motorway.

INFLUENCES ADMISSIBLES DES TUNNELS SUR LA DURABILITÉ ENVIRONNEMENTALE ET SOCIO-ÉCONOMIQUE DES AQUIFÈRES TRAVERSÉS

La conception, la construction et la maintenance au service d'un tunnel, exécuté dans un aquifère, impliquent une interaction entre les deux, qui doit être analysée, afin de la rendre compatible, de manière durable, avec les conditions hydrogéologiques de leurs environnements environnementaux et socio-économiques. Tout cela implique la réalisation d'une étude hydrogéologique, avec un effort remarquable en temps et en coût économique, dont la portée et le développement doivent être gradués en fonction des différentes phases du projet, y compris la vérification de ses résultats et prévisions pendant la construction et plus tard dans la vie en service.

Cet article, basé sur le contenu du Guide technique à cet égard, de l'Association espagnole des tunnels et des travaux souterrains (AETOS), en rédaction avancée, définit: la méthodologie, la portée, l'investissement économique et les délais d'exécution de l'étude hydrogéologique nécessaires dans chaque phase du projet et de l'exécution d'un tunnel, en le graduant selon les conditions de celui-ci et de l'aquifère traversé; les interactions du tunnel avec l'aquifère qui doivent être considérées et évaluées, en définissant leurs variables et paramètres pour les caractériser; et les critères et valeurs limites, qui rendent admissibles les influences possibles du tunnel sur l'aquifère, en tenant compte des contraintes environnementales et socio-économiques de l'environnement.

Enfin, à titre de cas illustratifs dans les Asturies, la solution pour atténuer l'effet d'écran dans le projet du nouveau tunnel Jove pour l'accès au port de Gijón est décrite; et l'utilisation, à Ribadesella, de l'eau drainée par le tunnel El Fabar sur l'autoroute A-8.

1. INTRODUCCIÓN

Los túneles son el tipo de obra en donde las incertidumbres son mayores, debido a que se ubican bajo la superficie, dificultando la obtención y análisis de la información sobre el terreno y los acuíferos atravesados, y a que caracterizar la interacción hidrogeológica entre el túnel y el agua subálvea, aún hoy día ofrece grandes incertidumbres, no completamente resueltas.

Es sabido, que el agua subálvea ejerce presiones sobre el sostenimiento-revestimiento del túnel, provocando un flujo de infiltración, que debe ser captado y evacuado por el sistema de drenaje, y que, además, puede ocasionar precipitados salinos en los conductos, contaminación de acuíferos profundos vírgenes, y otras afecciones como procesos de agresión química al hormigón, de disolución kárstica en las rocas, de erosión interna ("piping") en los suelos, y/o de ejercer elevadas presiones por expansividad de las arcillas o por hidratación de sales sulfatadas; todo lo cual puede complicar tanto el diseño como la ejecución y explotación del túnel.

Por tanto, se debe asumir el hecho de que, al ser imposible evitar esa interacción, es obligado estudiarla para que sea asumible por el túnel y por el propio acuífero, considerando los caudales y niveles hídricos, que alimenta, en manantiales, ríos, lagos, regadíos, abastecimientos urbanos y/o aprovechamientos de energía hidroeléctrica, puesto que cada vez más, el agua es un recurso escaso y determinante para mantener, en un grado adecuado y admisible de equilibrio sostenible, el estado de los entornos medioambiental y socioeconómico del emplazamiento del túnel.

Aún con todo ello, como indican MITMA-ADIF (España) e ITA WG-15 Working Group, "el túnel es el tipo de infraestructura del transporte, cuyas construcción y existencia causa menos impacto sobre el entorno natural, dado que su implantación es subterránea"; y comparándolo con otras opciones, su efecto drenante sobre los acuíferos puede ser muy inferior al drenaje libre provocado por un desmonte o trinchera con rasante a cota similar, véase Figura 1.

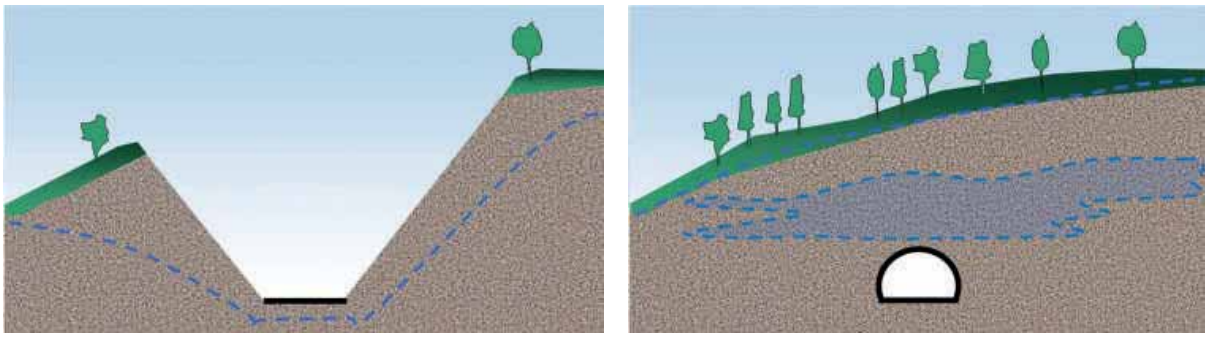


Figura 1. Efecto drenante sobre acuífero muy inferior en túnel respecto a desmonte o trinchera, con drenaje libre a una cota similar de rasante.

2. INTERACCIONES ENTRE TÚNEL Y ACUÍFERO

2.1. Influencia del túnel sobre el acuífero

Al no existir túneles absolutamente estancos, y menos durante la etapa constructiva, ni túneles completamente drenados, el túnel producirá siempre una modificación significativa en los niveles piezométricos de la red del flujo de filtración del acuífero atravesado, la cual puede dar lugar a los efectos que se indican a continuación.

Efecto drenante

Por lo general, los caudales captados por el sistema de drenaje, e infiltrados a través del revestimiento, producirán un descenso de los niveles piezométricos alrededor del túnel, véase Figura 2 adjunta, y se tendrá un "efecto drenante" sobre el acuífero atravesado, que puede alterar su balance hidrogeológico.

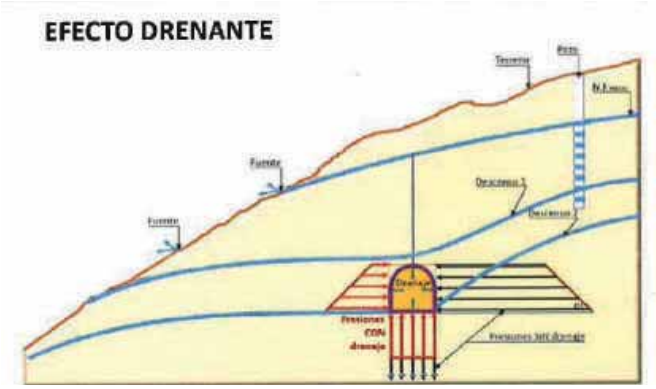


Figura 2. Esquema del efecto drenante de un túnel.

El caudal total, que ha de ser evacuado por el túnel, tendrá las dos siguientes componentes:

- Caudal captado. Definido en el proyecto, y que determina la capacidad del sistema de drenaje a construir en el túnel, comprendiendo la captación perimetral y los conductos de evacuación hacia ambos emboquilles.
- Caudal infiltrado. Limitado por el proyecto según la funcionalidad del túnel, e infiltrado por las discontinuidades (juntas, fisuras, coqueras, etc.) del revestimiento; acaba siendo evacuado también por el sistema de colectores del túnel.

con lo que, el caudal total, drenado por el túnel del acuífero, será la suma de ambos, sin olvidar los emboquilles del túnel y su posible drenaje adicional por sus taludes.

Este caudal total extraído del acuífero, considerando el túnel como un nuevo usuario del mismo, deberá ser admisible para la capacidad disponible de los recursos hídricos, siendo compatible con las características medioambientales y los aprovechamientos socioeconómicos ya existentes. Además, en ámbitos urbanos, la modificación del gradiente y de los niveles piezométricos del flujo del acuífero, pueden causar movimientos de subsidencia "hidráulica" con riesgo de inducir daños en edificaciones e infraestructuras, que pueden tener consecuencias socioeconómicas muy apreciables.

Efecto pantalla

En otros casos menos frecuentes, el túnel altera localmente la transmisividad del acuífero, siendo una barrera casi estanca para su flujo, que provoca elevación de los niveles piezométricos aguas arriba del túnel, y descensos aguas abajo, véase Figura 3. Este "efecto pantalla" puede ser significativo en túneles urbanos, ejecutados con el método de excavar y cubrir ("Cut and cover").

Este efecto debe analizarse en túneles urbanos, pues además de la subsidencia al descender los niveles piezométricos aguas abajo de ellos, pueden ser más importantes los asientos por colapso del terreno. También al saturarse con las elevaciones aguas arriba del nivel freático, los daños por la inundación de sótanos de edificaciones, infraestructuras y servicios subterráneos.

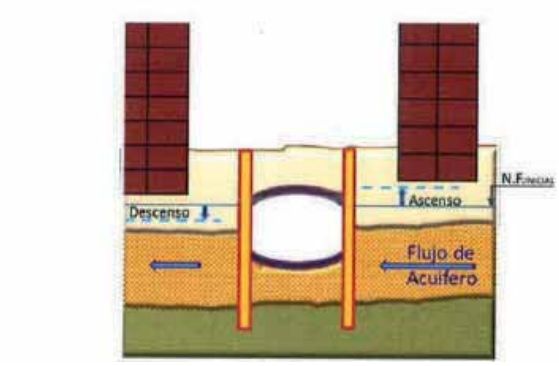


Figura 3. Esquema del efecto pantalla de un túnel.

Alteraciones del terreno.

La ejecución del túnel, durante la construcción o explotación, puede provocar alteraciones del terreno a su alrededor, por migración de finos limoarcillosos, cambios de humedad en arcillas expansivas, procesos de disolución en terrenos solubles (karstificaciones), precipitaciones de sales hidratadas (sulfatos y carbonatos), y presencia de productos contaminantes en el agua.

Alteraciones sobre la calidad del acuífero.

No debe olvidarse la posible influencia, sobre la calidad del agua del acuífero, de las afecciones causadas por la explotación del túnel, como aumento de su dureza por los lixiviados de hormigones del sostenimiento-revestimiento, y los vertidos contaminantes del tráfico. Estos últimos, que pueden ser importantes, también ocurren en tramos de carretera sin túnel.

2.2. Efectos del acuífero sobre el túnel

La parte del flujo de filtración del acuífero, modificada y extraída por el túnel, origina principalmente un caudal infiltrado y presiones del agua sobre el sostenimiento-revestimiento, que van variando durante las etapas de construcción y ya en servicio. No obstante, hay terrenos singulares, ya citados, donde pueden ser inducidas otras acciones extraordinarias sobre el túnel, que están propiciadas por la modificación sufrida por el acuífero.

Caudales infiltrados

En la etapa constructiva, la cuantía del caudal infiltrado ha de permitir los trabajos de excavación, sin retrasarlos ni coste excesivo de su evacuación; y especialmente, sin afectar a la seguridad de lo excavado, ni del entorno cercano del túnel.

Durante la explotación del túnel, esa cuantía está limitada, con mayor rigor, por la durabilidad y el mantenimiento de las instalaciones; y sobre todo, por los niveles admisibles de la seguridad funcional del servicio prestado por el túnel. Esta última limitación, que es establecida por la propiedad del túnel, varía con los distintos países y usos del túnel, sin que exista un consenso internacional generalizado sobre ello, tal como se indica más adelante.

Presiones sobre el sostenimiento-revestimiento

Como refleja la Figura 4 adjunta, el efecto drenante del túnel hace que las presiones de agua sobre su sostenimiento-revestimiento, sean inferiores a las de antes de excavarlo y tan solo podrían igualarse con su estanqueidad perfecta, la cual es imposible en la práctica.

La cuantía y variación de esas presiones dependen de la solución constructiva, según las medidas drenantes o impermeabilizantes del túnel, y tan solo pueden ser evaluadas, de modo aproximado, por los modelos del conjunto acuífero-túnel en el estudio hidrogeológico. Estos modelos han de considerar las fases de obra y en servicio del túnel; el aumento de permeabilidad, producido en el terreno de la corona de descompresión de la sección excavada; y la estanqueidad debida, tanto a la lámina impermeable entre sostenimiento y revestimiento, como a los posibles tratamientos con pre o post-inyecciones durante la ejecución.

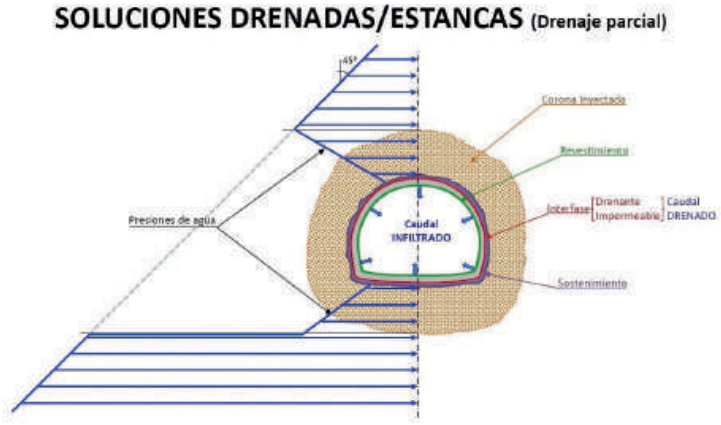


Figura 4. Soluciones con drenaje parcial.

En general los túneles de carretera se diseñan como drenados; y en la práctica no existe la estanqueidad absoluta, ni tampoco un drenaje perfecto, que mantenga los niveles piezométricos por debajo de la solera o contrabóveda del túnel.

Acciones extraordinarias

Asimetrías en las presiones sobre sostenimiento-recubrimiento, debidas a heterogeneidades en la permeabilidad del terreno, por variación en el relleno de discontinuidades o de tubos kársticos, por obstrucción del drenaje del túnel con precipitados salinos, véase Foto 1, por flujos súbitos en zonas de falla, etc.

Foto 1. Colector de drenaje obstruido por precipitados de sales carbonatadas en el Túnel de Niévares de la Autovía A-8 en Asturias.

Otras afecciones

Alteraciones químicas por contaminantes en el acuífero, que puedan afectar a los hormigones o drenajes del túnel; y sobre-empujes o presiones extraordinarias del terreno, especialmente sobre la solera o contrabóveda, provocadas por la expansividad de las arcillas o margas, o por la precipitación en las discontinuidades del terreno de sales en estado hidratado.

3. CLASIFICACIONES PARA ESTUDIAR LA INTERACCIÓN TÚNEL-ACUÍFERO

3.1. Acuíferos según su grado de explotación

Para analizar si la influencia del túnel será admisible sobre el acuífero atravesado, deben comprobarse los recursos hídricos disponibles en este último; por tanto, el estado y grado de explotación del acuífero, previos a la construcción del túnel, son la base de partida imprescindible para hacerlo, y se clasifican como sigue:

- Acuíferos poco o moderadamente explotados, que tienen recursos excedentes, por lo que la influencia del túnel tiende a ser admisible a menos que los caudales drenados sean excesivos. Suelen estar en zonas montañosas, donde hay poca demanda de agua para abastecimiento, industria o riegos. Sus niveles piezométricos oscilan al ritmo de los ciclos hidrológicos secos y húmedos, (estacionales o hiperanuales), y no obligados por la influencia de posibles extracciones de agua.
- Acuíferos explotados, en situación normal: los recursos disponibles están en equilibrio con las extracciones, e incluso pueden tener algunos excedentes de agua. Por tanto, los niveles piezométricos tienden a mantenerse constantes. Desde el punto de vista de la explotación del acuífero, la construcción de un túnel implica la entrada de un nuevo usuario de los recursos netos disponibles, a través del caudal drenado. Por lo tanto, será necesario estudiar en detalle la influencia del túnel sobre el acuífero para determinar si es admisible extraer ese caudal. Estos acuíferos figuran habitualmente en los catálogos oficiales de los organismos de gestión de los recursos hídricos, por lo que generalmente son estudiados y controla-dos sistemáticamente.
- Acuíferos en riesgo de sobreexplotación: sus niveles piezométricos descienden de forma general y continuada en periodos anuales con recarga inferior a la media. Aunque se recuperen en periodos húmedos, será necesario evaluar con la máxima precisión y detalle las consecuencias de la extracción del caudal drenado y, en muchos casos, plantear el proyecto para limitar su magnitud. El objetivo de estos análisis es evitar que la construcción del túnel provoque que el acuífero pase a estar en situación de sobreexplotado.
- Acuíferos sobreexplotados: la declaración administrativa de sobreexplotación implica generalmente la prohibición de extraer de nuevos caudales, por lo que la influencia producida por un túnel drenado será, en principio, inadmisible. Tan sólo será admisible si se proyecta y construye un túnel estanco y, en cualquier caso, será necesario estudiar en detalle la influencia de la fase de obra sobre el funcionamiento del acuífero; o podría proyectarse un túnel drenado si se compensara el caudal extraído recargándolo en el acuífero de modo continuado y permanente. En cualquier caso, los organismos de gestión de recursos exigirán unas sólidas justificaciones técnicas de que la influencia del proyecto es admisible desde el punto de vista hidrogeológico.
- Acuíferos relacionados con espacios protegidos: son aquéllos que, independientemente de su grado de explotación, están relacionados con espacios naturales protegidos sobre los que los organismos de control y gestión medioambiental suelen imponer unas limitaciones a la magnitud de las influencias admisibles sobre ellos. El proyecto de un túnel debe asegurar que se respetan dichas limitaciones, frecuentemente más restrictivas que las impuestas por el grado de explotación de los recursos.

3.2. Características del túnel y su influencia esperable sobre el acuífero atravesado

Son aspectos determinantes para el alcance y contenido del estudio hidrogeológico, a realizar en cada fase del proyecto; y por tanto, para los plazos y costes económicos de su ejecución. Deben considerarse los tres criterios que se indican a continuación.

3.2.1. Rango del túnel según su tamaño

Como es lógico, la longitud y diámetro del túnel son los parámetros por considerar; y la Figura 5 adjunta refleja el Rango que corresponde a cada túnel por este concepto.

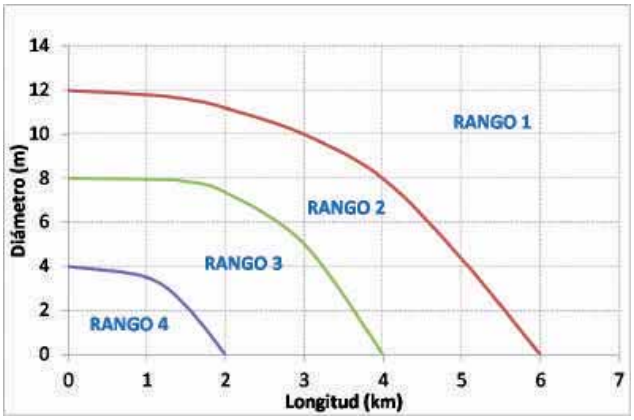


Figura 5. Clasificación del túnel según su longitud y diámetro

3.2.2. Entornos físico, hidrogeológico y medioambiental del túnel

Son aspectos decisivos para una evaluación preliminar de la interacción esperable entre túnel y acuífero; y se clasifican en los Tipos de interacción de la Tabla 1 adjunta.

Tabla 1. Tipos de interacción con entornos físico, hidrogeológico y medioambiental del túnel

TIPO[1]	ENTORNO FÍSICO Y ACUÍFEROS	CAUDAL DRENADO ACUÍFERO[2] (l/min/100m)
I	Túnel fuera de acuíferos	Nulo
II	Acuífero poco permeable[3] ($k<10^{-5}$ cm/s) y/o desnivel piezométrico (<10 m)[4]	Bajo (<50)
III	Acuífero permeable ($k<10^{-4}$ cm/s) y/o desnivel piezométrico medio (<100 m)	Medio (50-150)
IV	Acuífero muy permeable (k>10-4 cm/s) y/o desnivel piezométrico alto (>100 m)	Alto (>150)
V-1	Túnel con posibles heladas	-
V-2	Túnel urbano dentro de acuífero	-
V-3	Túnel con alteraciones singulares del terreno o la calidad del agua del acuífero, así como con acciones o situaciones extraordinarias para su seguridad y/o la durabilidad[5]	-

[1] Para asignar cada tipo de interacción a un túnel, bastará con cumplir una de las condiciones indicadas para cada caso, y el tipo final será el correspondiente a la numeración más elevada.

[2] Caudal esperable en un túnel de 10 m de diámetro, excavado por métodos clásicos, sin tuneladora ni actuaciones previas de impermeabilización o rebajamiento.

[3] Permeabilidad máxima en el acuífero influido.

[4] Diferencia de cota entre nivel freático o piezométrico del acuífero y solera del túnel.

La entidad de los acuíferos en el trazado suele basarse en información ya existente, como mapas hidrogeológicos, balances hídricos, etc., que, al ser documentación interpretable, y por lo general con finalidad distinta a la construcción del túnel, puede conducir a errores como:

- Sobrevalorar acuíferos con importancia solamente en algunas zonas lejos del túnel.
- No detectar algunos, por ser subvertical la estratificación del terreno y estar en sectores localizados del túnel, apareciendo luego en obra, como sucedió en el túnel de El Fabar.
- No considerar masas de agua superficiales, ni los flujos subálveos de los ríos, cuya interacción debe considerarse
- No considerar acuitardos, que pueden dar lugar a efectos pantalla en zonas urbanas, como el considerado en el proyecto del túnel de Jove.
- Por último, deben tenerse en cuenta afecciones a acuíferos muy distantes, cuando hay procesos kársticos que facilitan el flujo de filtración hacia el túnel.

3.2.3. Modo de interacción y grado de influencia sobre el acuífero

Hay relación directa entre el modo de interacción y el grado de influencia, previsibles inicialmente según las clases de la Tabla 2, y el tipo de estudio hidrogeológico a realizar.

Tabla 2.- Túnel según su influencia sobre el acuífero atravesado

CLASE	MODO DE INTERACCIÓN	GRADO DE INFLUENCIA	TIPO DE ACUÍFERO	ENTORNOS DEL TÚNEL (TIPOS según Tabla 1)
A	Inexistente	Nula	Sin relación con acuíferos	I
B	Indirecta	Baja	Zona saturada sin acuífero explotable	II y/o V-1
C	Directa	Media	Acuífero explotable	III y/o V-2
D	Directa y Compleja	Alta	Acuífero explotable	IV y/o V-3

- La clase A, es la que se produce en la mayoría de los túneles cortos.
- La clase B, es la más frecuente en túneles de carreteras.
  - Zonas que no tienen relación directa con aguas subterráneas, pero se detecta su presencia en tramos muy fracturados o accidentes tectónicos saturados.
  - Zona con desniveles o discontinuidades, que pueden poner en contacto masas de agua superficiales y subterráneas. Túneles en tramos karstificados fuera de zona saturada.
- La clase C, afecta claramente a un acuífero, y se debe evaluar la compatibilidad de la influencia del túnel con un estudio hidrogeológico adecuado.
- La clase D, con interacción compleja, requiere precisión máxima en el estudio hidrogeológico.
- En todo caso, debe mantenerse el sistema de drenaje del túnel, auscultando al menos el caudal drenado y el nivel piezométrico sobre su solera, en las obras y la explotación del túnel.

3.3. Caudal infiltrado admisible según la funcionalidad del túnel

El caudal infiltrado es el no captado por el sistema de drenaje del túnel y por consiguiente, afecta a la durabilidad de su sostenimiento-revestimiento, y sobre todo, a la seguridad y al nivel funcional de su servicio durante la explotación. Por ello, este caudal está limitado por el gestor del túnel, según su uso, y aunque no hay un consenso internacional generalizado, la Tabla 3 resume las categorías que suelen considerarse al respecto.

Tabla 3. Clasificación de túneles y caudales admisibles orientativos según su funcionalidad

FUNCIONALIDAD	CATEGORÍA INFILTRACIÓN	CAUDAL ADMISIBLE[1] (l/min/100 m)
Almacenaje de fluidos	Seco	<0,02
Ferroviario con sistema electrificado	Muy baja	0,02-1
Carretero, peatonal	Baja	3-10
Ferroviario no electrificado y otros servicios	Moderada	5-20
Colectores y alcantarillado	Alta	10-30

[1] Para asignar cada tipo de interacción a un túnel, bastará con cumplir una de las condiciones indicadas para cada caso, y el tipo final será el correspondiente a la numeración más elevada.

4. ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO A REALIZAR

Con las clasificaciones anteriores, se puede efectuar una aproximación inicial a la problemática de cada caso, la cual, al aumentar su conocimiento con la información obtenida en cada fase del proyecto, irá evolucionando, y podrá ser modificada, considerando nuevas clasificaciones.

Tres son los objetivos concretos del estudio hidrogeológico por realizar: desarrollar un modelo conceptual o numérico del flujo subterráneo antes del túnel; evaluar con el modelo anterior la interacciones entre túnel y acuífero, con la precisión adecuada a cada fase del proyecto; y de no ser admisible la influencia sobre el acuífero, usar también ese modelo para analizar la eficacia de las posibles actuaciones en el túnel (métodos constructivos y medidas de estanqueidad), y/o en el propio acuífero (pantallas aislantes y pozos de recarga).

Esos objetivos son conceptualmente los mismos en todos los proyectos de túnel atravesando un acuífero. No obstante, el tipo y cuantía de las herramientas de investigación hidrogeológica, y de los trabajos de campo y gabinete para obtener y analizar los resultados, deberán ser crecientes con las fases de cada proyecto, y como es lógico, con la magnitud del problema.

4.1. Alcance en cada fase del proyecto

Todo ello concluye en la necesidad de efectuar un estudio hidrogeológico, que analice la compatibilidad del túnel con el acuífero, considerando aquel como un nuevo usuario con sus propias particularidades, cuyas fases deben estar coordinadas con las fases del proyecto, y adaptadas progresivamente a la interacción resultante entre túnel y acuífero.

El alcance, grado de objetivos y las actuaciones a desarrollar, recomendados para cada fase del estudio hidrogeológico se resumen en la Tabla 4 adjunta; mientras que su contenido, herramientas, y trabajos técnicos, a emplear según la clase del túnel establecida en la Tabla 2 anterior, se indican en la Tabla 5 siguiente. Puede observarse que las clases C y D de interacción del túnel con el acuífero explotable, requerirán una investigación hidrogeológica con un mínimo de dos etapas o campañas.

Tabla 4.- Alcance del estudio hidrogeológico según la fase del proyecto.

Fase del estudio	Alcance mínimo	Actividades a desarrollar	Influencia admisible	Actuaciones
Fase I, estudio informativo	Modelo hidrogeológico conceptual + Evaluación cualitativa de las influencias con modelo analítico	Recopilación de estudios existentes	Sí / No	En caso negativo, análisis cualitativo de las influencias
		Inventario de puntos de agua, cuerpos de agua superficiales y observaciones hidrometeorológicas y piezométricas históricas		
		Investigación geofísica y sondeos de reconocimiento		
		Topografía y cartografía geológica, e hidrogeológica, con muro y techo de acuíferos		
		Modelo hidrogeológico conceptual, determinando interac túnel-acuífero		
Fase II, proyecto de trazado	Modelo hidrogeológico numérico + Evaluación cuantitativa de las influencias	Ampliación de datos en el entorno del túnel: geofísica, sondeos, cartografía geológica, e hidrogeo-lógica, muro y techo de acuíferos	No	Análisis cuantitativo de las influencias
		Desarrollo y ajuste del modelo numérico regional de flujo		
		Modelo numérico modificado para simular el túnel con datos del proyecto de trazado		
	Evaluación cualitativa de medidas de control	Modelo conceptual	Si	-
Fase III, proyecto constructivo	Modelo hidrogeológico numérico refinado + Submodelos detallados	Ampliación de datos en el entorno del túnel: geofísica, sondeos, cartografía geológica, e hidrogeo-lógica, muro y techo de acuíferos	No	Reevaluación cuantitativa de las influencias
		Mejora del modelo numérico de flujo		
		Desarrollo de submodelos detalla-dos a partir del modelo general		
	Reevaluación cuantitativa de las influencias	Modelo numérico modificado para simular el túnel con datos del proyecto constructivo	Si	Necesidad de medidas de mitigación (Sí/No)
	Evaluación cuantitativa de las medidas paliativas (submodelos)	Modelo numérico modificado para simular el túnel y submodelos de detalle de las zonas donde se analizan las medidas paliativas		Selección de medidas de mitigación que cumplen las limitaciones
Fase IV, obra	Verificación de las interacciones in situ	Auscultación, redes de observación y control	No	Adopción de medidas correctoras
			Si	-

Tabla 5. Contenido del estudio hidrogeológico, según la Clase del túnel

CONTENIDO	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D
1. INVENTARIO Y RECOPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN	X	X	X	X
2. INVESTIGACIÓN 1. EN SUPERFICIE 1. Cartografía Geología e hidrogeología de superficie 2. Inventario de puntos de agua e Hidrología de superficie. 2. INVESTIGACIÓN EN PROFUNDIDAD 1. Investigación geológica y geotécnica	 X X X	 X X X	 X X X	 X X X
3. GEOLOGÍA 1. Litología, petrología, mineralogía 2. Modelo geológico y estructural (planta y perfiles)	X	X	X	X
4. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y DE LOS MATERIALES. 1. Rocas macizo rocoso, litotipos, accidentes tectónicos. 2. Suelos.	X	X	X	X
5. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS MATERIALES	X	X	X	X
6. MODELO CONCEPTUAL	X	X	X	X
7. SEGUIMIENTO DE LA RED DE CONTROL. 1. Meteorológico 2. Niveles piezómetros 3. Aforos		X	X	X
8. SEGUNDA CAMPAÑA DE INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA 1. Prospecciones 2. Ensayos in situ y de bombeo 3. Ensayos de laboratorio			X	X
9. MODELO NUMÉRICO REGIONAL			X	X
10. MODELOS DE DETALLE				X
11. PLAN SEGUIMIENTO EN OBRA	X	X	X	X
12. PERFECCIONAMIENTO Y ACTUALIZACIÓN EN FASE DE OBRA	X	X	X	X

4.2. Inversión económica y plazos de ejecución del estudio hidrogeológico

La evaluación de la inversión y el plazo requeridos para la ejecución del estudio hidrogeológico debe realizarse para las distintas fases del proyecto del túnel, y resulta difícil dar unas recomendaciones generales válidas para todos los casos, dado que las situaciones, los condicionantes e incluso la concreción de los objetivos no siempre coinciden en todos los proyectos. No obstante, con base en la experiencia adquirida, pueden recomendarse unos criterios lógicos aproximados, que permitan evaluar ambos aspectos, en función de los resultados de aplicar al túnel, las clasificaciones de los epígrafes anteriores, así como de la complejidad hidrogeológica del acuífero atravesado.

4.2.1. Inversión económica según la fase del proyecto

La valoración económica (V_E), para las tres fases típicas del proyecto y la fase de obra, puede evaluarse en función del coste económico, estimado en cada una de esas fases para la excavación y el sostenimiento-revesti-

miento del túnel, teniendo en cuenta la clase del túnel según el grado de influencia sobre el acuífero de la Tabla 2 anterior, y la complejidad hidrogeológica del acuífero atravesado según se indica a continuación; pero sin incluir los costos de las actuaciones especiales, que resultarán necesarias para hacer admisible la influencia del túnel sobre el acuífero. Para ello debe emplearse la siguiente formulación:

$$V_E = V_b \cdot k \cdot C_T$$

siendo

V_b = valoración económica básica (%) indicada en la Tabla 6 adjunta, según la clase del túnel (A, B, C o D) y Fase del proyecto.

k = coeficiente de complejidad hidrogeológica del acuífero atravesado por el túnel (baja, media, elevada) indicado en la Tabla 7 adjunta.

C_T = presupuesto estimado para excavación y sostenimiento - revestimiento del túnel, sin incluir equipamientos ni actuaciones especiales para hacer admisible su influencia sobre el acuífero.

Tabla 6. Valores del coeficiente BÁSICO (V_b)[1] para la Valoración Económica del estudio hidrogeológico según las Fases del proyecto

CLASE DE TÚNEL[i]	FASES DEL PROYECTO			FASE IV: OBRA [ii]
	FASE I: PLANEAMIENTO BÁSICO	FASE II: PROYECTO TRAZADO	FASE III: PROYECTO CONSTRUCTIVO	
A	0,5 %	1%	1,5%	0,5%
B	0,7%	1,5 %	2%	1%
C	1%	2%	3%	2%
D	1,5%	3%	6%	3%

[1] % del coste de excavación y sostenimiento-revestimiento del túnel, sin incluir actuaciones especiales para hacer admisible influencia sobre acuífero. Valores acumulativos de una fase a otra.

[2] Según la clasificación de la Tabla 2 anterior.

[3] Seguimiento de instrumentación y nuevos trabajos de campo y gabinete

Tabla 7.- Valores del coeficiente (k) por complejidad hidrogeológica para la valoración económica del estudio hidrogeológico

NIVEL DE COMPLEJIDAD	CARÁCTER DEL ACUÍFERO	FASES DEL PROYECTO[1]			FASE DE OBRA[i]
		PLANEA.	TRAZ.	CONST.	
BAJO	Homogéneo, granular, permeabilidad por porosidad (primaria)	1,0	1,0	1,0	1,0
MEDIO	Irregular con permeabilidad por fracturación (secundaria)	1,1	1,2	1,5	1,5
ELEVADO	Irregular con permeabilidad secundaria y fallas, karstificaciones, o procesos singulares (hinchamiento, explosividad, contaminación, etc…)	1,4	1,6	2,0	2,0

[1] Planeamiento, Trazado o Constructivo

Como debe existir una proporción razonable entre el presupuesto dedicado a la obtención de la información de campo, y lo invertido en los trabajos de ingeniería, es recomendable que estos últimos supongan una fracción del 10 al 30 % de la Valoración Económica anterior, cifra que debe ser mayor en las fases iniciales del proyecto y con la clase de túnel; y reducirse en las clases A y B de túnel respecto a la clase C, y sobre todo, a la clase D.

Esta valoración se ha estimado a partir de la información obtenida en túneles construidos con éxito, y es criterio mejor para evaluar la inversión económica necesaria, que el basado en la ratio metro de sondeo mecánico por metro lineal de túnel, utilizado desde antiguo. Este último criterio es más apropiado para evaluar los plazos de cada fase del estudio hidrogeológico.

4.2.2. Plazos de ejecución

Los plazos de ejecución de las investigaciones de campo y de adquisición del resto de información hidrogeológica, son predominantes en el plazo final de cada fase, y están correlacionados directamente con la duración de los otros trabajos y de la ingeniería de gabinete; por tanto, esta última puede estimarse a partir de los primeros, y el plazo total correspondiente a cada fase del estudio hidrogeológico puede obtenerse con la suma de ambos.

Como la cuantía de los trabajos de campo y de adquisición de demás datos hidrogeológicos, depende principalmente de la longitud de sondeo mecánico necesaria por metro de túnel (L_s), se emplea este parámetro de referencia, para evaluar esa medición, aplicándole los coeficientes correctores por la longitud y profundidad (h) del túnel de la Tabla 8, y por su Rango (r) de la Tabla 9 adjuntas. De esta forma, se tiene la siguiente formulación para ello:

$$L_s = L_T \cdot h \cdot r$$

en donde

L_s = longitud total de sondeo mecánico necesaria

L_T = longitud total del túnel

h = coeficiente obtenido de la Tabla 8 según profundidad (HT) y Longitud (LT) del túnel

r = coeficiente indicado en la Tabla 9, según rango del túnel en la Figura 4 anterior.

En la aplicación de esta formulación anterior se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La cuantía o medición de metros de sondeo mecánico necesarios (Ls), engloba todos los sondeos con recuperación continua de sondeo, que deben realizarse para las investigaciones geológico-geotécnica e hidrogeológica.
- Deben computarse tan solo las longitudes de sondeo situadas a menos de diez diámetros de túnel desde la clave de este último

Tabla 8.- Valores del coeficiente (h) por longitud y profundidad del túnel, para estimación de la longitud de sondeos necesaria en el estudio hidrogeológico

LONGITUD TÚNEL (Km)	< 2,5		2,5 a 10	>10
PROF./LONG. TÚNEL	0,1 a 0,2	0,4 a 0,6	(1)	(1)
VALOR de h (2)	0,9 a 0,6	2,1 a 0,9	0,9 a 0,3	0,25

[1] Valor independiente de la profundidad del túnel

[2] Valores decrecientes con la longitud total del túnel

Tabla 9.- Valores del coeficiente (r) según Rango del túnel para obtener la longitud total de sondeo mecánico en el estudio hidrogeológico.

RANGO DE TÚNEL (1)	1	2	3	4
VALOR DE r	2'0	1'5	1'2	1'0

[1] Rango del túnel según clasificación de la figura 4

Una vez establecida esta cuantía para cada fase del estudio hidrogeológico, pueden evaluarse sus plazos de ejecución (P_t) para cada túnel, con lo que el plazo total para cada fase se obtendrá con la suma de ese plazo y el correspondiente al resto de los trabajos e ingeniería de gabinete (D_t). La proporción entre estos últimos y la ejecución de los sondeos mecánicos va disminuyendo al avanzar las fases del proyecto del túnel.

En la Fase I de planeamiento básico, las prospecciones de campo a realizar serán escasas, y predominará el aprovechamiento de la información hidrogeológica ya existente; por tanto, la duración de la ingeniería de gabinete será determinante, y podrá durar un mínimo de seis meses, aumentando con el rango y clase de túnel.

En la Fase II de proyecto de trazado, las prospecciones de campo a realizar serán significativas, con lo que la duración de los trabajos de gabinete será similar al plazo de ejecución de ellas, debiendo considerarse una duración mínima igual a la fase de Planeamiento anterior.

En la Fase III de proyecto constructivo, esa duración relativa disminuye pudiendo oscilar entre la mitad y el doble del plazo de ejecución de las prospecciones de campo, no debiendo ser inferior a un año para permitir un seguimiento representativo mínimo de los niveles piezométricos del acuífero.

Finalmente, como es lógico, en la Fase IV de obra la duración de estos trabajos de ingeniería de gabinete no debe ser inferior al plazo de construcción de túnel (excavación, sostenimiento - revestimiento y actuaciones especiales asociadas a la interacción con el acuífero), y es recomendable que comprenda, al menos, un ciclo hidrogeológico hiperanual representativo.

4.3. Análisis de los condicionantes hidrogeológicos

Se trata de comprobar la compatibilidad admisible del túnel, considerándolo como un nuevo usuario adicional a los ya existentes, con el acuífero atravesado, tanto respecto a su entorno medioambiental de caudales y niveles hídricos en ríos y lagos, como a su aprovechamiento socioeconómico para abastecimiento urbano, regadío agrícola, o/y de energía hidroeléctrica.

Como cualquier análisis técnico, el estudio de la evaluación de las influencias túnel-acuífero, y su admisibilidad, no es un proceso lineal, sino que puede ser necesario iterar algunos pasos cuando los resultados lo requieran. En túneles de gran longitud se puede atravesar un sistema de acuíferos distintos, cada uno de los cuales puede tener también características y condicionantes distintos, y requerir diferentes fases en esa iteración.

En términos generales, el esquema metodológico a seguir, que se ha recogido en la Figura 6 adjunta, debe tener un desarrollo progresivo con las fases del proyecto del túnel, de forma que el avance en la caracterización del túnel permitirá su incorporación al modelo de la situación previa del acuífero, para definir y valorar sus influencias mutuas. La evaluación de estas últimas será cualitativa, o bien cuantitativa, con base en los modelos del acuífero, de tipo conceptual, o bien analítico o numérico, realizados en el estudio hidrogeológico de cada fase del proyecto.

Se debe comenzar con un modelo conceptual del sistema hidrogeológico atravesado por el túnel, véase Figura 7, en el que se recogerá la información de los aprovechamientos existentes, y se analizará su comportamiento, describiendo los términos de su balance hídrico, previa identificación, al menos cualitativa, de los acuíferos, ríos, lagos, manantiales y otros elementos conectados con él; y siendo el túnel un nuevo usuario que deberá ser compatible con sus entornos medioambiental y socioeconómico.

A continuación, se evaluarán, mediante un modelo ya cuantitativo del acuífero, los caudales drenados y los niveles piezométricos, analizando ya las interferencias túnel-acuífero, que podrían llegar a modificar el trazado del túnel, caracterizando las influencias sobre el acuífero, y definiendo el tipo de impermeabilización y revestimiento en el túnel (drenado o estanco).

Posteriormente deberá ampliarse el modelo del acuífero, incluyendo al túnel, y examinar las influencias mutuas, viendo si resultan admisibles; o bien las medidas correctoras a adoptar, que pueden ser en el túnel, con tratamientos perimetrales de impermeabilización y/o revestimiento estanco, o en el propio acuífero, mediante recarga profunda con pozos, trasvase transversal al túnel, o pantallas impermeables de aislamiento de este último.

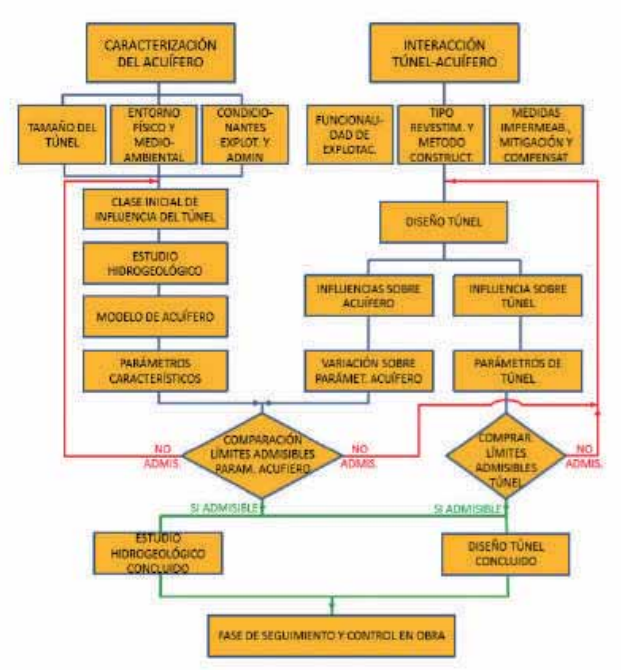


Figura 6.- Esquema de flujo para análisis de los condicionantes hidrogeológicos

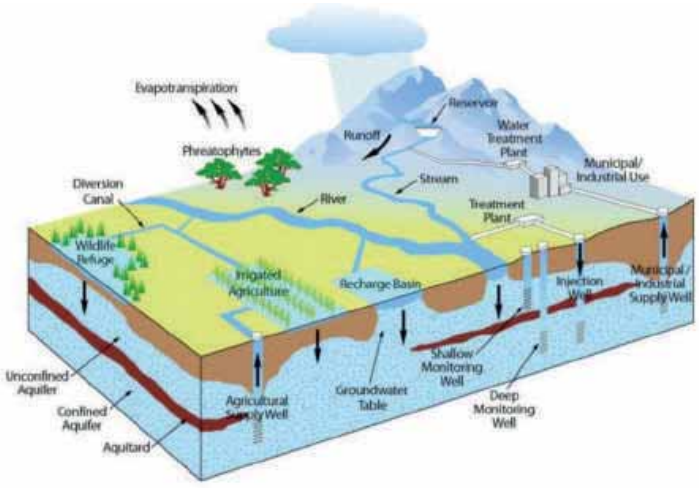


Figura 7.- Ejemplo tridimensional de un modelo conceptual de acuífero

5. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TÚNEL SOBRE EL ACUÍFERO

5.1. Recursos del acuífero e influencias del túnel

Los recursos hídricos del acuífero, definidos en su modelo hidrogeológico, caracterizan su comportamiento medioambiental y socioeconómico; y condicionan el efecto drenante del túnel, haciendo necesarias o no, actuaciones de mitigación o compensatorias.

Recursos disponibles. Es la diferencia entre la recarga total media y el flujo necesario para mantener el caudal ambiental, en las corrientes conectadas con el acuífero.

Recursos netos. El resultado de detraer las explotaciones ya existentes en el acuífero; es decir, la diferencia entre el recurso disponible y los aprovechamientos socioeconómicos ya existentes.

En general, el límite admisible, para el máximo caudal drenado por el túnel, se establece en función de los recursos disponibles en acuíferos poco explotados; y de los recursos netos en los acuíferos ya explotados. Dada la variabilidad de la precipitación anual, la compatibilidad del túnel debe estar asociada a la probabilidad del 90 % de mantener ese recurso neto del acuífero, una vez detraído el caudal total drenado por el túnel.

Por otra parte, el flujo de los acuíferos está regulado por la Ley de Darcy, que relaciona sus variables básicas, caudales y niveles piezométricos, a través del gradiente de filtración y la permeabilidad del terreno. El túnel provoca distintos tipos de modificaciones o influencias en esas variables hidrogeológicas, que pueden producirse a escalas global o local, según indica la Tabla 10 adjunta.

Una primera referencia, para fijar los valores admisibles de los caudales extraídos y los descensos de los niveles piezométricos, es el análisis de las series históricas de registros asociados a ellos en el acuífero. Si se dispone de ellas, los valores admisibles de la variación de los caudales y niveles piezométricos se pueden fijar en el 20% de la diferencia, entre el valor de esas variables en el año medio y en los años secos para los descensos por el efecto drenante del túnel, o en los años húmedos para los ascensos por su posible efecto pantalla, definidos esos años seco o húmedo como los correspondientes a los percentiles del 25% y 75%, respectivamente, de la serie histórica de años.

Tabla 10.- Clasificación de las influencias del túnel sobre el acuífero

TIPO DE INFLUENCIA	Escala	
	Global	Local
I1.- Modificación del funcionamiento del acuífero	SÍ	-
I2a.-Modificación de aprovechamientos hídricos (recursos)	-	SÍ
I2u.- Entornos urbanos o infraestructuras (niveles)	-	SÍ
I3.- Modificación de la estructura y composición del terreno	-	SÍ
I4- Modificación de acuíferos relacionados con espacios protegidos	SÍ	SÍ

El impacto del túnel sobre el acuífero con influencia del tipo I1, modifica su funcionamiento global, afectando a su totalidad; y es especialmente importante en los espacios medioambientales protegidos.

Las influencias que modifican los aprovechamientos hídricos previos, del tipo I2a, y/o afectan a ámbitos urbanos o de infraestructuras existentes, del tipo I2u, modifican los recursos hídricos y/o los niveles piezométricos, respectivamente, y tienen escala local.

Las influencias que modifican la estructura y/o composición del terreno, del tipo I3, suelen tener escala local, pueden afectar principalmente al propio túnel, y tan solo pueden ser significativas para el funcionamiento del acuífero en macizos con procesos kársticos.

5.2. Influencias admisibles según la fase del proyecto

5.2.1. Influencia sobre funcionamiento del acuífero (tipo I1)

Ya hemos mencionado la necesidad de realizar el estudio hidrogeológico por fases y comentamos que la Fase I era básicamente cualitativa; por ello, en esta Fase I, el conocimiento aproximado es insuficiente para dictaminar la compatibilidad del túnel en acuíferos, cuya explotación no sea escasa. En las Fases II y III siguientes, la compatibilidad deberá analizarse, considerando el grado de explotación del acuífero y el margen de sus recursos netos en años húmedo y medio. Todo ello con los límites admisibles definidos en la Tabla 11, en donde también se indican disposiciones a prever cuando el acuífero está sobreexplotado.

Tabla 11. Límites admisibles para las influencias de Tipo I1 sobre el acuífero

CAUDAL DRENADO MÁXIMO POR EL TÚNEL		
EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO	**FASES del Estudio Hidrogeológico**	
	Fase I	**Fases II y III**
ESCASA	10 % Recarga Media	20 % Diferencia entre Recursos Netos en años húmedo y medio
NORMAL	Conocimiento Insuficiente	20 % Diferencia entre Recursos Netos en años húmedo y medio
SOBREEXPLOTADO	Conocimiento Insuficiente	Revestimiento drenado con recarga acuífero Revestimiento estanco, justificación en obra y servicioÍ

T5.2.2. Influencia sobre el aprovechamiento hídrico (Tipo I2a)

Al ser de carácter local, el límite admisible se establece respecto a los caudales preexistentes de los aprovechamientos, según sus registros históricos, aplicando los criterios de la Tabla 12.

Tabla 12. Límites admisibles para las influencias de Tipo I2a sobre el acuífero

REDUCCIÓN MÁXIMA DE CAUDAL EN APROVECHAMIENTOS		
REGISTROS HISTÓRICOS	**FASES del Estudio Hidrogeológico**	
	Fase I	**Fases II y III**
DISPONIBLES	20 % Diferencia caudal en años Húmedo y Medio	20 % Diferencia caudal en años Húmedo y Medio
NO DISPONIBLES	Sin aprovechamientos en 2.5 veces el radio de influencia de pozo	20 % Diferencia caudal en años Húmedo y Medio (evaluación con modelo numérico)

5.2.3. Influencia sobre entorno urbano (Tipo I2u)

Se aplicarán los criterios de la Tabla 13 siguiente, basados en las series de registros históricos.

De no disponer de esas series históricas de niveles o caudales, el descenso podrá evaluarse al final de las Fases II y III cuando haya modelos numéricos generales y/o detallados del acuífero. Además, puede establecerse un valor máximo absoluto de 2 m, en ascenso o descenso, como límite admisible de la variación para los niveles piezométricos.

Tabla 13. Límites admisibles para las influencias de Tipo I2u en acuíferos

REDUCCIÓN MÁXIMA DE CAUDAL EN APROVECHAMIENTOS		
REGISTROS HISTÓRICOS	**FASES del Estudio Hidrogeológico**	
	Fase I	**Fases II y III**
DISPONIBLES	ELEVACIONES de nivel: 20 % Diferencia niveles piezométricos en años Húmedo y Medio DESCENSOS de nivel: 20 % Diferencia niveles piezométricos en años Húmedo y Seco	EVALUACIÓN CON MODELO NUMÉRICO: ELEVACIONES de nivel: 20 % Diferencia niveles piezométricos en años Húmedo y Medio DESCENSOS de nivel: 20 % Diferencia niveles piezométricos en años Medio y Seco
NO DISPONIBLES	OBSTRUCCIÓN túnel < 80% de ESPESOR SATURADO en acuíferos TIPOS III o IV VALOR MÁXIMO DE ELEVACIÓN O DESCENSO NO supera los 2 m en acuíferos TIPO II	EVALUACIÓN CON MODELO NUMÉRICO: ELEVACIONES de nivel: 20 % Diferencia niveles piezométricos en años Húmedo y Medio DESCENSOS de nivel: 20 % Diferencia niveles piezométricos en años Medio y Seco

6. CASOS DE TÚNELES EN ASTURIAS CON ACTUACIONES DE MEJORA DE SU SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL Y SOCIOECONÓMICA

Como ejemplos de medidas correctoras aplicadas en Asturias tenemos el túnel de Jove, influencia tipo I2u, y el Túnel de El Fabar con influencia tipo I2a, que mejoran su integración medioambiental y socio económica.

6.1. Actuación correctora del efecto pantalla en el túnel de Jove de acceso al Puerto de Gijón

Finalizado el revestimiento previsto, la sección transversal estanca del túnel provoca un efecto pantalla, al interrumpir el flujo de agua subterránea, en un tramo cercano al mar de 240 m de longitud; por tanto, serán necesarias disposiciones que capten el agua en la margen aguas arriba del túnel, y la recarguen al terreno, en la otra margen aguas abajo del túnel.

La solución adoptada, véase Figura 8, comprende pilotes de 1 m de diámetro, rellenos con grava drenante, y separados 7 m entre ejes, que se ejecutarán adosados a las pantallas laterales del túnel, empotrados 1 m en el sustrato rocoso. En cada margen estos pilotes quedarán conectados, en su parte superior y a la altura de la lo-

sa de cubierta del túnel, por sendas zanjas drenantes provistas de arquetas, que en cada sección transversal estarán conectadas con un tubo colector pasante a través de la cubierta.

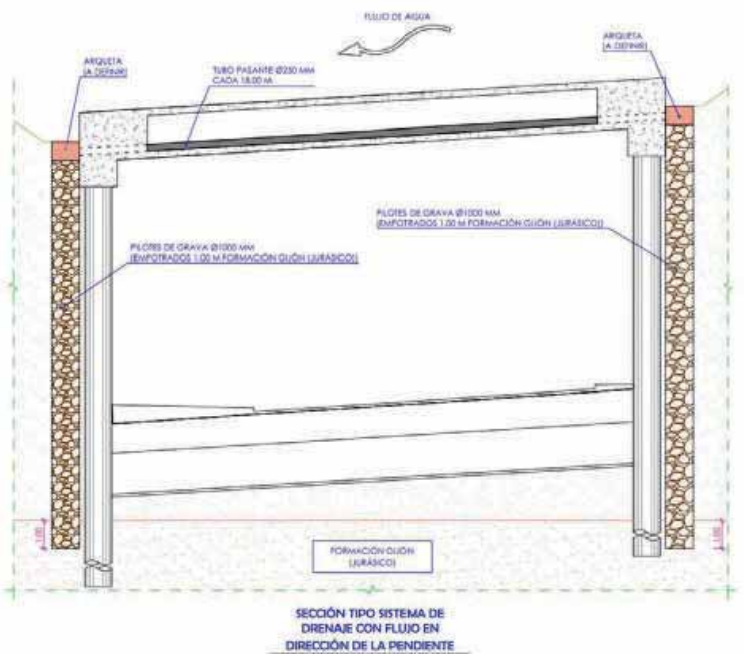


Figura 8.- Trasvase transversal para mitigar el efecto pantalla en túnel de Jove

6.2. Aprovechamiento del caudal drenado en el túnel de El Fabar en Ribadesella

En la autovía A-8 del Cantábrico, en la construcción del túnel ordovícico del Fabar, se atravesó un acuífero, véase Foto 2, detrayendo un caudal medio de 30 l/s de él, siendo un recurso hídrico significativo en el concejo de Ribadesella.

Para compatibilizar los recursos disponibles del acuífero con el efecto drenante del túnel, se ha aprovechado el caudal captado por su sistema perimetral de drenaje, realizando obras complementarias, consistentes en un depósito de regulación, véase Foto 3, y un sistema de depuración del agua aprovechada, que supuso un incremento del 12,5 % en el coste del túnel.

Foto 2.- Acuífero túnel ordovícico del Fabar

Foto 3.- Depósito de regulación formado por estratificación cuasi vertical.

7. CONCLUSIONES

La construcción de un túnel, atravesando un acuífero, genera interacciones con los flujos de agua subterránea y con los cursos y masas de agua superficiales. Estas influencias pueden modificar las variables, que caracterizan los entornos medioambiental y socioeconómico del acuífero, como caudales y niveles piezométricos de su flujo circulante, calidad del agua, aprovechamientos de abastecimiento, regadío y energía hidráulica, o la estructura del terreno.

Por tanto, cualquier proyecto de obra pública, pues un desmonte con rasante similar al túnel tiene un mayor efecto drenante sobre el acuífero, debe analizar las distintas soluciones desde el punto de vista del impacto hidrogeológico que provoca, a fin de reducir a un mínimo admisible las influencias de la obra en sus entornos medioambiental y socioeconómico; y de ser necesario, mitigar ese impacto mediante un proyecto y ejecución adecuados de la obra, que incorporen medidas paliativas eficaces y suficientes, junto con posibles actuaciones compensatorias externas al proyecto.

La metodología de ese estudio hidrogeológico, y sus resultados perseguidos, deben ser similares sean cuales sean las características del túnel y del acuífero atravesado. Sin embargo, el grado de esfuerzo en el estudio realizado, que es definido por el tipo y cuantía de sus trabajos de campo y las herramientas de análisis utilizadas, debe aumentar con la entidad del problema a resolver, y según las sucesivas fases del proyecto, la ejecución de la obra y, finalmente, su explotación.

Hoy día, no existe un consenso internacional generalizado sobre el modo de realizar el análisis y valorar la compatibilidad hidrogeológica de un nuevo túnel con los entornos medioambientales y socioeconómicos de su emplazamiento.

La propuesta de esta ponencia, basada en la Guía técnica al respecto de AETOS, en avanzada redacción:

- Hace recomendaciones sobre el alcance y contenido del estudio hidrogeológico a realizar en las distintas fases del proyecto, la construcción y la explotación del túnel, considerando el tipo y la entidad de las características de la interacción entre túnel y acuífero; y definiendo, a partir de la experiencia de los túneles construidos con éxito, sus costes económicos y los plazos de su ejecución.
- Y propone una metodología para evaluar y establecer los valores admisibles de referencia, de las principales variables que caracterizan las influencias, o modificaciones a escalas global o local, del túnel sobre el acuífero, durante las fases de proyecto, construcción y explotación.

Estos tipos de impacto o influencia que deben ser analizados, y cuyos límites admisibles se han establecido con valores específicos para cada túnel y su entorno medioambiental y socioeconómico, son las modificaciones a escala global del funcionamiento del acuífero, sobre todo en espacios medioambientales protegidos; y las modificaciones a escala local del aprovechamiento de sus recursos hídricos, de los niveles piezométricos en ámbitos urbanos o infraestructuras, o/y de la estructura o composición del terreno del emplazamiento.

En ese análisis se deben considerar distintas alternativas de diseño para el túnel, con adecuada elección de su comportamiento estanco o drenado y del método constructivo; y de ser necesario, definiendo tratamientos preventivos o paliativos, junto a posibles actuaciones compensatorias externas al proyecto. Todo ello con un sistema de auscultación y seguimiento para verificar los resultados obtenidos durante la construcción y ya en servicio el túnel.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer a la Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas (AETOS), su apoyo y colaboración para hacer público, parte del contenido de la Guía Técnica sobre "Condicionantes hidrogeológicos para el diseño, ejecución y mantenimiento de túneles", que está en avanzada redacción por su Grupo de Trabajo WG 15. Underground and enviroment, del cual es miembro.

BIBLIOGRAFÍA

AETOS Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas Guía Técnica "Condicionantes hidrogeológicos para el diseño, ejecución y mantenimiento de túneles" (Borrador. Marzo 2019 / Grupo de Trabajo WG 15 de AETOS).

AFTES Working Group No. 14 (Maintenance and Repair), (1989), Recommendations for the Treatment of Water Inflows and Outflows in Operated Underground Structures, Tunnelling and Underground Space Technology.

AITES-ITA Working Group No. 6 (Maintenance and Repair), 2001, Study of Methods for Repair of Tunnel Linings.

CALIFORNIA DEPARTMENT OF WATER RESOURCES. (December 2016). "Hydrogeologic Conceptual Model BMP" Best Management Practices for the sustainable Management of Groundwater.

CUSTODIO, E, LLAMAS, M.R. (1976). "Manual de Hidrología subterránea". ISBN 9788428204477, Ediciones Omega S. A., Barcelona (España).

DIRECTIVA MARCO DEL AGUA (2000). "DIRECTIVA 2000/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas". Diario Oficial de las Comunidades Europeas, Bruselas (Bélgica).

FHWA-NHI-10-034 (2009) Technical manual for design and construction of road tunnels – civil elements.

FWA, USDOT, (2005), FHWA Tunnel Leak Assessment Boston Central Artery Interim Report, FHWA Tunnel Leak Assessment Team report.

HAACK, A., (1988), Basic Methods and Latest Development of Sealing Techni-ques in Germany, Proc. of the International Congress on Tunnels and Water, Madrid, Spain, Balkema, A.A. (editor), 155-159.

HAACK, A., (1991), Water Leakages in Subsurface Facilities: Required Watertightness, Contractual Methods and Methods of Redevelopment, Tunnelling and Underground Space Technology.

ITA (1991) Working Group on Maintenance and Repair of Underground Structures. Report on the Damaging Effects of Water on Tunnels During Their Working Life.

ITA (2013) Design Guidance for Spray Applied Waterproofing Membranes - Page 27 Nº ISBN: 978-2-9700858-1-2 ITA tech report N°2.

OTEO, C., (2016) El agua y los túneles. Revista de Obras Públicas, ISSN 0034-8619, Nº.3579, 2016, páginas 6-16.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, REPÚBLICA DE COLOMBIA (2000), "Proyecto de Evaluación y Exploración de Aguas Subterráneas, Mapa 3.1 Mapa Hidrogeológico de la Sabana de Bogotá, (Colombia).

REGLAMENTO DEL DOMINIO PÚBLICO HIDRÁULICO (1986), "Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas". «BOE» núm. 103, de 30 de abril de 1986, Madrid (España).

LEY 29/1985, DE 2 DE AGOSTO, DE AGUAS (1985), BOE núm. 189, de 8 de agosto de 1985, Madrid (España).

CONDICIONES MÍNIMAS DE EXPLOTACIÓN (CME)

José Ramón Ochoa Vega
AECOM

Se aborda un problema de gran interés que afecta a todos los usuarios de un túnel, especialmente los habituales: ¿Qué condiciones mínimas debe cumplir el equipamiento instalado en un túnel para poder seguir en explotación sin tener que cerrarse al tráfico? El objetivo es que la infraestructura maximice el número de horas de explotación en situación normal o, visto de otro modo, presente las mínimas restricciones de tráfico.

Estas condiciones mínimas de explotación (CME) quedarán reflejadas en el Manual de Explotación del túnel. En su elaboración intervienen fundamentalmente Director de Explotación, Gestor y Responsable de Seguridad del túnel. Los servicios de emergencia, representados en su conjunto por Protección Civil, deberán ser consultados, bien por ser posibles usuarios de los equipos de extinción (Bomberos), bien porque el túnel puede formar parte de un itinerario prioritario para servicios sanitarios o de emergencia.

La Autoridad Administrativa, responsable última de la infraestructura, debe estar informada, ya que en función de la gravedad de la afección y del tiempo de cierre, el incidente puede derivar en unas consecuencias mayores de las previstas.

En primer lugar, se hace necesaria una clasificación del equipamiento y su asignación individual a una o varias funciones que garantice una correcta y segura explotación. Estas funciones se han buscado en cumplimiento de la Norma Básica de Autoprotección.

Seguidamente se revisarán los conceptos de función "compensable" y "redundante" pudiendo justificar que la infraestructura opere en un modo degradado temporalmente considerando tiempos de reparación y medidas compensatorias. Por último, se realiza una matriz funcional para analizar por separado cada equipamiento, análisis que ayudará a determinar las CME.

MINIMUM OPERATING REQUIREMENTS (MOR)

A problem of great interest that affects all users of a tunnel is addressed: What minimum requirements must the equipment installed in a tunnel meet in order to continue operating? The objective is that the infrastructure maximizes the number of hours of operation in a normal situation. In other words: presents the minimum traffic restrictions.

These minimum operating requirements (MOR) will be reflected in the tunnel Safety Documentation. In its elaboration are fundamentally involved Tunnel Manager and Tunnel Safety Officer. The emergency services, represented as a whole by Civil Protection, should be consulted, either because they are possible users of the firefighting equipment (Firefighters), or because the tunnel may be part of a priority itinerary for health or emergency services.

Administrative Authority, ultimately responsible for the infrastructure, must be informed, since depending on the severity of the condition and the closing time, the incident may lead to greater consequences than expected.

In the first place, it is necessary to classify the equipment and its individual assignment to one or several functions that guarantee a correct and safe operation. These functions have been selected in compliance with Self-protection Standard.

Next, the concepts of "compensable function" and "redundant system" will be reviewed, being able to justify that infrastructure operates in a temporarily degraded mode considering repair times and compensatory measures. Finally, a functional matrix is performed to analyze each equipment separately, an analysis that will help determine MOR.

CONDITIONS MINIMALES D'EXPLOITATION (CME)

Une problématique de grand intérêt est abordée qui concerne tous les usagers d'un tunnel, notamment les usagers habituels : Quelles conditions minimales les équipements installés dans un tunnel doivent-ils remplir pour continuer à fonctionner sans avoir à être fermés à la circulation ? L'objectif est que l'infrastructure maximise le nombre d'heures de fonctionnement en situation normale ou, vue d'une autre manière, présente le minimum de restrictions de circulation.

Ces conditions minimales d'exploitation (CME) seront reprises dans le manuel d'exploitation du tunnel. Dans son élaboration, le directeur des opérations, le gestionnaire et le responsable de la sécurité du tunnel sont fondamentalement impliqués. Les services de secours, représentés dans leur ensemble par la Protection Civile, doivent être consultés, soit parce qu'ils sont des utilisateurs potentiels du matériel de lutte contre l'incendie (Sapeurs-Pompiers), soit parce que le tunnel peut faire partie d'un itinéraire prioritaire pour les services de santé ou de secours.

L'Autorité administrative, ultime responsable de l'infrastructure, doit en être informée, car selon la gravité de l'état et l'heure de fermeture, l'incident peut entraîner des conséquences plus importantes que prévu.

En premier lieu, il est nécessaire de classer l'équipement et son affectation individuelle à une ou plusieurs fonctions qui garantissent un fonctionnement correct et sûr. Ces fonctions ont été recherchées conformément à la norme de base d'autoprotection.

Ensuite, les concepts de fonction "compensable" et "redondante" seront passés en revue, pouvant justifier que l'infrastructure fonctionne dans un mode temporairement dégradé compte tenu des délais de réparation et des mesures compensatoires. Enfin, une matrice fonctionnelle est réalisée pour analyser chaque équipement séparément, analyse qui permettra de déterminer le CME.

EQUIPAMIENTO DEL TÚNEL

La Directiva Europea 54/2004 y el RD-635/2006 enumeran y describen brevemente las medidas de seguridad a implantar en túneles de carretera en función de longitud e intensidad de tráfico. Estas medidas son relativas al equipamiento y a las características de la propia infraestructura: Número de carriles, salidas de emergencia, aceras, apartaderos, drenaje, firme, resistencia al fuego, etc.

Respecto al equipamiento, objeto de este apartado, puede clasificarse en diferentes grupos y categorías. La siguiente propuesta define ocho grupos y describe brevemente los equipos o sistemas incluidos cada uno de ellos, sin carácter exhaustivo:

Acometidas: El túnel y en su caso el Centro de Control asociado deben dotarse de suministro energético y de abastecimiento de agua.

La energía procederá de la red eléctrica o bien de una fuente propia: baterías de acumuladores (SAI), aparatos autónomos o grupos electrógenos. Forman parte del suministro energético las celdas, transformadores, cuadro general de baja tensión, cuadros secundarios, etc. Además, debe disponerse al menos un analizador de redes para recopilar datos de consumo eléctrico y que permita visualizar remotamente desde centro de control.

El suministro de agua contra incendio abastece a los elementos de extinción (Hidrantes, BIEs, rociadores, o columna húmeda) o directamente es utilizada por bomberos para llenar su cisterna. Proviene generalmente de uno o varios aljibes de almacenamiento dimensionados para un determinado caudal y tiempo de suministro. El control de nivel del aljibe debe monitorizarse para asegurar el correcto abastecimiento en todo momento. El centro de control, en su caso, deberá disponer también de abastecimiento de agua.

Alumbrado: La normativa citada indica tres variantes:

- Explotación que incluye, en su caso, el alumbrado exterior de entrada y salida.
- Seguridad o subconjunto del anterior y alimentado por SAI y cuando éste se agota, por grupo electrógeno.
- Emergencia o evacuación.

En su caso, deben añadirse en este apartado, el alumbrado de guiado y el alumbrado utilizado para señalizar equipos de seguridad, salidas de emergencia, apartaderos, galerías, etc.

Por último, pueden considerarse los dispositivos para regulación de los niveles del alumbrado de explotación: Luminancímetro, célula fotoeléctrica, reloj astronómico, reductor de flujo, etc.

Ventilación: El sistema se compone de ventiladores axiales o de chorro, y en el caso de ventilación transversal, se añaden las compuertas de apertura comandada y su control.

Los algoritmos del sistema de control de ventilación incluyen señales de los propios ventiladores (horas de funcionamiento, sensor de vibración, sondas de temperatura, etc.), de anemómetros interiores y estaciones meteorológicas y finalmente de elementos de detección (monóxido de Carbono, óxidos de Nitrógeno, lineal de incendios), y opacímetros. Estos últimos elementos y otros que también pueden afectar a los algoritmos como señales del sistema DAI y apertura de poste SOS, se integrarán en otras categorías.

Finalmente, los vestíbulos de las salidas de emergencia se dotan de ventiladores de presurización que suelen ser de tipo centrifugo. El sistema se controla mediante sondas de presión diferencial y compuertas de regulación y alivio.

Protección contra incendios: Principalmente se clasifica el equipamiento en dos grupos: Extinción y Detección. La extinción puede clasificarse según quien utilice los equipos:

- Bomberos: Hidrantes, y columna o tubería seca.
- Usuarios en general: Extintores y bocas de incendio equipada.

Además, el túnel puede contar con un sistema de rociadores y en determinados cuartos técnicos pueden instalarse sistemas de extinción automática ligados a una detección tipo VESDA.

Por otra parte, la detección de incendios contempla un sistema lineal en túnel y los sistemas puntuales en cuartos técnicos y otras dependencias y que junto a pulsadores de alarma y sirenas conectan a una centralita local que a su vez envía señales al centro de control.

Aunque no son estrictamente sistemas de detección de incendios, opacímetros, detectores de gases así como sistemas anti-intrusión y de seguridad perimetral pueden considerarse en este grupo.

Control de tráfico: En este grupo se incluye la señalización variable: Paneles de mensajería variable (PMVs) señales de limitación de velocidad (CLV), paneles Aspa-Flecha y semáforos, tanto interiores como en los accesos al túnel. Formarán parte de este grupo las barreras de cierre físico del túnel y el sistema de aforos para medir intensidad de tráfico y velocidades.

Monitorización: El Circuito Cerrado de Televisión (CCTV) a través de los avisos de la Detección Automática de Incidentes (DAI) en las cámaras interiores, se ha convertido en el principal sistema de supervisión de la explotación de un túnel. Deben considerarse también las cámaras térmicas que incluyen su propio DAI.

El panel de visualización o "Video Wall" y las aplicaciones que lo controlan posibilitan, entre otras funciones, cambiar tamaños de imágenes, rotar periódicamente entre distintas cámaras, así como insertar en una localización determinada del mismo una cámara que está dando una alerta DAI.

Finalmente podrían incluirse los sistemas de lectura de matrículas o de placas de vehículos que transportan mercancías peligrosas, así como el sistema videograbador que permite la revisión de incidentes y otras funciones de seguridad.

Comunicaciones: Pueden distinguirse en función del usuario o destinatario del sistema:

- Todos los usuarios: Poste SOS, megafonía, cobertura móvil, sistema de inserción de mensajes en radiofrecuencia.
- Personal de explotación y emergencia: Cobertura radioeléctrica y emisoras en toda la infraestructura asociada al túnel. Teléfono fijo y móvil en centro de control.

Gestión Técnica Centralizada (GTC): Es el instrumento que permite explotar el túnel. Se compone de la red de comunicación de campo y la red de transporte hasta el Centro de control y mando, incluyendo las unidades de control lógico programable (PLC), las estaciones remotas universales (ERUs) y los switch o interruptores intermedios.

La aplicación para supervisión, control y análisis de datos, SCADA, es parte de la GTC y queda instalada en servidores locales y remotos, y visualizada en los monitores de sobremesa.

FUNCIONALIDAD

Cada uno de los equipamientos, sistemas, instalaciones, dispositivos, etc. descritos en el apartado anterior instalados en un túnel determinado se ajusta a una normativa y presta un determinado servicio. Nos encontramos ante un conjunto de elementos instalados para cumplir una o varias funciones. ¿Qué funciones son estas? De otra forma: ¿Para qué sirve cada equipo?

El Plan de Actuación de Emergencia, contenido en el Plan de Autoprotección, debe detallar los posibles accidentes o sucesos que pudieran dar lugar a una emergencia y los relaciona con la correspondiente situación de emergencia, e indica el procedimiento de actuación o plan de respuesta, a aplicar en cada caso.

Atendiendo a la Norma Básica de Autoprotección (REAL DECRETO 393/2007), un procedimiento de actuación en emergencia debe garantizar, al menos:

- La detección y alerta.
- La alarma.
- Información en emergencia a personas que pudieran estar expuestas al riesgo.
- El refugio, evacuación y socorro.
- La solicitud y recepción de ayuda externa de los servicios de emergencia y su intervención coordinada.

Para aclarar dudas, la Norma Básica define alerta como una situación declarada con el fin de tomar precaución específica debido a la probable y cercana ocurrencia de un suceso o accidente, y alarma como el aviso o señal por la que se informa a las personas para que sigan instrucciones específicas ante una situación de emergencia.

A continuación, se analizan brevemente dichas funciones, de forma que pueda incluirse un determinado equipo o sistema dentro de cada una de ellas.

Detección: Incluirá todos los equipos o sistemas que detectan una determinada anomalía o incidencia o son necesarios para el funcionamiento de dichos equipos. El sistema de detección por excelencia es el DAI que se encuentra ligado al sistema CCTV, quien a su vez necesita una red de comunicación y una alimentación eléctrica. Otros sistemas de detección, a modo de ejemplo, son:

- Sistema de detección lineal de incendios
- Detectores de CO, opacímetros
- Poste SOS, cobertura móvil para usuarios
- Sensor de apertura de puerta de extintor

Alerta: La situación declarada implica que el incidente quede clasificado y pueda lanzarse el Plan de Señalización, que supone el inicio del plan de respuesta, correspondiente para tomar las precauciones específicas, como limitación de velocidad, cierre de carril, cierre de túnel, etc.

Información a usuarios en riesgo: Complementando el plan de señalización, y si fuese necesario, se puede informar a las personas expuestas directamente al riesgo mediante avisos de megafonía o inserción de mensajes en radio de forma automática.

Alarma: Una vez clasificado el incidente se procede inmediatamente a solicitar la ayuda necesaria atendiendo al plan de respuesta (servicios de emergencia externos, retén de primera intervención, etc.). Los equipos son fundamentalmente de comunicación: Teléfono fijo, móvil y preferiblemente a través de más de un soporte y con más de un operador.

Refugio: Se interpreta el refugio como la protección al usuario de gases y humo proveniente de un incendio, función que desempeña la ventilación y la presurización de salidas de emergencia.

Evacuación: La evacuación se facilita mediante el alumbrado de emergencia, la señalización fija de las salidas que puede reforzarse con iluminación intermitente durante la emergencia, y las señales fijas fotoluminiscente de distancia a las salidas. También pueden mejorarse la evacuación con otros sistemas de guiado mediante flechas direccionables LED.

Socorro: Se incluyen los equipos que facilitan las tareas a los servicios que intervienen en la emergencia, siendo los más comunes los siguientes:

- Sistemas de extinción y suministro de agua
- Cobertura de radiofrecuencia para emisoras.
- Señalización de evacuación y del equipamiento

Salvo en casos puntuales como los extintores y la señalización fotoluminiscente, todos los sistemas deben contar con fuentes propias de suministro que aseguren su funcionamiento en situación degradada.

La garantía del procedimiento de actuación citada en la Norma Básica de Autoprotección referida a la recepción de la ayuda externa y su coordinación con los servicios de explotación escapa del alcance de esta comunicación, pero es importante señalar la importancia que la formación y la realización de ejercicios y simulacros tiene al respecto.

Por último y sin formar parte intrínseca del Plan de Respuesta, existe otra función y que es parte esencial del Plan de Autoprotección: la función preventiva:

Prevención. Puede aplicarse de diferentes formas durante la explotación de la infraestructura:

- Supervisión de las condiciones meteorológicas y estado de la calzada
- Supervisión del nivel de tráfico y de incidencias
- Información al usuario
- Garantizar una conducción confortable.

La siguiente figura muestra las categorías de equipamiento y enumera las funciones descritas:

FUNCIÓN COMPENSABLE

Cuando un determinado equipamiento se avería o queda fuera de servicio debe evaluarse por separado cada función que realiza o en la que participa. Para que una función sea compensable es condición necesaria que sea compartida con al menos otro sistema o equipo instalado en el túnel.

Es importante analizar el grado en que un equipo distinto, incluso perteneciente a otra categoría puede sustituir al averiado ya que no todos presentan una misma efectividad. Por ejemplo: El sistema CCTV-DAI puede ser un buen sustituto de otro sistema de detección, ya que cubre la mayoría incidentes, no así un detector de CO un opacímetro o un cable lineal que son sistemas específicos para gases, humos y temperatura.

Además del CCTV existen sistemas formados por equipos idénticos distribuidos a lo largo del túnel, como son los detectores citados, anemómetros, y elementos de señalización variable (aspa flechas, paneles, semáforos). En la mayoría de los casos, el fallo o avería conduce a la implementación de medidas compensatorias y al inicio de acciones de mantenimiento correctivo.

En general, siempre pueden realizar funciones compensables los siguientes equipos:

- Medios de comunicación con el usuario por radio o megafonía
- Señalización variable: Asignación de carril, paneles de mensajería, etc.
- Poste SOS
- Sistema CCTV – DAI
- Sensores de contaminación (opacímetros, detección de gases), etc.

Es muy importante que el sistema CCTV-DAI, que muestra la siguiente fotografía, no presente ángulos muertos o máscaras sin solape

Conviene recordar que mantener o restaurar un elemento para que pueda realizar su función de forma adecuada es objetivo fundamental de la conservación. Los diferentes tipos de alumbrado se componen de gran cantidad de luminarias cuyo estado debe revisarse diariamente y reponerse y repararse en base al número de averiadas o a la afección que suponga a la uniformidad lumínica. Por ello puede considerarse el alumbrado como una categoría compensable por medio de una correcta conservación, la cual debe incluir la limpieza de hastiales para un mantenimiento de su eficacia.

Finalmente, debe añadirse que la "Compensación" puede ser inmediata o a través de medidas con un tiempo de implementación corto. El manual de explotación debe contener una tabla con los tiempos máximos de reposición de cada equipo. En caso de superarse dicho tiempo desde que se ha producido el fallo, el Director de Explotación podrá considerar acciones drásticas sobre la operación del túnel siempre en coordinación con el Gestor del túnel y el Responsable de Seguridad.

REDUNDANCIA DE EQUIPAMIENTO

El caso de fallo de un sistema que tiene adjudicada una determinada función en exclusiva supone un problema dado que no hay un equipo sustituto para la misma. Por tanto, debe buscarse la redundancia del mismo.

Es el caso de sistemas cuya indisponibilidad no permite garantizar correctamente una o varias funciones.

La redundancia consiste en duplicar un equipo o un suministro durante una emergencia para disponer del mismo como reserva en caso de fallo del primero sin perjuicio de poder usarse alternativamente. Esto ocurre, principalmente en la acometida eléctrica, la gestión técnica centralizada y el sistema de ventilación.

El suministro eléctrico puede resolverse con una doble acometida, una fuente propia o con ambas. Un grupo electrógeno o un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) suponen un suministro propio agotable que se dimensiona para un tiempo determinado. Sin entrar en detalles que no son objeto de esta comunicación conviene destacar el mantenimiento exigido en estos sistemas y la recomendación al proyectista de una ventilación adecuada y que se evite la presencia de SAIs en cuartos técnicos en el interior del túnel ya que la humedad disminuye la vida útil de las baterías de manera drástica.

La distribución de energía mediante cableado en anillo supone una redundancia y es empleada en particular en túneles urbanos y en túneles de doble tubo.

La ventilación en un sistema longitudinal suele contar con equipamiento redundante y un buen diseño en sistemas transversales suele duplicar las unidades de extracción para el caso de emergencia. Por otra parte, el dimensionamiento del sistema se realiza con unas condiciones de diferencia de presión entre bocas muy desfavorables y de baja probabilidad, lo que supone que en la mayoría de los casos el sistema responda como si estuviese sobredimensionado.

En el caso de la gestión técnica centralizada hay diferentes redundancias a considerar. Entre otras:

- Red de campo de fibra en anillo.
- Duplicidad de equipos: ERUs, PLCs, servidores, etc.
- SCADA local y SCADA multi túnel

Cabe mencionar redundancias en el diseño de la red de agua de protección contra incendios, así como en el suministro de agua: tanto en el almacenamiento como en el grupo de presión de agua contra incendio.

Todos estos tipos de redundancia citados no eximen de la necesidad de retomar la situación de explotación normal previa a la avería debiendo cumplirse los tiempos máximos de reparación establecidos en el Manual de Explotación debido a que el sistema o equipo redundante puede averiarse igualmente.

Se llama la atención sobre el mantenimiento de los equipos redundantes ya que pueden utilizarse con menor frecuencia y es necesario realizar pruebas funcionales periódicas para garantizar su operatividad en caso de fallo del equipo principal.

MODO DE FUNCIONAMIENTO DEGRADADO

Todo modo de funcionamiento degradado conlleva examinar al menos tres criterios que permiten definir el umbral por debajo del cual debe cerrarse la infraestructura:

- Periodo de tiempo de tolerancia para el modo de funcionamiento degradado.
- Medidas compensatorias susceptibles de ser aplicadas: otros equipos, recursos humanos (equipo de primera intervención, patrulla de vigilancia, sanciones, etc.,) o restricción de tráfico.
- Naturaleza del fallo: Se clasifica y cuantifica la pérdida de funcionalidad admisible para un equipo o sistema, aspecto que se desarrollará en el siguiente apartado.

Respecto al periodo de tolerancia ya se ha comentado que el Manual de Explotación debe contener una tabla con los tiempos máximos admisibles para la reparación de equipos dañados los cuales sirven de referencia

para establecer las condiciones mínimas de explotación.

Las medidas compensatorias ofrecen la posibilidad de reducir los efectos que implica un equipo averiado o fuera de servicio. Estas medidas suelen estar relacionadas con el tráfico y con el personal de explotación. Deben tener siempre un carácter temporal.

La barrera de cierre del túnel que se observa en la siguiente fotografía es un dispositivo determinante en la reducción de las consecuencias de un incidente. Su avería conlleva la consideración de medidas compensatorias hasta su reparación desempeñadas por personal de explotación.

En cuanto a las de tráfico cabe mencionar:

- Reducción de velocidad
- Tráfico alternativo en túneles bidireccionales
- Tráfico bidireccional por cierre de tubo paralelo
- Prohibición de adelantamiento de vehículos pesados en túneles unidireccionales.
- Restricción de adelantamiento de vehículos pesados.
- Restricción de circulación de vehículos pesados o de mercancías peligrosas,
- Circulación de convoyes escolta para vehículos de mercancías peligrosas
- Prohibir paso de ciclistas

En cuanto al personal de conservación y explotación, las medidas que suelen ir ligadas al refuerzo o sustitución de señalización. A modo de ejemplo:

- Reforzar patrullas de vigilancia y de visitas de reconocimiento
- Situar personal con vehículo señalizado en boca de túnel
- Disponer señalización de refuerzo incluso robotizada
- Utilización de señalización de obra.

MATRIZ DE ANÁLISIS FUNCIONAL

Las Condiciones Mínimas de Explotación establecen el criterio por el cual un túnel no se considera suficientemente seguro para los usuarios y por ello debe procederse a su cierre o restringir el tráfico temporalmente mientras se solucionan o mitigan las causas que lo han originado.

Una vez analizado el equipamiento de un túnel concreto organizado por categorías y se han definido las distintas redundancias, puede realizarse una matriz de doble entrada que asigne cada equipo o sistema a las funciones a realizar, de forma que se identifiquen carencias o vulnerabilidades y permita definir las condiciones mínimas de explotación, facilitando la toma de decisión.

A modo de ejemplo, para un túnel que se encuentra dotado de la mayoría de equipamiento atendiendo a normativa y a mejores prácticas de ingeniería, se realiza la siguiente matriz que implementa las funciones citadas. En fondo verde las funciones asignadas y en azul el equipo redundante.

EQUIPAMIENTO		FUNCIONALIDAD							
		Detectar	Alertar (clasificar)	Informar usuarios	Alarmar	Refugio, evacuación y socorro			Prevenir
						Protección humo	Favorecer evacuación	Facilitar intervención	
GTC y supervisión	Estación de control y mando								
	Red de campo y transporte								
	PLC / ERU / SWICHT								
	SCADA y monitorización								
Acometidas	Red eléctrica externa								
	Propia: Grupo electrógeno y SAI								
	Agua / Aljibe								
Ventilación	**Sanitaria**								
	Emergencia (incendio)								
	Presurización salidas								
Alumbrado	**Explotación**								
	Seguridad								
	Emergencia (evacuación)								
	Guiado de vehículos y salidas								
Monitorización	**Circuito cerrado de televisión (CCTV)**								
	Detección automática incidente (DAI)								
	Cámaras térmicas								
	Videowall								
	Videograbador								
Protección contra incendios y Detección	**Extintores y BIEs**								
	Hidrantes y columna o tubería seca								
	Extinción automática, VESDA								
	Detección convencional incendio								
	Detección lineal incendio								
	Detector CO, NOx, Opacímetro								
	Sensor de apertura puerta extintor								
	Antiintrusión, seguridad perimetral								
	Estación toma de datos tráfico (ETD)								
Comunicación	**Poste SOS**								
	Megafonía								
	Inserción mensajes FM de usuario								
	Cobertura móvil usuarios								
	Cobertura para emisoras								
	Teléfono fijo y móvil en CC								
Control de tráfico	**Barrera de cierre**								
	Aspa flecha (AF)								
	Semáforos								
	Paneles de mensaje variable (PMV)								
	Control límite velocidad (CLV)								

La matriz permite:

- Identificar cómo se garantiza cada función por combinación de equipos.
- Diferenciar los equipos que pueden compensar la disfunción de otro.
- Facilitar el desarrollo de modos de explotación degradados.

CONDICIONES MÍNIMAS DE EXPLOTACIÓN (CME)

El análisis debe estudiar por separado los equipos redundantes de los que desempeñan una función compensable. Por lo general, debe buscarse la redundancia en el equipamiento que atiende aquellas funciones que no pueden compensarse, y por supuesto en el equipamiento que sirve de suministro energético y de gestión de la infraestructura.

Las CME deben considerar el nivel de redundancia implementado. Se pueden presentar tres casos principalmente:

- Si hay un dispositivo de respaldo que ofrece rendimiento casi idéntico al dispositivo averiado, la CME se limita a cumplir el periodo máximo de reparación o sustitución del equipo.
- Si la redundancia es parcial, las CME deben desarrollarse teniendo en cuenta el rendimiento lo que lleva a un modo de funcionamiento degradado que requerirá medidas compensatorias.
- Sí la avería inicial continúa y al mismo tiempo falla el equipo o sistema redundante y las medidas compensatorias procedentes no pueden aplicarse, entonces el túnel debe cerrarse.

De hecho, es posible disponer un equipo redundante con el mismo rendimiento que el dispositivo normal (una fuente de alimentación secundaria que se hace cargo en caso de fallo), o una redundancia casi completa (una fuente de alimentación de emergencia que asume solo los equipos considerados críticos), o una redundancia parcial (un sistema de ventilación con equipos adicionales para proporcionar respaldo en caso de fallo de uno de ellos).

Debe destacarse que la para la función de Alarma propiamente dicha (una vez desglosada la de información a los usuarios) resulta muy sencillo implementar la redundancia ya que se realiza desde el centro de control utilizando un teléfono móvil o fijo del cual además de duplicar equipos es importante disponer de un segundo proveedor de servicios de comunicación.

Respecto a las CME para las funciones que pueden compensarse y que por lo tanto, salvo que se pretenda reforzar la seguridad, no necesitan redundancia. En consecuencia, en caso de avería, será necesario indicar el procedimiento de respuesta considerando que afecte a toda o solo una parte de la infraestructura.

Esto lleva a identificar las funciones afectadas por el equipo o sistema averiado y a determinar qué otro equipo puede asumir su función. Este equipo podrá formar parte del mismo sistema o a otra categoría de equipamiento.

En la mayoría de los casos la ubicación del equipamiento suele ser modular, por sectores a lo largo del túnel. Por ejemplo, una cámara de CCTV tiene una zona de influencia concreta, y en consecuencia, desde un punto de vista práctico, el uso de esta tabla debe por tanto ser considerado para cada tramo homogéneo de túnel. En la práctica, pueden considerarse los tramos situados entre dos salidas de emergencia consecutivos incluyendo como tales las propias bocas del túnel. En ellos se situarán equipos o elementos de:

- Monitorización
- Control de tráfico (señalización variable)
- Protección contra incendios y detección en general
- Comunicación

La matriz de análisis será la herramienta que determine carencias, medidas de compensación, tras evaluar la contribución individual de cada equipo. Las CME se establecerán de acuerdo al tiempo máximo de reparación o recambio del equipo averiado concreto establecidos en el Manual de Explotación y en última instancia a decisión del Director de Explotación, consensuada con Gestor y Responsable de Seguridad del túnel.

CONCLUSION Y RECOMENDACIONES

Los procedimientos preventivos y de respuesta ante emergencia conllevan una serie de tareas o funciones que garantizan la correcta explotación de un túnel. Estas funciones se llevan a cabo mediante instalaciones y equipos, medios organizativos y recursos humanos disponibles, siendo los equipos el objetivo tratado en la presente comunicación.

El equipamiento necesario para desarrollar estas funciones tiene distinto grado de importancia. La intersección de las funciones a desempeñar y los recursos disponibles permite determinar las funciones compensables e identificar los equipos que deben contar con una redundancia para garantizar su disponibilidad, siendo medidas que abarcan el túnel en conjunto.

La matriz de análisis funcional propuesta es una excelente herramienta para estudiar y evaluar los equipos de prevención y protección en cada caso particular y es recomendable utilizarlo para especificar las Condiciones Mínimas de Explotación.

Es una buena práctica establecer la asignación funcional durante la fase de proyecto de forma que se diseñen los niveles de redundancia de forma coherente.

Es conveniente tener presente que toda restricción de las condiciones de tráfico debe justificarse adecuadamente. Disminuir la duración de las mismas en cumplimiento de las CME supone, en cierta forma, una medida de la resiliencia del túnel.

Para terminar, se aportan las siguientes referencias de lectura recomendada:

- Introducción al concepto RAMS en la explotación de túneles de carretera. PIARC Comité técnico D.5: Explotación de túneles de carretera - 2018
- Mejoras en la resiliencia de túneles de Carretera considerando su disponibilidad y seguridad. PIARC Comité técnico 4.4: Túneles 2021
- Nota informativa número 23. Definición de funciones de seguridad, Aplicación de Modos de Explotación Degradado y Condiciones Mínimas de Explotación. CETU - Julio 2014,

LA IMPORTANCIA DE LA RESILIENCIA EN EL EQUIPO HUMANO

Juan Torres García
EMESA

Una explotación de 430 millones de vehículos/año y más de 620 millones de usuarios hace que se necesite estar preparado para poder dar una respuesta ante cualquier infortunio. Cada minuto entran en la M-30 una media de 1000 vehículos, pudiendo llegar en las horas punta a los 2500 vehículos.

Con estas cifras se entiende que cualquier situación de emergencia debe ser tratada de manera rápida para minimizar el riesgo tanto para usuarios, como para posibles implicados y evitar el colapso de la vía

¿Cómo se consigue ese equilibrio entre seguridad y minimización del tiempo actuación? Hay que estar preparados para dar una respuesta interdisciplinar, donde la base está en la formación. Por ello en la formación de los trabajadores más de 10.000 horas anuales.

En esta formación se tocan aspectos como intervención en vehículos accidentados, coordinación con servicios de emergencia, evacuación de la vía, interactuación con los sistemas de seguridad instalados o cómo realizar la limpieza de la calzada para abrirla al tráfico en condiciones óptimas de seguridad.

Y ¿Si a lo expuesto se le suma una pandemia mundial? Ha sido esencial la resiliencia mostrada por los trabajadores, en una situación de desinformación a nivel mundial, de desabastecimiento de equipos de protección y de incertidumbre.

Ante una situación como esta, es cuando más valor se le da a lo invertido en la formación en estos años, donde los trabajadores se han preparado para poder afrontar diversos puestos y tener la capacidad de asumir roles diferentes a los habituales.

El tener niveles de trabajadores nutridos desde la base hace conocer los retos del día a día y poder analizar los riesgos a los que se enfrenta la primera línea a pie de campo pudiendo preparar un plan de actuación eficiente ante las situaciones más complejas.

Así, para responder ante una pandemia mundial se analizaron cada una de las líneas de puestos creando burbujas de trabajadores y preparando grupos de trabajadores de líneas superiores para poder cubrir el trabajo de la primera línea.

Es la demostración empírica de la importancia de una base sólida de trabajadores, curtidos por la experiencia y alimentados por la formación continua.

THE IMPORTANCE OF RESILIENCE IN THE HUMAN TEAM

Overseeing 430 million vehicles/year and more than 620 million users means that you need to be ready to be able to respond should an incident arise. An average of 1,000 vehicles pass through the M-30 every minute, and during peak hours this figure can go as high as 2,500 vehicles.

With this much traffic, any emergency situation must be dealt with quickly in order to minimise the risk to road users and those involved with a view to preventing tailbacks.

How do you get that balance between safety and minimization of action time? We must be prepared to give an interdisciplinary response, where the base is in training. Therefore, in the training of workers more than 10,000 hours per year.

This training covers aspects such as responding to vehicles involved in accidents, coordinating with emergency services, clearing the road, interacting with the safety systems installed or cleaning the road so as to open it back up to traffic in optimum safety conditions.

And how about a global pandemic for good measure? The resilience shown by workers in a situation of widespread misinformation, shortages of protective equipment and uncertainty has been key.

It is in situations such as this when the real fruits of years of investment in training are borne, with workers who have been trained to face challenges and take on various roles that are different to their usual ones.

Nurturing workers at grassroots level means that they are aware of the day-to-day challenges and can analyse the risks faced on the front line and draw up an efficient action plan to deal with the most complex situations.

So, in order to respond to a global pandemic, each job line was analysed by creating bubbles of workers and designating groups of workers from higher lines to cover the work of the first line.

It is the empirical demonstration of the importance of having a solid and experienced workforce that has been nurtured through continuous training.

L'IMPORTANCE DE LA RÉSILIENCE DANS L'ÉQUIPE HUMAINE

Avec une exploitation de 430 millions de véhicules/an et plus de 620 millions d'utilisateurs, vous devez être prêt à répondre à tout problème. Chaque minute, 1 000 véhicules entrent en moyenne sur la M-30, et pouvant atteindre 2 500 véhicules aux heures de pointe.

Ces chiffres signifient que toute situation d'urgence doit être traitée rapidement afin de minimiser les risques aussi bien pour les utilisateurs que pour les éventuels impliqués et d'éviter que la voie soit paralysée.

Comment parvenir à cet équilibre entre sécurité et minimisation du temps de réaction? Il faut être prêt à donner une réponse interdisciplinaire, où la base est dans la formation. Par conséquent, dans la formation des travailleurs plus de 10 000 heures par an.

Cette formation aborde des aspects tels que l'intervention sur les véhicules accidentés, la coordination avec les services d'urgence, l'évacuation de la voie, l'interaction avec les systèmes de sécurité installés ou la façon de nettoyer la chaussée pour l'ouvrir à la circulation dans des conditions de sécurité optimales.

Et si une pandémie mondiale s'y ajoute? La résilience des travailleurs a été essentielle, dans une situation de désinformation à l'échelle mondiale, de pénurie d'équipements de protection et d'incertitude.

C'est dans ces moments-là qu'on accorde plus de valeur à ce qui a été investi dans la formation ces dernières années, où les travailleurs se sont préparés à affronter divers postes et à avoir la capacité d'assumer des rôles différents de ceux habituels.

Avoir des niveaux de travailleurs formés à la base permet de connaître les défis quotidiens et d'analyser les risques auxquels la première ligne est confrontée sur le terrain et de préparer un plan d'action efficace face aux situations les plus complexes.

Ainsi, pour répondre à une pandémie mondiale, nous avons analysé chacune des lignes de postes en créant des bulles de travailleurs et en préparant des groupes de travailleurs de lignes supérieures afin de couvrir le travail de la première ligne.

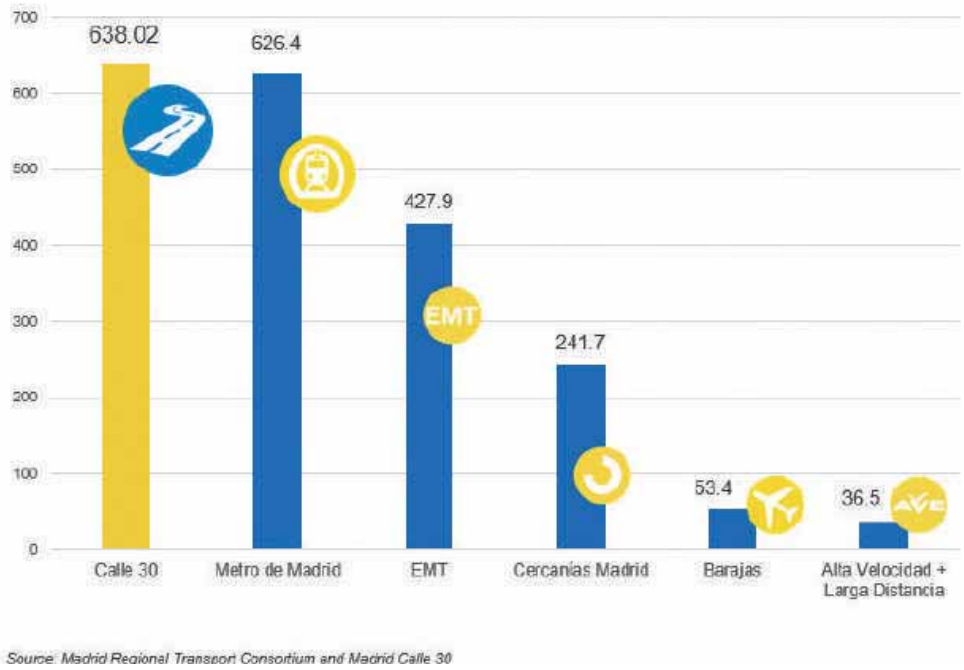
C'est la démonstration empirique de l'importance d'une base solide de travailleurs, renforcés par l'expérience et alimentés par la formation continue.

INTRODUCCIÓN

Para la correcta gestión y funcionamiento del principal anillo de circunvalación de Madrid, el Ayuntamiento optó, anticipándose a los modelos de gestión de infraestructuras modernos, por la colaboración público-privada Madrid Calle 30, sociedad de economía mixta, participada por el Ayuntamiento de Madrid y un socio privado. Así nace Emesa, Empresa de Mantenimiento y Explotación M-30.

Emesa es una empresa dedicada a la conservación, mantenimiento y explotación de la M-30. Se trata de una compañía participada actualmente por los grupos Ferrovial, ACS y Vinci, y desde su constitución en 2005, es accionista minoritario de Madrid Calle 30: la sociedad mixta que se ocupa de la gestión integral de la vía.

Es misión de Emesa garantizar la seguridad y la movilidad de los más de 600 millones de madrileños y madrileñas que año tras año convierten a la M-30 en el medio de transporte más utilizado para moverse por Madrid.



Usuarios de los principales medios de transporte en Madrid (millones/año en 2017)

Para el correcto desempeño de las funciones propias del mantenimiento y conservación de la M-30 Emesa cuenta con un equipo formado por cerca de 300 profesionales con una alta cualificación organizados en turnos de 24/7.

La actividad de explotación abarca todas aquellas actuaciones destinadas a mejorar la fluidez y garantizar la seguridad de la circulación por la M-30. Esa labor requiere la vigilancia del tráfico, la gestión de la señalización, la minimización de las situaciones de emergencia, accidentes o afecciones puntuales y el restablecimiento del tráfico cuando estas se producen.

Una de las principales actividades de Emesa, como explotador y mantenedor de la vía es la atención a incidencias y la gestión de alarmas de los sistemas instalados en los equipos.

La atención a incidencias se establece como una primera respuesta a un evento no previsto como puede ser un vehículo averiado, accidentado, peatón en la vía… o una alarma del sistema

Estas situaciones son detectadas por el Centro de control el cual alerta al área/departamento correspondiente para la gestión de la incidencia. El Centro de control tiene otras fuentes de información derivadas de la coordinación con los servicios externos a la propia M-30, como son policía municipal, bomberos, etc.

Cada minuto acceden a la M-30 una media de 1000 vehículos, pudiendo llegar en las horas punta a los 2500 vehículos, lo que supone gestionar una explotación de 430 millones de vehículos/año y más de 630 millones de usuarios. Por ello, es necesario estar preparado para poder dar una respuesta ante cualquier situación que pueda producirse. Con estas cifras se entiende que cualquier situación de emergencia debe ser tratada de una manera ágil para minimizar el riesgo tanto para usuarios, como para posibles implicados y para evitar el colapso de la vía.

CENTRO DE CONTROL

Es el corazón de la M30 y gestiona de manera directa todo el flujo de información que se genera en la vía, bien por los recursos humanos o bien por los sistemas de inteligencia artificial. Entre las funciones que realiza se encuentran:

- La detección de incidencias mediante diferentes métodos
- El desarrollo del Plan de Autoprotección
- La coordinación entre departamentos y con servicios de emergencia exteriores
- El control de cámaras, alarmas de funcionamiento y estado de equipos
- La señalización en túneles
- El mantenimiento preventivo (en colaboración con otros departamentos) de equipos e instalaciones de los túneles
- La elaboración de informes sobre el estado de equipos e instalaciones, verificando su correcto funcionamiento, detectando las posibles anomalías e informando a los departamentos afectados
- El estudio periódico del tráfico
- La gestión de incidencias en colaboración con otros departamentos
- La realización de simulacros en sala y en exterior
- El control de accesos a instalaciones
- Y La gestión de las ocupaciones de calzada para trabajos de mantenimiento

Para ello se realiza una gestión mixta entre los procesos automatizados y los procesos que se realizan de manera manual que generan una actividad mensual de más de 100.000 órdenes.

ATENCIÓN A INCIDENCIAS Y VIGILANCIA

Es la primera respuesta ante una eventualidad, tanto a nivel de fallos en instalaciones como a nivel de incidencias de tráfico, encargándose de la supervisión de la infraestructura de manera directa.

El servicio de atención a incidencias y vigilancia atiende las emergencias e incidencias que se producen en la vía relacionadas con el tráfico, con los factores atmosféricos, o con problemas derivados de la infraestructura o de las instalaciones.

Entre otras funciones, realizan las de:

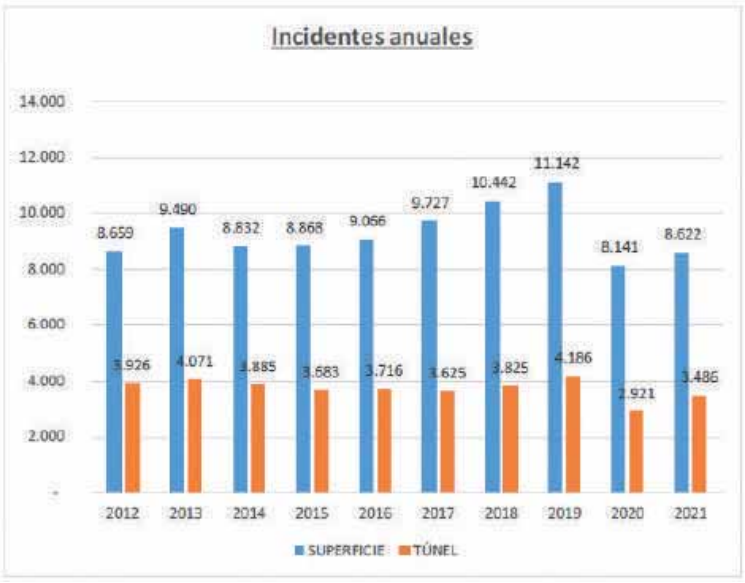
- Control de la circulación
- Asistencia a vehículos accidentados o averiados
- Comprobación de las instalaciones
- Revisión de estructuras y firmes
- Tareas de la señalización
- Mantenimiento preventivo y correctico
- Coordinación de los servicios de emergencia

Además, este servicio realiza otras funciones, como puede ser la reposición de balizamiento o la limpieza de la señalización en las horas de menor tráfico.

Los equipos de atención a incidencias presentan diferente configuración en función de si atienden incidencias a cielo abierto o en túnel. Las incidencias a cielo abierto se atienden mediante equipos de vigilancia similares a los existentes en los contratos de conservación integral, mientras las incidencias en túnel se atienden con equipos de intervención situados en las bocas de los túneles preparados con medios especiales adecuados a la tipología de incidentes que pueden producirse en el interior de los túneles.

Estos equipos son clave principal y fundamental para el buen funcionamiento de la conservación y explotación de una carretera, dependiendo su dimensionamiento de factores como pueden ser el volumen de tráfico, la accidentabilidad, o el entorno.

A lo largo del año en la M-30 estos equipos atienden en torno a 13.000 incidencias, obteniéndose tiempos medios de atención de 5 minutos y de resolución de 17 minutos.



FORMACIÓN Y RESILIENCIA

La formación es un pilar fundamental para Emesa. Por ello, todos los componentes del equipo, tanto ingenieros, como personal técnico y administrativo, y personal de mantenimiento, centro de control y atención a incidencias se benefician de más de 10.000 horas de formación al año.

La formación es una herramienta básica de acceso a los puestos de gestión de incidencias. Así, para entrar a formar parte del equipo de gestión de incidencias es necesario haber superado un mínimo de 80 horas de formación en los distintos sistemas de control y equipos de actuación.

En esta formación se trabajan aspectos de manejo de sistemas informáticos, SCADAS, conocimiento del Manual de Explotación, intervención en vehículos accidentados, coordinación con servicios de emergencia, cómo realizar la evacuación de la vía, etc…, y en los años posteriores está programada una formación con un ciclo quinquenal, en la que además de actualizar y refrescar anualmente los aspectos técnicos, también se trabajan los factores emocionales, con cursos de formación en gestión del estrés y apoyo de las emociones.

El porqué de los cursos de la formación en gestión del estrés y apoyo a las emociones, radica en que éste es uno de los principales hándicaps en el equipo de gestión de incidencias. El equipo debe estar preparado para atender incidencias en las que puede producirse un gran impacto emocional, ya que 70 % de las incidencias ocurridas implican a los usuarios de manera directa, averías de sus vehículos, accidentes leves y por desgracia situaciones con lesiones graves y víctimas mortales.

La resiliencia es una palabra que aúna conceptos relacionados o asociados a la capacidad de la superación que tiene una persona frente a situaciones complejas, bien sea en la vida o bien sea en el ámbito profesional.

La resiliencia está asociada a factores como:

- El apoyo dentro y fuera del entorno
- Evitar ver crisis como obstáculos insuperables y aprender a afrontarlos
- Aceptar que el cambio es parte de la vida
- Dirigirte hacia tus metas
- Llevar a cabo acciones decisivas
- Buscar oportunidades para descubrirse a sí mismo
- Mejorar las destrezas en comunicación y solución de problemas
- Trabajar la visión positiva sobre uno mismo
- Nunca perder la esperanza
- Cuidarse de sí mismo [1]

En Emesa se ha trabajado intensamente en el reconocimiento de estos factores en todos los niveles de la empresa, sin descuidar ninguno de los niveles de la pirámide estructural que la conforma, desde los niveles de dirección, hasta los niveles de la primera línea de trabajo.

Es importante trabajar para que las personas que están en la primera línea de atención fortalezcan su resiliencia ante situaciones complejas para que puedan desempeñar el trabajo de manera eficaz, eficiente y profesional. Y es igualmente importante trabajar en el resto de los niveles, para que estén preparados para dar el soporte y herramientas a la primera línea de actuación. Por ello, Emesa ha trabajado en estos años en dar herramientas a los profesionales, no sólo desde un punto de vista técnico, sino también emocional, con el fin de prepararlos para manejar la adversidad.

EL DESARROLLO DEL TALENTO. PROYECTO TIMONEL

En el año 2016, y basándose en los resultados de la encuesta de Riesgos Psicosociales y de Clima Laboral realizada a sus trabajadores, Emesa establece un Plan Estratégico a 5 años con el fin de potenciar las fortalezas y el desarrollo del talento de su capital humano.

A raíz de este Plan Estratégico, en 2017 se crea el Departamento de Gestión de Talento y nace el Proyecto Timonel.

Timonel es un Proyecto de Desarrollo creado y diseñado por Emesa para desarrollar el talento individual de los miembros del equipo, alineado con nuestra cultura, filosofía y modelo de negocio.

[1] https://psicologiaymente.com/psicologia/formas-practicas-construir-resiliencia

Los objetivos del proyecto son: conseguir un sistema de desarrollo integral del talento que potencie e integre el desarrollo individual con el desarrollo organizacional mediante itinerarios de desarrollo individuales, mejorar el nivel competencial de los diferentes colectivos, y aumentar el enfoque proactivo hacia el aprendizaje.

El proyecto está enfocado a dirección, mandos intermedios, y puestos técnicos y de administración, y consta de las siguientes fases:

- Realización de Entrevista personal. En ella se realiza un análisis y detección de competencias por niveles, valorándose cuál es la situación actual del colaborador, cuáles son sus intereses y principales necesidades y qué recursos precisa para seguir desarrollándose personal y profesionalmente
- Posicionamiento en la "Matriz de Talento". La matriz de Talento es una herramienta que permite evaluar el potencial de una persona a través de su actitud y compromiso, y de su nivel de desempeño según su nivel competencial y resolutividad

- Entrega de Informe Individual. En este informe se dan los resultados del análisis de las competencias, el posicionamiento en la matriz de talento, y las conclusiones personales y se detallan los puntos fuertes y los puntos clave a mejorar, presentando una propuesta de desarrollo
- Formación y Desarrollo de Competencias. Se establece para cada nivel la formación específica: Comunicación, Inteligencia Emocional, Habilidades Directivas, etc. y se evalúa la necesidad de formación de cada persona de manera individual
- Acompañamiento mediante sesiones de coaching individuales a dirección y mandos intermedios
- Seguimiento anual de la evolución de las competencias de cada miembro del equipo a través de la Evaluación de Desempeño y establecimiento de Planes Anuales de Desarrollo Individual

LA PANDEMIA

En 2020 llega la pandemia, las incertidumbres, el miedo y se produce un bombardeo de noticias de un calado importante en la sociedad.

Cuando empieza la pandemia, nadie se pregunta si se tiene resiliencia o no, simplemente se actúa, intentando hacerlo lo mejor posible para que tu entorno no se desplome.

Explica Madrid Salud en su documento "El impacto emocional de la pandemia", que las reacciones que se generaron durante la pandemia son inevitables e inherentes al ser humano, porque es la manera que tenemos de asimilar la experiencia. Estas reacciones van desde pequeños desajuste y malestares que tienen una duración de entre algunos días o unos pocos meses, hasta respuestas disfuncionales o desadaptativas que, en algunos casos, persisten y se cronifican.

Obviamente el inicio de la pandemia genera un impacto psicológico, como consecuencia de una situación que implicaba un impacto emocional intenso y un miedo a lo desconocido.

Ante una situación como ésta, es cuando adquiere especial valor lo invertido en la formación en estos años en los que el equipo se ha preparado para poder afrontar diversos puestos y tener la capacidad de asumir roles diferentes a los habituales.

El tener niveles de trabajadores nutridos desde la base hace conocer los retos del día a día y poder analizar los riesgos a los que se enfrenta la primera línea a pie de campo pudiendo preparar un plan de actuación eficiente ante las situaciones más complejas.

Cuando se declara la pandemia se constata la importancia de los planes de actuación predeterminados, la formación de base, y las habilitades adquiridas que permiten actuar de manera "natural" ante los distintos problemas. Para afrontar las incidencias durante este periodo se analizaron los perfiles de los trabadores, la formación y las charlas personales que se habían realizado durante el tiempo previo a la pandemia. Esto permitió conocer qué personas podrían dar una mejor respuesta y qué perfiles de trabajadores eran esenciales para dar respuesta en los diferentes puestos de trabajo. La respuesta del equipo fue sorprendente y pocas fueron las personas que quedaron bloqueadas por la situación.

Además, se trabajó en varias líneas de actuación para garantizar la seguridad de los equipos y poder seguir ofreciendo un servicio eficaz:

1. Generando grupos burbuja, de manera que siempre se trabajaba con los mismos compañeros, no produciéndose rotaciones por los distintos puestos
2. Minimizando la presencialidad para tener capacidad de sustitución ante imprevistos de personal
3. Generando protocolos de seguridad antes, durante y después del trabajo
4. Manteniendo la presencialidad de los responsables de los trabajadores de la primera línea, para darles el apoyo necesario

En definitiva, durante la pandemia se observó que la formación y la preparación previa, tanto a nivel técnico como a nivel competencial, y el disponer de unos procedimientos de trabajo claros, fueron clave para disponer de las aptitudes y seguridad necesarias para poder hacer frente a la adversidad.

APPLICATION DES CONCEPTS LOW-TECH ET LEAN-TECH AUX TUNNELS ROUTIERS POUR UNE PLUS GRANDE SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE

Martinetto Olivier; Guiral Florent
EGIS Structures et Environnement

Notre planète est soumise à un défi climatique majeur, de plus en plus prégnant et critique.

Le besoin en infrastructures souterraines de communication, à maintenir ou à créer, reste fort dans tous les pays pour faire face aux besoins d'échanges, de déplacements, de développement.

Lesdites infrastructures peuvent être des gouffres financiers à l'empreinte carbone forte. La seule optimisation d'un système, par exemple l'éclairage, n'est pas suffisante eu égard aux enjeux. Le recours habituel à la technologie et au développement de nouveaux systèmes pour espérer réduire le bilan énergétique, pertinent dans certains cas, peut relever d'une fuite en avant ou d'une illusion sans garantie d'économies globales.

Dans ce contexte, une approche différente et holistique semble nécessaire tant en termes de conception que d'exploitation-maintenance et même d'usage. Tout le cycle de vie de l'ouvrage est concerné, notamment les phases de conception et d'exploitation :

- Bien qu'elle soit l'une des plus courtes du cycle en question, la phase de conception est totalement structurante. Cette phase concerne évidemment un ensemble de choix techniques dictés par des exigences réglementaires mais qui doivent aussi répondre aux contraintes spécifiques d'exploitation et de maintenance et au niveau de service attendu de l'ouvrage, niveau souvent mal défini. Par ailleurs, elle traite également des critères de choix et d'approvisionnement des fournitures, souvent négligés faute d'outil d'analyse adapté.
- La phase d'exploitation, voulue la plus longue possible, est totalement dimensionnante. Au-delà du « régime établi », cette phase comporte des étapes de Gros Entretien et Renouvellement qui doivent être prises en compte dès la conception des ouvrages.

L'article s'intéresse donc à la mise en œuvre concrète et aux convergences de différentes démarches :

- Low-Tech : recours à des solutions technologiquement « sobres » en ressources naturelles et en énergies
- Lean-Tech : utilisation « au plus juste » de la technologie
- Design for Maintenance (DfM) : conception orientée maintenance/maintenabilité
- Fiabilité Maintenabilité Disponibilité Sécurité (FMDS) des «systèmes»

APLICACIÓN DE CONCEPTOS DE BAJA TECNOLOGÍA Y LEAN-TECH A LOS TÚNELES DE CARRETERA PARA UNA MAYOR EFICIENCIA ENERGÉTICA

Nuestro planeta está sometido a un gran desafío climático, cada vez más agudo y crítico.

La necesidad de mantener o crear infraestructuras de comunicación subterráneas sigue siendo fuerte en todos los países para satisfacer las necesidades del comercio, los viajes y el desarrollo.

Estas infraestructuras pueden ser pozos financieros con una elevada huella de carbono. La mera optimización de un sistema, por ejemplo, de iluminación, no es suficiente en vista de lo que está en juego. El recurso habitual a la tecnología y al desarrollo de nuevos sistemas para esperar reducir el balance energético, que es relevante en algunos casos, puede ser una huida hacia delante o una ilusión sin garantía de ahorro global.

En este contexto, parece necesario un enfoque diferente y holístico en términos de diseño, operación y mantenimiento e incluso uso. Se trata de todo el ciclo de vida del túnel:

- Aunque es una de las fases más cortas del ciclo en cuestión, la fase de diseño es totalmente estructurante. Esta fase se refiere evidentemente a un conjunto de opciones técnicas dictadas por las exigencias reglamentarias, pero que también deben responder a las limitaciones específicas de operación y mantenimiento y al nivel de servicio que se espera de la estructura, nivel que a menudo está mal definido. Además, también trata los criterios de elección y adquisición de suministros, que a menudo se descuidan por falta de una herramienta de análisis adecuada.
- La fase de operación-mantenimiento, que sea lo más larga posible, tiene un impacto importante. Más allá del "régimen establecido", esta fase incluye etapas de mantenimiento y renovación importantes que deben tenerse en cuenta desde la fase de diseño.

Por ello, el artículo se centra en la aplicación concreta y la convergencia de diferentes enfoques:

- Low-Tech: uso de soluciones tecnológicamente "sobrias"
- Lean-Tech: uso "ajustado" de la tecnología
- Diseño para el mantenimiento (DfM): diseño orientado al mantenimiento
- Fiabilidad Mantenibilidad Disponibilidad Seguridad (RAMS) de los sistemas

APPLICATION OF LOW-TECH AND LEAN-TECH CONCEPTS TO ROAD TUNNELS FOR GREATER ENERGY EFFICIENCY

Our planet is facing a major climate challenge, which is becoming increasingly acute and critical.

The need to maintain or create underground communication infrastructures remains strong in all countries to meet trade, travel and development needs.

These infrastructures can be financial sinkholes with a high carbon footprint. Simply optimising a system, e.g. lighting, is not enough in view of what is at stake. The usual recourse to technology and the development of new systems in the hope of reducing the energy balance, which is relevant in some cases, can be a headlong rush or an illusion with no guarantee of overall savings.

In this context, a different and holistic approach seems necessary in terms of design, operation and maintenance and even use. It is about the whole life cycle of the tunnel:

- Although it is one of the shortest phases of the cycle in question, the design phase is totally structuring. This phase obviously concerns a set of technical choices dictated by regulatory requirements, but which must also respond to the specific constraints of operation and maintenance and to the level of service expected from the structure, a level which is often poorly defined. In addition, it also deals with the criteria for choosing and procuring supplies, which are often neglected for lack of a suitable analysis tool.
- The operation-maintenance phase, which must be as long as possible, has an important impact. Beyond the "established regime", this phase includes important maintenance and renovation steps that need to be taken into account from the design phase.

The article therefore focuses on the concrete implementation and convergence of different approaches:

- Low-Tech: use of technologically "sober" solutions.
- Lean-Tech: "lean" use of technology
- Design for Maintainability (DfM): maintenance-oriented design
- Reliability Maintainability Availability Safety and Security (RAMS) of systems

PRÉAMBULE

La conception d'un tunnel routier doit prendre en compte de nombreux paramètres parmi lesquels la fonction économique et sociale, les exigences réglementaires, l'environnement de l'ouvrage, les caractéristiques du trafic, les moyens d'exploitation et de maintenance ou encore les budgets d'investissement et d'exploitation/maintenance.

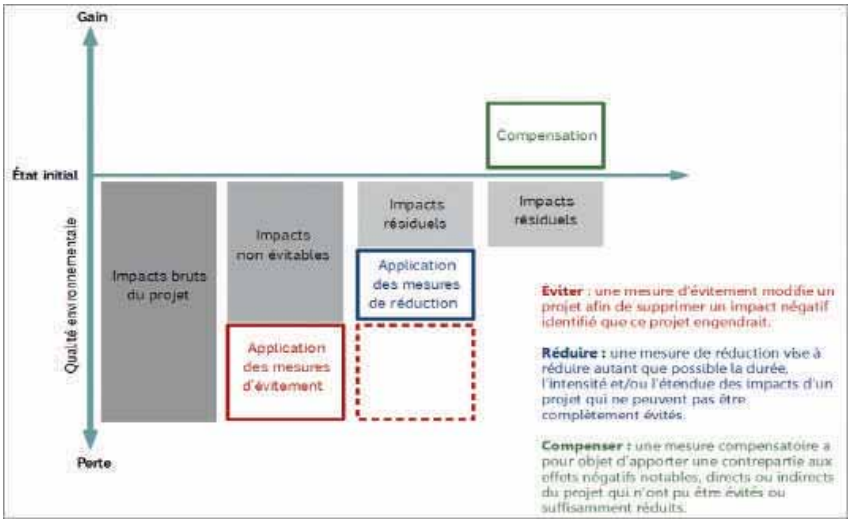
Les systèmes d'équipements mis en œuvre sont toujours plus nombreux et sophistiqués afin d'offrir des niveaux de sécurité et de service inégalés au risque d'engendrer une dérive des consommations énergétiques.

A l'heure de la sobriété énergétique, au-delà des leviers d'action habituels sur les consommations directes propres aux ouvrages, il semble intéressant de promouvoir les démarches d'écoconception telles que low-tech ou lean-tech et d'en montrer les convergences avec des démarches plus connues telles que DfM et FMDS.

En termes d'écoconception, les tunnels routiers ont de multiples impacts et interactions, directes ou indirectes, avec 7 thématiques environnementales couramment identifiées :

Face au défi climatique majeur auquel notre planète est soumise, l'un des principes de base est d'Eviter ou de Réduire autant que possible les impacts environnementaux (1), le cas échéant de les Compenser, en considérant l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage. Cette démarche « ERC » est illustrée ci-après.

(1) en veillant à ce que l'amélioration d'une thématique ne nuise pas significativement aux autres.



Démarche ERC

L'ambition de cet article est donc d'encourager les bureaux d'études, maîtres d'œuvre, maîtres d'ouvrage et exploitants de tunnels routiers à mettre l'écoconception au cœur de leurs préoccupations avec notamment pour objectifs la sobriété énergétique et des ressources, l'économie circulaire, la neutralité carbone et la maitrise des pollutions.

A cette fin, les auteurs listent quelques solutions concrètes, proposent des pistes de réflexion, ouvrent des perspectives et partagent leurs questionnements. Une méthodologie et des recommandations sont ensuite suggérées, avant de conclure.

La liste des exemples de solutions et pistes de réflexion est structurée autour des 3 premières phases du cycle de vie des projets et d'une partie des thématiques environnementales. L'apport de chaque exemple vis-à-vis de la démarche ERC est indiqué par un symbole. E R C

PHASE CONCEPTION

Sobriété énergétique:

- R Assurer une conception économe de l'ouvrage :
  - o le tracé (courbes) impacte les systèmes de vidéosurveillance (et l'éventuelle détection automatique d'incident associée) et de signalisation
  - o le profil en long (déclivités, points bas et points hauts) impacte les systèmes d'assainissement, d'éclairage, de défense incendie, de signalisation, de ventilation et de vidéosurveillance (et l'éventuelle détection automatique d'incident associée)
  - o le profil en travers (hauteur, largeur, section) impacte les systèmes d'éclairage et de ventilation
- E Privilégier les systèmes passifs tels que, par exemple :
  - o des paralumes comme ceux du tunnel Jenner (Le Havre – France) qui remplacent l'éclairage de renforcement
  - o les réseaux incendie et d'assainissement gravitaires
  - o les bâtiments conçus pour limiter les apports thermiques et/ou favoriser la ventilation plutôt que la climatisation (Rtherm des parois et portes).
- E Supprimer les redondances qui ne seraient pas pleinement justifiées par le niveau de service ou de sécurité nécessaire et qui s'avéreraient énergivores comme, par exemple, les transformateurs et leurs pertes à vide.
- R Limiter le besoin de traçage électrique (profondeur, calorifugeage, circulation) relatif aux systèmes d'assainissement et de défense incendie.
- R Réduire le volume des effluents à relever (collecte intermédiaire, étanchéité) vis-à-vis du réseau d'assainissement.
- R Optimiser les critères de dimensionnement de l'éclairage (exposition - environnement - traitement des têtes, caractéristiques des chaussées sous réserve que cela ne conduise pas à faire venir des matériaux de trop loin ou à impacter négativement l'environnement, vitesse autorisée).
- R Porter une attention particulière au rendement intrinsèque des équipements et à l'optimisation des pertes Joule, notamment :
  - o efficacité des pompes et du réseau de refoulement (diamètre et longueur des conduites, bassins relais)

- o efficacité des pompes et du réseau de défense incendie (diamètre et longueur des conduites)
- o rendement des onduleurs et variateurs de toutes natures
- o efficacité des sources lumineuses et de la photométrie des appareils d'éclairage
- o mutualisation des serveurs (virtualisation) nécessaires aux systèmes supervision, réseaux, radio-communications, réseau d'appels d'urgence, ….

Cette attention particulière au rendement, associée à la mise en œuvre du nombre d'équipements strictement nécessaires, permet d'abord de limiter les ressources nécessaires pour équiper l'ouvrage initialement, puis les déperditions à la source et donc les besoins en termes de ventilation et/ou de climatisation et enfin l'impact des travaux de GER quand ils interviendront.

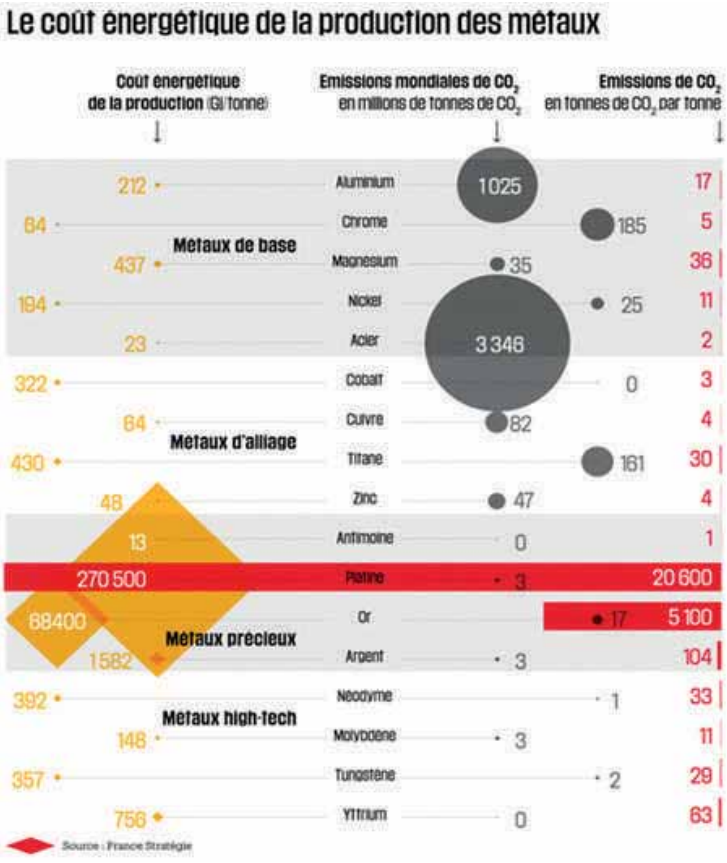
R • Privilégier la ventilation naturelle puis forcée à la climatisation.

Sobriété en ressources :

E • Négocier avec les services de secours la possibilité d'assurer la surpression incendie par leurs Fourgons Pompe-Tonne plutôt qu'avec des installations fixes spécifiques (gain en coût d'installation, d'entretien, de tests, de maintenance, de GER, de servitudes associées).

? • S'interroger sur le choix du type de batteries pour les ASI et les chargeurs (raréfaction des métaux / terres rares).

? • Quel type de câble privilégier ? Cuivre ou aluminium ? Le tableau suivant traite du coût énergétique et des émissions de CO2 mais ne dit rien de la disponibilité des ressources à moyen ou long terme, de leur taux de recyclage, ….



- E • Eviter les équipements inutiles, peu ou mal utilisés comme ce peut être le cas avec les systèmes suivants :
  - o détection incendie linéaire en tunnel
  - o systèmes d'extinction en locaux techniques ou en tunnel

D'une manière générale, n'installer que le strict nécessaire (en termes d'équipements) et éviter de compenser une faiblesse de conception du génie civil par un surcroit d'équipements : les mesures passives de sécurité sont toujours préférables à un renforcement de la ventilation, un tracé sûr est préférable à un renforcement de l'éclairage et de la signalisation, ...

- R • Regrouper autant que possible les équipements sur un nombre limité de sites techniques –ie éviter les ilots d'équipements.
- R • Privilégier une conception robuste, adaptée au contexte spécifique du projet.
- R • Eviter les matériaux corrodables et porter la plus grande attention aux couples galvaniques pour une plus grande durabilité des systèmes d'assainissement, de défense incendie, de ventilation, de signalisation, d'éclairage, ...
- R • Imposer une possibilité de réparation ainsi que le remplacement d'un composant plutôt que de l'équipement, voire du système, en entier (indice de réparabilité).
- R • Respecter l'équilibre naturel hydrologique des massifs traversés qui peut justifier un profil en long en toit plutôt qu'à pente unique.
- C • Valoriser les eaux extrados (réseau séparatif) pour la défense incendie, la mise en eau des regards siphoïdes ou (?) un rafraichissement des locaux.

Economie circulaire :

- R • Recourir à des matériaux recyclables ou recyclés, abondants, peu ou moins difficiles et énergivores à extraire, produire ou raffiner (acier plutôt que « plastique » par exemple).

Neutralité carbone :

- E • Exclure le SF6 des matériels HT.
- E • Exclure (autant que possible) les technologies du passé comme, par exemple, les groupes électrogènes à moteur thermique.
- R • Porter une attention particulière aux choix des fluides caloporteurs pour les transformateurs et pour les climatiseurs ainsi qu'aux choix d'isolation acoustique (pour la ventilation) et thermique (pour les locaux techniques).
- R • Utiliser lorsque c'est possible une source d'énergie renouvelable (solaire, hydraulique, éolien) pour, par exemple, les besoins des locaux techniques de tête.
- ? • Préférer un système de chauffage classique des locaux techniques et d'exploitation à une climatisation réversible ?

Maitrise des pollutions :

- R • Limiter les déclivités pour réduire la pollution des véhicules lourds.
- E • Privilégier les fluides naturels dans les transformateurs immergés.
- R • Choisir rigoureusement les peintures à défaut d'une utilisation limitée.

Biodiversité :

C • Ménager des passages faunes et autres mesures de protection des animaux (crapauducs, …).

PHASE RÉALISATION

Sobriété énergétique :

R • Veiller au bon réglage (y compris orientation) des luminancemètres et cellules crépusculaires du système d'éclairage et, plus généralement, au bon calibrage des capteurs de toutes natures.

Neutralité carbone / Economie circulaire :

R • Considérer l'origine géographique des matériaux et matériels et favoriser le réemploi.

Biodiversité :

R • Limiter les déchets sur le chantier et éviter les rejets polluants vers le milieu naturel.

R • Limiter les nuisances sonores, lumineuses, … notamment à certaines périodes de l'année (période de reproduction, migration, nidification, etc…).

C • Respecter ou rétablir les diverses plantations.

PHASE EXPLOITATION-MAINTENANCE

Sobriété énergétique :

R • Optimiser les fonctionnels, en particulier les autotests (tests périodiques des groupes de secours à moteur thermique, des surpresseurs incendie, des ventilateurs et accélérateurs).

R • Optimiser les temps de fonctionnement :

- o de la signalisation (SAV, PMV) utilisée « juste à temps » (ce qui présente aussi l'avantage de mieux « interpeller » les usagers)
- o de l'éclairage

R • Limiter au strict nécessaire les volumes de données stockées et les flux de données des systèmes supervision, vidéosurveillance (et son éventuelle détection automatique d'incident), réseau d'appels d'urgence, …

R • Imposer un usage plus vertueux de l'infrastructure en réduisant par exemple la vitesse maximale autorisée. L'impact peut être significatif sur l'éclairage et la ventilation, deux des systèmes les plus énergivores.

Sobriété en ressources :

R • Assurer un entretien régulier et une maintenance préventive respectueuse des exigences constructeurs pour faire durer les matériels tout en garantissant leurs performances.

? • Ne pas nettoyer les ouvrages (moins d'eau, moins de polluants, pas de peinture) au risque d'encrasser irrémédiablement les piédroits et de dégrader la luminance ?

Economie circulaire :

R • Utiliser les équipements ou matériels recyclés que certains fournisseurs commencent à proposer.

ELÉMENTS DE MÉTHODOLOGIE

L'approche doit être volontariste, transversale / globale et long-termiste. Elle est fondée sur :

- Un questionnement systématique pour chaque élément du « système tunnel », en génie civil comme en équipements. Il s'agit notamment de cibler tous les systèmes, évidemment les gros consommateurs, occasionnels et permanents, mais aussi les petits consommateurs permanents.
- L'analyse des systèmes d'équipements et de leurs interactions (entre eux et avec l'infrastructure).
- La prise en compte du cycle de vie des installations.

> Selon l'ADEME, « La démarche low-tech implique un questionnement du besoin visant à ne garder que l'essentiel, la réduction de la complexité technologique, l'entretien de ce qui existe plutôt que son remplacement ».

Le questionnement peut valablement s'appuyer sur les critères Eviter-Réduire-Compenser de la démarche ERC au même titre que la démarche FMDS impose de s'interroger sur chacun des critères de Fiabilité, Maintenabilité, …

Il peut être utile de décomposer les « systèmes » pour mieux adresser leurs effets spécifiques et être plus exhaustif :

- capteurs >>> qualité (précision, fiabilité), réglage
- partie opérative >>> fonctionnalités (modes normaux et dégradés, autotests, …)
- actionneurs >>> efficacité

Il est par ailleurs essentiel de considérer les « systèmes » à la fois en tant que tels et dans le contexte spécifique du projet.

La prise en compte du cycle de vie des installations (infrastructures et équipements) doit permettre d'évaluer l'impact environnemental de tel ou tel matériel lors des phases suivantes :

Les méthodes « lean » sont nombreuses, souvent adaptées au contexte et modifiées au cours du temps. Elles visent d'une manière générale l'amélioration des activités et des produits. Trois d'entre elles semblent susceptibles d'offrir un support utile et efficace à la réflexion :

- la méthode « 5S » extrapolable au processus de conception et d'entretien-maintenance.
- la réduction des gaspillages parmi lesquels la surproduction, le surstockage, les transports inutiles, les surtraitements, les défauts et rebuts.
- la « maintenance productive totale » avec ses notions de maintenance planifiée et de conception orientée maintenance.

De fait, on peut souligner une véritable convergence des démarches, méthodes ou concepts « low-tech » et « lean-tech » avec les démarches FMDS et DfM plus usuelles. Toutes visent à garantir l'efficacité des activités (exploitation-maintenance) et la disponibilité des installations, donc de l'infrastructure dont il faut rappeler que la motivation première est l'amélioration d'une fonction économique ou sociale. On retrouve donc les objectifs de réparabilité, durabilité, standardisation, évolutivité, simplicité, …

RECOMMANDATIONS

Eu égard aux enjeux environnementaux, le questionnement systématique évoqué au chapitre méthodologie n'est plus une option : c'est une obligation morale avant d'être, dans un futur proche peut-être, une obligation réglementaire ou légale au même titre que les objectifs sécurité et FMDS.

Il convient, en 1er lieu, de bien définir le niveau de service (1) attendu de l'infrastructure dont le tunnel est un maillon. Cette étape, bien que totalement structurante, est rarement explicitée. Il en résulte fréquemment un surdimensionnement par reproduction de schémas inadaptés que l'analyse du besoin (low-tech) et la réduction des gaspillages (lean-tech) pourraient éviter.

(1) Les critères sont multiples parmi lesquels la sécurité, la disponibilité, la fiabilité, la prévisibilité (durée du parcours, informations sur les conditions de trafic, …), le confort, le coût, …

Lorsqu'il n'est pas possible de se passer totalement d'une consommation énergétique, il s'agit alors de réduire autant que possible les besoins et d'optimiser les systèmes existants. A ce titre, il est recommandé :

- de bien caractériser lesdites consommations en mettant en œuvre des outils de mesure et de suivi suffisamment fins ;
- idéalement, de s'intéresser aux paramètres les plus impactants de chaque système ;
- a minima, de procéder aux optimisations les plus simples et rapides ;
- de traiter en priorité les causes plutôt que leurs effets.

On pourra également chercher à optimiser les opérations d'entretien et de maintenance en évitant les remplacements systématiques trop anticipés et en privilégiant un fonctionnement programmé. Cette dernière option vise à limiter les interventions non planifiées qui sont sources de surcoûts pour les services d'exploitation mais aussi pour les usagers qui ne peuvent s'organiser en amont.

D'une manière générale, le principe « keep it simple » (2) semble aussi pertinent dans une démarche ERC que dans la démarche FMDS ou DfM. La « fuite en avant technologique » doit être a priori évitée et toute complexification doit être solidement motivée par le besoin.

(2) Albert Einstein a proposé la variante suivante : « Everything should be made as simple as possible, but not simpler. » c'est à dire que la conception d'un système doit être la plus simple possible, jusqu'à atteindre une forme minimale.

Enfin, il faut souligner ici que toutes ces recommandations ne s'opposent aucunement au respect des exigences réglementaires et fondamentales de sécurité, bien au contraire. Dit autrement, lesdites exigences ne peuvent justifier l'absence de préoccupations environnementales dont on a vu les convergences avec les démarches FMDS et DfM.

CONCLUSION

Les quelques exemples listés montrent que la majeure partie des mesures d'évitement et de réduction peuvent être décidées (1) dès la phase de conception. Pour autant, il existe aussi des pistes en phase de construction comme en phase d'exploitation.

(1) Pour être plus précis, il faudrait dire « doivent être décidées en phase de conception » car les différer peut signifier les rendre difficilement réalisables, voire impossibles, par la suite. A ce titre, les appels d'offres et les contrats de travaux devraient / devront inclure des critères de choix en phase de sélection comme en phase d'études détaillées.

Par ailleurs, on observe que l'essentiel des mesures consiste à réduire les impacts environnementaux, plus difficilement à les éviter totalement. Des mesures de compensation sont également possibles ; elles sont évidemment importantes mais ne constituent pas l'objectif 1er. En tout état de cause, des mesures concrètes et +/- simples sont possibles pour de nombreux systèmes d'équipements !

Vous (lecteurs) aurez peut-être pensé : « je fais déjà tout ou partie de cela ». Eh bien c'est tant mieux ! Nul doute que les Mr Jourdain de l'écoconception sont nombreux et que, grâce à eux, à vous, la préoccupation environnementale sera mieux prise en compte car, face aux enjeux environnementaux, tous les gestes comptent, petits et grands ! Les mesures ERC doivent donc être encouragées, développées et systématisées chaque fois que possible, dans tous les domaines et sur le cycle de vie complet des installations.

Face au défi climatique majeur auquel notre planète est soumise, la démarche d'écoconception n'est plus une option d'autant que :

- Elle est tout à fait compatible avec les exigences réglementaires de sécurité.
- Elle présente de fait des convergences avec les démarches FMDS, DfM ou encore cybersécurité.
- Elle n'exclut pas de tirer le meilleur parti des Systèmes de Transport Intelligent (qui pourraient révolutionner les mobilités et contribuer à la sécurité) ou de l'Intelligence Artificielle (permettant une gestion optimisée de certains « process »).
- Elle s'impose pour répondre à l'exigence de résilience des infrastructures.
- Elle peut contribuer à la maitrise des coûts globaux de construction, d'exploitation et de maintenance.

ANÁLISIS DEL INCENDIO EN EL TÚNEL DE FOLGOSO. GESTIÓN, REPARACIÓN Y REAPERTURA

Jose Manuel Piris Ruesga
Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana

El 25 de enero de 2021 se produjo un incendio de más de 30 MW en el Túnel de Folgoso, en el tubo sentido Orense, en la A-52. Las actuaciones, tanto del personal de explotación como de los servicios de emergencia, fueron ejemplares, pero esto no evitó que el fuego dañara la infraestructura en más de 500 metros y que a continuación se tuviera que cerrar el tubo afectado.

La Demarcación de Carreteras del Estado en Galicia (Servicio periférico del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana del Gobierno de España) solicitó inmediatamente las obras necesarias para iniciar los trabajos de reparación por el procedimiento de emergencia que recoge la legislación española, iniciándose a continuación las mismas, reabriéndose el túnel en condiciones de seguridad, con todas las pruebas necesarias realizadas a finales de abril.

Durante el periodo que duró el corte, se habilitó un desvío de tráfico por las carreteras N-120 y N-559, con el correspondiente incremento de tiempo y distancia en los itinerarios, trasladando la alta IMD de la autovía A-52 a unas carreteras convencionales, con elevadas pendientes debido a la necesidad de salvar un puerto de montaña y además con los riesgos propios de esas fechas invernales.

El corte del Túnel de Folgoso ha vuelto a poner de manifiesto la importancia que tienen los túneles en la Red de Carreteras del Estado y la necesidad de conservar y mantener los sistemas e infraestructuras asociados.

ANALYSIS OF THE FIRE IN THE FOLGOSO TUNNEL. MANAGEMENT, REPAIR AND REOPENING

On January 25, 2021, a fire over 30 MW was declared in the Folgoso Tunnel, in the Orense direction tube, on the A-52 highway. The actions of both the operating personnel and the emergency services were exemplary, but this did not prevent the fire from damaging the infrastructure in more than 500 meters and subsequently the affected tube had to be closed.

The Demarcation of State Roads in Galicia (Peripheral Service of the Ministry of Transport, Mobility and Urban Agenda of the Government of Spain) immediately requested the necessary works to start the repair work by the emergency procedure included in Spanish legislation, starting next the same, reopening the tunnel in safe conditions, with all the necessary tests carried out at the end of April.

During the period that the road was cut, a traffic diversion was enabled on the N-120 and N-559 roads, with the corresponding increase in time and distance in the itineraries, transferring the high IMD of the A-52 highway to some conventional roads with steep slopes due to the need to save a mountain pass, and also with the risks of those winter dates.

The closure of the Folgoso Tunnel has once again highlighted the importance of tunnels in the State Highway Network and the need to conserve and maintain the associated systems and infrastructures.

ANALYSE DE L'INCENDIE DU TUNNEL DE FOLGOSO. GESTION, RÉPARATION ET RÉOUVERTURE

Le 25 janvier 2021, un incendie de plus de 30 MW s'est produit dans le tunnel de Folgoso, dans le tube direction Orense, sur l'A-52. L'action tant du personnel d'exploitation que des secours a été exemplaire, mais cela n'a pas empêché l'incendie d'endommager l'infrastructure de plus de 500 mètres et par la suite le tube touché a dû être fermé.

La Démarcation des Routes Nationales en Galice (service périphérique du Ministère des Transports, de la Mobilité et de l'Agenda urbain du Gouvernement Espagnol) a immédiatement demandé les travaux nécessaires pour commencer les travaux de réparation par la procédure d'urgence incluse dans la législation espagnole, à partir de la même date, réouverture du tunnel dans des conditions sûres, avec tous les tests nécessaires effectués fin avril.

Pendant la durée de la panne, une déviation du trafic a été permise le long des autoroutes

N-120 et N-559, avec l'augmentation correspondante du temps et de la distance dans les itinéraires, transférant l'IMD élevé de l'autoroute A-52 à certaines autoroutes conventionnel, avec des pentes raides dues à la nécessité de sauver un col de montagne et aussi avec les aléas de ces dates hivernales.

La fermeture du tunnel de Folgoso a une fois de plus mis en évidence l'importance des tunnels dans le réseau routier national et la nécessité de conserver et d'entretenir les systèmes et infrastructures associés.

1. INTRODUCCIÓN

Los Túneles del Folgoso se pusieron en servicio en 1998 y se localizan entre los PP.KK. 278+570 y 281+100 de la A-52. La infraestructura supuso una mejora sustancial en las comunicaciones del sur de Galicia con el resto de la red viaria española, dándose un gran impulso a la economía de la región.

Por otro lado, es preciso subrayar los efectos positivos que la puesta en servicio de este corredor ha tenido en lo que a siniestralidad se refiere, traduciéndose en una reducción de los índices de peligrosidad y accidentalidad, sobre todo, teniendo en cuenta las adversas condiciones meteorológicas invernales que imperan en la zona.

Geométricamente consisten en dos tubos paralelos de 2.520 m con una alineación recta en prácticamente toda su longitud, excepto en los últimos 70 m. Tiene una pendiente máxima del 2,38% con un acuerdo vertical convexo en el interior.

Tras la entrada en vigor de la Directiva Europea de Seguridad en Túneles en 2004, y su trasposición al ordenamiento jurídico español con el RD 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado, entre los años 2009 y 2016 los Túneles de Folgoso fueron objeto de actuaciones de mejora en su equipamiento para adaptarlos a la nueva normativa con los siguientes objetivos:

- **Incremento de seguridad y comodidad** en la conducción de manera que el conductor tenga mejor percepción y mayor información de las condiciones en el interior y entorno del túnel minimizando los riesgos de accidente.
- **Incremento de la eficacia y minimización** de los tiempos de respuesta de los dispositivos de seguridad ante un incidente en el interior del túnel, lo cual permitirá una rápida evacuación y la minimización de daños y víctimas.

2. DESCRIPCIÓN DEL INCENDIO

El lunes 25 de enero de 2021 a las 7:41 de la mañana, en el interior del Túnel de Folgoso, en dirección a Ourense (tubo Nº2) a la altura del PK 280+720, un camión portacontenedores que transportaba siete turismos y una furgoneta, con combustible en sus depósitos, se detuvo, apartándose a la derecha del carril de circulación, tras percibir el conductor una fuerte humareda en la cabeza tractora, iniciándose, a continuación, el incendio que afectó al túnel.

En el Centro de Control se recibió una alarma generada por el sistema de Detección Automática de Incidentes (DAI) captada por una de las cámaras del sistema de CCTV del Túnel de Folgoso 2, en sentido Ourense, a 600 m de la boca de entrada en el PPKK 280+720.

Inmediatamente, se activó el plan de contraincendios de vehículos, denominado en el Manual de Explotación "E2-FUE-02" y que obliga al cierre de ambos tubos del túnel. A las 7:43 se accionó el sistema de barreras y se informó del cierre del túnel en los paneles de mensajería variable exteriores e interiores.

Inmediatamente se comunicó la situación al centro de emergencias 112, a los bomberos de Ponteareas y Rivadavia así como a la Guardia Civil de Tráfico.

El incendio desde el primer momento evoluciona con evolucionó mucha rapidez propagándose a la carga, y afectando a los vehículos que transporta.

A los 19 minutos, tras del inicio del incendio, 08:00, llegaron al lugar del incendio, por la boca oeste, los bomberos de Ponteareas, que comenzaron los trabajos de extinción del mismo, además del retén de los servicios de mantenimiento de la A-52.

Fotografía 2.A.- Inicio del incendio en el camión detenido en el lateral derecho

Tras encauzar el tráfico en las inmediaciones, la Guardia Civil de Tráfico se personó en la zona del accidente a las 8:10. Como apoyo en los trabajos de extinción del incendio, los bomberos de Rivadavia accedieron, por la boca contraria, a las 8:25.

Finalmente, sin ningún tipo de víctimas y tras una evacuación ordenada, a las 8:35, se consiguió sofocar el incendio, que se había originado 54 minutos antes.

Fotografía 2.B.- Estado del camión tras el incendio

A las 9:58 se reabrió el tubo oeste, en dirección Vigo, una vez que los trabajos de extinción habían finalizado y los servicios de conservación junto con los demás servicios de emergencia lo habían revisado y se había considerado seguro.

Figura 2.a.- Desvío de tráfico realizado a través de la N-120

Tabla 2 I. Cronología del incendio

Hora	Tiempo transcurrido	Incidencia
7:41	0:00:00	El camión se detiene a la altura la cámara 206 y tras detectar humo del motor (PK 280+720). Se activa el DAI de las cámaras.
7:43	0:02:00	Se activan las barreras y se cierran ambos tubos del túnel. Se avisa a: Emergencias del 112, retén de conservación, bomberos, jefe de sala-instalaciones y Guardia Civil de Tráfico.
8:00	0:19:00	Llegan los Bomberos de Ponteareas al lugar de los hechos
8:02	0:21:00	Llega el retén de conservación a la boca del túnel
8:10	0:29:00	Llega la Guardia Civil de Tráfico a la boca del túnel
8:25	0:44:00	Llegan los Bomberos de Ribadavia
8:35	0:54:00	Se consigue sofocar el incendio
9:58	2:17:00	Se abre al tráfico el Tubo Nº1 en dirección Vigo.

3. ACTUACIÓN DE LOS SERVICIOS EXTERIORES DE EMERGENCIA

Los servicios exteriores de emergencia que participaron en la incidencia fueron los Bomberos de Ponteareas, los Bomberos de Ribadavia y la Guardia Civil de Tráfico. Al no producirse heridos, no se movilizaron medios del 061.

Para sofocar el incendio actuaron en primer lugar los Bomberos de Ponteareas, base operativa más cercana, y posteriormente, de apoyo, los Bomberos de Ribadavia.

En lo referente a la Guardia Civil de Tráfico, ésta desplegó varias patrullas y apoyó los cortes de tráfico realizados por los servicios de conservación para desviar, a través de la N-559 y la N-120, la circulación de vehículos, evitando que los vehículos accedieran al túnel.

Se debe destacar que los procedimientos definidos en el Manual de Explotación del túnel en el Plan de Emergencia de acuerdo con el R.D. 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, para solventar la incidencia y plasmada en la ficha de incendio de vehículo (E2-FUE-02) se aplicaron correctamente y funcionaron adecuadamente:

A. Evitando que el humo afectara al resto vehículos que estaban en interior.

B. Facilitando la evacuación.

C. Evitando que entraran más vehículos en el túnel.

La coordinación de los medios de Conservación del sector PO-3, con los servicios de emergencia exterior formado por los Bomberos de Ponteareas y Ribadavia para la extinción del incendio, así como con la Guardia Civil de Tráfico para los cortes de tráfico, fue eficaz y satisfactoria

4. CONSECUENCIAS DEL ACCIDENTE

La carga de fuego que se alcanzó en el incendio se estima que superó los 30 MW por la composición del incendio en consonancia con lo recogido en la metodología Marte para este tipo de incendios.

Los daños provocados fueron severos en unos 500 metros del tubo afectado, afectando a los siguientes elementos:

Instalaciones

1. Iluminación permanente, de seguridad y emergencia.
2. Cableado eléctrico.
3. Cable radiante.
4. Fibra óptica.
5. Cámaras CCTV.
6. Cable de detección de incendios.
7. Megafonía.
8. Sensores ambientales.
9. PMV´s y semáforos.
10. Señalización lateral de guiado.

Estructura

1. Pavimento
2. Paneles de acero vitrificado
3. Pintura antiincendios de la bóveda dañada

Fotografía 4.A.- Elementos afectados en sección tipo

Todos estos daños comprometían los sistemas esenciales para el normal funcionamiento y explotación del túnel. Con tal motivo, el Responsable de Seguridad de Túneles del Sector, tras evaluar los daños producidos en el mismo y, en virtud del artículo 7 del RD 635/2006, propuso a la Autoridad Administrativa el cierre del túnel en dirección Ourense hasta que no se recuperasen las condiciones de seguridad previas al incendio; adoptándose la correspondiente Resolución en este sentido

Una vez interrumpido el tráfico sentido Benavente, se habilitó un desvío a través de las carreteras N-559 y N-120, entre los enlaces 269 y 282 de la autovía A-52. Este desvío supuso un importante inconveniente para los usuarios dado que implicaba un recorrido de 23,2 kilómetros por una carretera con un trazado complicado en una zona de montaña con climatología adversa (frecuentes nieblas, heladas, precipitaciones en forma de nieve…) y con abundante ganado semisalvaje en los márgenes, contra 13 km de autovía.

De este modo, el tráfico soportado por la N-559 y la N-120 se incrementó considerablemente, sobre todo en lo que a vehículos pesados, pasando de una categoría T3 y T4 para la N-559 y N-120, respectivamente, a una categoría T0. Este volumen de tráfico, en combinación con una elevada pluviosidad en aquellas fechas, provocó un deterioro muy importante del firme, sobre el que fue necesario también actuar de manera urgente.

De forma indirecta, el incendio en el túnel generó una situación de riesgo en las carreteras del desvío por una merma en las condiciones de seguridad vial debido al alto tráfico soportado.

La conclusión fue la necesidad de actuar de forma inmediata para reparar los graves daños ocasionados por el incendio en el túnel para poder recuperar las condiciones básicas de seguridad que permitieron su reapertura al tráfico; así como intervenir sobre el desvío habilitado para garantizar su adecuado funcionamiento en tanto se desarrollaban las obras.

La Demarcación de Carreteras del Estado (como responsable periférico de esta infraestructura dentro del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana) con el fin de afrontar las obras de reparación de los daños anteriormente citados consideró conveniente solicitar las correspondientes obras de emergencia, para llevar a cabo de forma urgente los trabajos necesarios de reparación.

A continuación, se describen las actuaciones específicas para la reparación de los daños que se detectaron en la infraestructura, encaminadas a recuperar los niveles mínimos exigidos en cuanto a funcionalidad y seguridad.

INSTALACIONES Y EQUIPAMIENTO DEL TUNEL

- Reparación del sistema de iluminación
- Reparación del sistema de ventilación, detectores de CO, NO y opacímetros.
- Reparación del sistema de radiocomunicaciones
- Reparación del sistema eléctrico
- Reparación de la señalización variable, luminosa y fotoluminiscente
- Reparación de sistema de detección y aviso para protección contra incendios
- Reparación de postes SOS y red contraincendios
- Reparación de sistema de megafonía
- Reparación de sistema de videovigilancia
- Reparación del control de comunicaciones

REHABILITACION OBRA CIVIL INTERIOR

- Tratamiento de hastiales y bóveda
- Reparación del firme y señalización horizontal del interior del túnel

FIRMES EXTERIORES

- Rehabilitación de firmes N-120 y N-559 y señalización horizontal.

5. DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS

Ante el estado en que quedó el tramo del túnel afectado, se procedió a consolidar el desvío provisional por la N-559 y N-120, en dirección a Ourense. Para ello fue necesario actuar de forma puntual e inmediata sobre la estructura del firme de dichas carreteras, con el fin de garantizar la seguridad de circulación mientras se diseñaba una rehabilitación de mayor índole sobre las mismas.

Al mismo tiempo, se procedió a un análisis pormenorizado de las condiciones de seguridad y el estado de las instalaciones tras el incidente en el interior del túnel, así como a definir en toda su extensión la actuación de reparación a efectuar, que se plasmó en el correspondiente documento técnico y presupuestario que sirvió de base para la contratación de las obras.

En febrero de 2021, se declaró la Emergencia de las actuaciones propuestas que se habían dividido en tres capítulos conforme a la especialización que se requería para la ejecución de cada uno de ellos.

Una vez firmados los contratos correspondientes, se iniciaron los trabajos de reparación de forma coordinada. Estas labores de coordinación fueron fundamentales ya que parte del equipamiento del túnel requería de suministradores internacionales especializados en explotación de túneles, con plazos de entrega ajustados.

La Autoridad Administrativa del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana procedió a la reapertura al tráfico a finales del mes de abril de 2021.

A continuación, se enumerarán las instalaciones y equipamiento afectados por el incendio, incluidas en la obra de emergencia.

5.1. INSTALACIONES Y EQUIPAMIENTO DE TÚNELES

5.1.1. Sistema de iluminación

El sistema de iluminación, imprescindible para garantizar unas adecuadas condiciones de visibilidad y asegurar una correcta evacuación dentro del túnel, está basado en luminarias con lámparas fluorescentes tanto para el alumbrado permanente como el de seguridad y emergencia, disponiendo de un sistema de telegestión (DALI). El refuerzo en las zonas de transición se basa a su vez en luminarias de halogenuros metálicos. Adicionalmente a los elementos indicados, el túnel dispone de luminarias de guiado y señalización de evacuación.

Como consecuencia del siniestro sufrido en las instalaciones del túnel todos estos elementos, junto con el cableado y las cajas de conexión correspondientes, fueron afectados en su totalidad en una longitud aproximada de 300 metros, existiendo elementos comprometidos hasta una distancia de 500 metros desde el foco de incendio.

5.1.2. Sistema de ventilación, detectores de CO, NO y opacímetros

En el tubo afectado este sistema consta de 12 ventiladores axiales reversibles de 45 kW. Este conjunto de ventiladores se complementa con 3 detectores de NO y Opacidad, 3 detectores de CO y Opacidad y 5 anemómetros. Los datos recogidos por éstos últimos aportan los valores necesarios para accionar los primeros, garantizando de este modo la correcta evacuación de humos en caso de incendio, así como unas condiciones sanitarias compatibles con una atmósfera salubre.

Se trata de un sistema esencial exigido por el RD 635/2006 para túneles de esta categoría y sin el cual no es viable un funcionamiento en régimen normal de explotación.

Fueron localizados daños en un arrancador de ventilación, un anemómetro y una pareja de detectores (NO y CO), así como en el cableado asociado de comunicaciones entre sensores y alimentación eléctrica de los mismos.

5.1.3. Sistema de Radiocomunicaciones

Este sistema extiende al interior las comunicaciones de canales de mantenimiento, servicios de emergencia y canales comerciales de FM. La inserción de radiocomunicaciones en el interior del túnel es fundamental para la correcta comunicación por radio de los servicios de emergencia (Guardia Civil de Tráfico, protección Civil, 061, bomberos, etc.) y se realiza a través de un cable radiante situado en la clave del túnel.

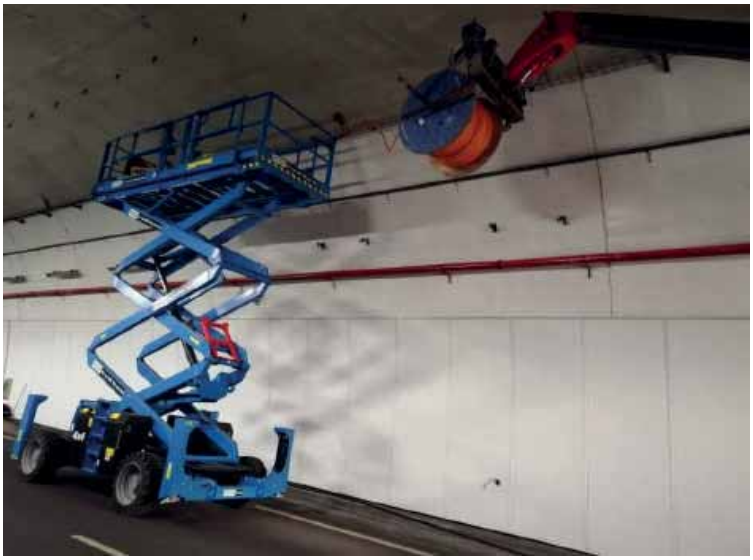
A consecuencia de las intensas temperaturas experimentadas en la zona del foco de incendio y por la propagación de calor a través del cobre del cable coaxial, dicho sistema fue inutilizado en un tramo de unos 500 metros, por lo que se llevó a cabo su reposición, así como las derivaciones a la galería 6 de evacuación.

5.1.4. Sistema eléctrico

El túnel de Folgoso cuenta con un sistema de alimentación eléctrica de doble acometida conformado por: Un centro de seccionamiento con dos líneas de alimentación procedentes de distintas subestaciones eléctricas, 4 centros de transformación y una red de Media Tensión, con distribución en anillo tolerante a fallos, que discurre de forma subterránea.

El sistema de alimentación ininterrumpido del CT interior del túnel, resultó afectado, por lo que se sustituyó el conjunto de baterías y la placa electrónica del SAI.

Igualmente, fueron dañadas las bandejas metálicas del tipo rejilla que soportan el cableado de alimentación y comunicación de los sistemas de seguridad del túnel



Fotografía 5.1.4.A.- Reposición de cableado de suministro eléctrico

5.1.5. Sistema de señalización variable, luminosa y fotoluministecente

Al igual que en los casos anteriores se trata de un sistema necesario exigido por la actual normativa, fundamental para el cierre del túnel y para garantizar una correcta comunicación con el usuario de la vía.

En el interior del túnel y en el sentido afectado se dispone de 7 conjuntos de dos Aspa- Flecha con pictograma central, 6 conjuntos de 2 pictogramas, 3 PMV interiores y 4 agrupaciones de 6 semáforos RAV. También se dispone de la señalización fija dispuesta sobre los paneles de acero vitrificado situados en ambos hastiales: señalización fotoluminiscente, bandas de señalización y carteles retroiluminados para señalización de equipamiento de emergencia.

A la altura del foco de incendio se produjeron daños de consideración y se inutilizó: 1 PMV interior, 1 conjunto de dos pictogramas, 2 semáforos RAV, una gran cantidad de señalización fotoluminiscente y 30 carteles retroiluminados.

Fotografía 5.1.5.A.- Señalización de evacuación añada

Se ha llevo a cabo reposición del correspondiente cableado de alimentación y de los demás distintos elementos de señalización.

5.1.6. Sistema de detección y aviso para protección contra incendios

Conformado por un cable sensor en la clave del tubo que detecta el incendio mediante la medición de los efectos de dispersión de un haz laser transmitido por el cable detector. Cada tubo se divide en 8 zonas de detección cuyas fronteras se determinan por la situación de las bocas y las galerías. Se trata de un sistema vital, y que resultó de gran utilidad para agilizar la toma de decisiones y la activación del protocolo de actuación para, de este modo minimizar la afección a los usuarios.

Las diferentes inspecciones realizadas determinaron que los elevados daños no permitían el adecuado funcionamiento de este sistema de seguridad por lo que se repuso completamente el sistema.

5.1.7. Postes SOS y red contraincendios

El Túnel dispone de 12 puestos de socorro en cada uno de los tubos, uno adicional en el exterior de cada boca y otro adicional en cada galería de conexión. Estos puestos de socorro disponen de dos extintores de incendios dentro un armario con detección de apertura.

De igual modo, cada tubo dispone de 50 BIE's instaladas en ambos hastiales al tresbolillo cada 50 m. Las BIE's están equipadas con manguera semirrígida de 25 mm, racor de conexión de 45 mm y extintor de 6 kg (21 A/113B). Se encuentran comunicadas entre sí por una conducción situada sobre cada hastial y se alimentan desde dos depósitos de 80 m3 situados en las bocas del túnel.

Se registraron daños en 2 armarios BIE y en 1.000 metros de tubería con lo que se ha llevado a cabo una rehabilitación y repintado de la misma. Igualmente se repusieron las bajantes de las conducciones generales a estas dos BIES, así como la parte correspondiente de la tubería general en la zona del incendio.

También se repusieron las compuertas cortafuegos de presurización de la galería 6.

Igualmente, en el poste SOS, situado en la zona del incendio, se reparó el sistema de comunicación por fibra óptica y el cableado de alimentación y señas de las cámaras, así como los propios equipos de aviso del poste SOS.

5.1.8. Sistema de megafonía

Para la emisión de mensajes de audio en el interior del Túnel se dispone de un sistema de megafonía que puede discriminar 17 zonas. Dentro de cada tubo, todas las zonas de megafonía se alimentan por dos circuitos con amplificadores independientes.

Por la dispersión del calor a lo largo de la bóveda, y al no tratarse de elementos ignífugos, fueron afectados 65 altavoces exponenciales junto con el cableado correspondiente.

5.1.9. Sistema de videovigilancia

El sistema CCTV en el interior del túnel cuenta con 7 cámaras en galerías, 60 cámaras interiores fijas (30 por tubo) y 14 cámaras domo (7 por tubo). Las cámaras fijas disponen de un sistema de Detección Automática de Accidentes (DAI) que permite la detección de cualquier anomalía en el túnel: peatones, vehículos circulando a velocidad anormalmente reducida, obstáculos en la vía….

El incendio ocasionó daños en 2 cámaras fijas y 1 domo, careciendo de visión y sistema DAI en un tramo de 200 metros.

5.1.10. Comunicaciones y control

El túnel cuenta con un tendido de fibra óptica que discurre por una canalización enterrada. En la zona del incendio, tras las pruebas de reflectometría realizadas se registraron daños que impedían la correcta comunicación con los equipos de campo.

Se llevó a cabo la retirada de la actual manguera de fibra óptica y su completa reposición en un tramo de 450 metros.

5.2. REHABILITACIÓN OBRA CIVIL INTERIOR

5.2.1. Tratamiento de hastiales y bóveda

La afección sobre los paneles de acero vitrificado fue considerable en un tramo de 150 metros desde el foco de incendio.

Fotografía 5.2.1.A.- Reposición de paneles de acero vitrificado en hastiales

Los daños sobre la bóveda eran variables. En un tramo de 500 metros desde el foco de incendio, ante los daños en el tratamiento cerámico existente, fue necesario y conveniente el repintado completo. Por otra parte, debido a la gran concentración de los residuos de combustión adheridos tanto en hastiales como en la bóveda fue necesaria la limpieza completa del resto de la longitud del túnel con equipos de alta presión.

Fotografía 5.2.1.B.- Limpieza de bóveda con equipos de alta presión

5.2.2. Firme y señalización horizontal en el interior del túnel

El firme en el entorno del incendio se vio gravemente afectado tanto por los desperfectos provocados directamente por el incendio como por los residuos plásticos derretidos que se acumularon sobre el mismo. Por dicho motivo fue necesario el fresado y reposición en la zona afectada y la limpieza a alta presión del resto de la longitud del tunel.

5.3. FIRMES EXTERIORES

5.3.1. Rehabilitación de firmes N-120 y N-559 y señalización horizontal

Como antes hemos comentado, además de los daños provocados directamente por el incidente del vehículo en el interior del túnel, se observó la necesidad de otra actuación sobre el firme de la N-559 y N-120 derivada del funcionamiento del desvío.

El estado el firme, dedicado en las última décadas principalmente a itinerarios locales, y las nuevas solicitaciones de tráfico en el tramo de desvío de la N-559 – N-120 entre los enlaces 269 y 282 de la autovía A-52, provocaron una fatiga estructural de las distintas capas de firme produciéndose elevados deterioros del mismo.

Como consecuencia, se llevó a cabo la reposición de firme en las zonas afectadas, así como el repintado de las marcas viales de todo el trazado del desvío, para garantizar de este modo un nivel de servicio adecuado a las características del tráfico soportado durante el período de obra.

Fotografía 5.2.3.A.- Actuación sobre el firme en la N-120

6. REAPERTURA

Las obras de emergencia se iniciaron el mismo día en que se produjo en incendio, el 25 de enero de 2021, comenzando por los trabajos de acondicionamiento puntual del pavimento del desvío y siguiendo con el resto de las actuaciones coordinando las áreas de trabajo para evitar interferencias en el desarrollo de los mismos y buscar la máxima eficacia para la reapertura del túnel a la circulación que se produjo a finales del mes de abril del 2021.

Fotografía 7.A.- Estado del túnel tras las obras de emergencia

RESILIENCE OF GERMAN ROAD TUNNELS AND THE MACROECONOMIC EVALUATION OF THEIR AVAILABILITY

[1]Ulrich Bergerhausen, [2]Alexander Dahl, [2]Charlotte Fléchon, [3]Harald Kammerer, [1]Ingo Kaundinya

[1]Federal Highway Research Institute, Germany
[2] PTV Group, Germany
[3] ILF Consulting Engineers Austria GmbH, Austria

Aging infrastructure, increasing traffic volumes, extreme events and climate change pose challenges for owners and operators of transport infrastructure. In particular, the unavailability of tunnels can lead to significant economic losses and negative consequences for the local and regional traffic situation. The German research project RITUN, which was funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), has developed ways to increase the availability of tunnels.

To quantify the availability the regional traffic impacts and the resulting socio-economic costs of restrictions on availability were analysed using two tunnels as examples for different scenarios. The results are used to calculate socio-economic costs from changes in travel and transport times, operating costs, air pollutant and climate gas emissions, as well as accident occurrence based on the methodology of the German Federal Transport Infrastructure Plan 20301. The non-availability or limited availability of the two-lane tunnel under consideration entails overall socio-economic costs of up to approx. 760,000 €/day. For the three-lane tunnel, the overall socio-economic costs are even higher at up to approx. 920,000 €/day.

Against this background, considerations to increase the availability of both tunnels are urgently required from an economic point of view. In RITUN, therefore, a methodology was developed that makes it possible to increase the availability of tunnels while at the same time ensuring the safety of road users. This paper describes the methodology and their application to improve the availability of tunnels.

RESILIENCIA DE LOS TÚNELES DE CARRETERA ALEMANES Y EVALUACIÓN MACROECONÓMICA DE SU DISPONIBILIDAD

El envejecimiento de las infraestructuras, el aumento del volumen de tráfico, los fenómenos extremos y el cambio climático plantean retos a los propietarios y operadores de infraestructuras de transporte. En particular, la indisponibilidad de los túneles puede provocar importantes pérdidas económicas y consecuencias negativas para la situación del tráfico local y regional. El proyecto de investigación alemán RITUN, financiado por el Ministerio Federal de Educación e Investigación (BMBF), ha desarrollado formas de aumentar la disponibilidad de los túneles.

Para cuantificar la disponibilidad se analizaron los impactos del tráfico regional y los costes socioeconómicos resultantes de las restricciones a la disponibilidad, utilizando dos túneles como ejemplo para diferentes escenarios. Los resultados se utilizan para calcular los costes socioeconómicos derivados de los cambios en los tiempos de viaje y transporte, los costes de explotación, las emisiones de contaminantes atmosféricos y de gases climáticos, así como la ocurrencia de accidentes, basándose en la metodología del Plan Federal de Infraestructuras de Transporte de Alemania 20301. La no disponibilidad o la disponibilidad limitada del túnel de dos carriles considerado conlleva unos costes socioeconómicos globales de hasta aproximadamente 760.000 euros/día. En el caso del túnel de tres carriles, los costes socioeconómicos globales son aún más elevados, hasta aproximadamente 920.000 euros/día.

En este contexto, es urgente considerar la posibilidad de aumentar la disponibilidad de ambos túneles desde el punto de vista económico. Por ello, en RITUN se ha desarrollado una metodología que permite aumentar la disponibilidad de los túneles y, al mismo tiempo, garantizar la seguridad de los usuarios de la carretera. Este documento describe la metodología y su aplicación para mejorar la disponibilidad de los túneles.

LA RÉSILIENCE DES TUNNELS ROUTIERS ALLEMANDS ET L'ÉVALUATION MACROÉCONOMIQUE DE LEUR DISPONIBILITÉ

Le vieillissement des infrastructures, l'augmentation des volumes de trafic, les événements extrêmes et le changement climatique constituent des défis pour les propriétaires et les exploitants d'infrastructures de transport. En particulier, l'indisponibilité des tunnels peut entraîner des pertes économiques importantes et des conséquences négatives sur la situation du trafic local et régional. Le projet de recherche allemand RITUN, financé par le ministère fédéral de l'éducation et de la recherche (BMBF), a développé des moyens d'accroître la disponibilité des tunnels.

Pour quantifier la disponibilité, l'impact sur le trafic régional et les coûts socio-économiques qui en découlent ont été analysés en utilisant deux tunnels comme exemples pour différents scénarios. Les résultats sont utilisés pour calculer les coûts socio-économiques liés aux changements dans les temps de déplacement et de transport, les coûts d'exploitation, les émissions de polluants atmosphériques et de gaz climatiques, ainsi que les accidents, sur la base de la méthodologie du plan fédéral allemand d'infrastructures de transport 20301. La non-disponibilité ou la disponibilité limitée du tunnel à deux voies considérées entraîne des coûts socio-économiques globaux pouvant atteindre environ 760 000 €/jour. Pour le tunnel à trois voies, les coûts socio-économiques globaux sont encore plus élevés, jusqu'à environ 920 000 €/jour.

Dans ce contexte, il est urgent d'envisager d'augmenter la disponibilité des deux tunnels d'un point de vue économique. C'est pourquoi le RITUN a développé une méthodologie qui permet d'augmenter la disponibilité des tunnels tout en assurant la sécurité des usagers de la route. Cet article décrit la méthodologie et son application pour améliorer la disponibilité des tunnels.

1. INTRODUCTION

As an essential part of the German transport network, the federal trunk roads help to ensure individual mobility and the reliable supply of private households and the economy. Tunnels are particularly critical systems of high relevance due to their direct influence on the availability of the networks. The failure of individual objects often leads to serious traffic disruptions in the local but also regional environment. The demands on their reliability are therefore particularly high.

This is where the concept of resilience comes into play, which takes a holistic view of how to deal with disruptive events. Resilience refers to the ability to cope with disruptive events or the resulting damage and to enable a rapid return to service. Existing methods of risk analysis are being expanded to include a complete approach to disruptive events. So far, the focus has been primarily on preventing incidents and protecting tunnel users, structures and equipment in the event of an incident. In contrast, the appropriate reaction to disruptive events and the return to the original state is only represented as a subordinate aspect.

This holistic approach is graphically represented in the resilience cycle (see Figure 1). In an iterative process, the steps of the resilience phases "prevent", "protect", "respond" and "recover" run in chronological order. The centrally arranged phase "prepare", on the other hand, can be seen as superordinate and temporally decoupled as can learning from past events. Measures to increase resilience are assigned to these phases.

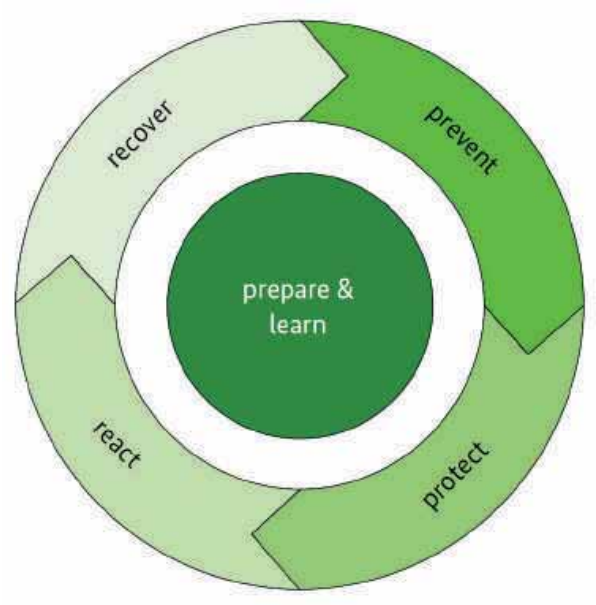


Figure 1: Resilience cycle, based on (Thoma, 2014)[2]

2. IDENTIFICATION OF POTENTIAL THREATS AND DAMAGE SCENARIOS

The basis of the investigations is a comprehensive threat analysis following the all-hazard approach. All currently known threats to the functionality of German road tunnels were identified. These were categorised into natural and man-made threats that could potentially cause damage. Special attention was paid to disruptive events, which are not or only to a lesser extent taken into account in existing regulations.

In practice, threats lead to damage scenarios of different types: structural damage scenarios describe damage directly to the tunnel structure and operational damage scenarios describe damage to the equipment of

the tunnel. In contrast, in obstructive damage scenarios no direct structural damage occurs, but a blockage of one or more lanes. This in turn leads to additional travel times and thus to overall economic damage and costs.

Figure 2: Schematic relationship between threats and damage scenarios

In the course of preparing the RITUN guideline, the complex and very individual connections between threats and the resulting damage were established and documented. The further considerations, exclusively at the level of the damage scenarios, additionally allow for the consideration of previously unknown events, whereby users of the guide can in particular prepare for novel scenarios in addition to the expected. For better understanding, this relationship is shown schematically in Figure 2.

3. MINIMUM OPERATING REQUIREMENTS

In order to assess the effects of damage scenarios on tunnel operation and to be able to optimize it in the future, minimum operating requirements were developed. This defines whether and under which conditions a road tunnel may continue to be operated after the occurrence of a damage scenario. With the help of possible risk-reducing compensatory measures, the availability of road tunnels can partially maintained while maintaining the required safety level. The early running through of certain scenarios and the preliminary establishment of minimum operating conditions helps to react during the phase. Thus, this approach was examined as a very important resilience measure in terms of Business Continuity Management (BCM) for the recovery phase. In order to be able to estimate the impact of an event on the operation and availability of a tunnel, it is necessary to define a safety criterion that describes the boundary state between to¬lerable and critical risk. This was done by the development of minimum operating conditions under which a tunnel may be (temporarily) operated in response to a disruptive event. After a damage scenario has occurred, it must be examined whether tunnel operation can be continued or which additional compensatory measures are necessary to ensure an adequate safety level. This question arises mainly in the case of operational disrupzions. In the case of structural damage that does not endanger the stability of the structure, as well as in the case of obstructive damage scenarios, the respective traffic operation scenario results directly from the requirements for the repair of the damage (repair) or obstruction. The risk resulting from the operational damage scenarios was determined and evaluated using qualitative and quantitative risk analysis methods.

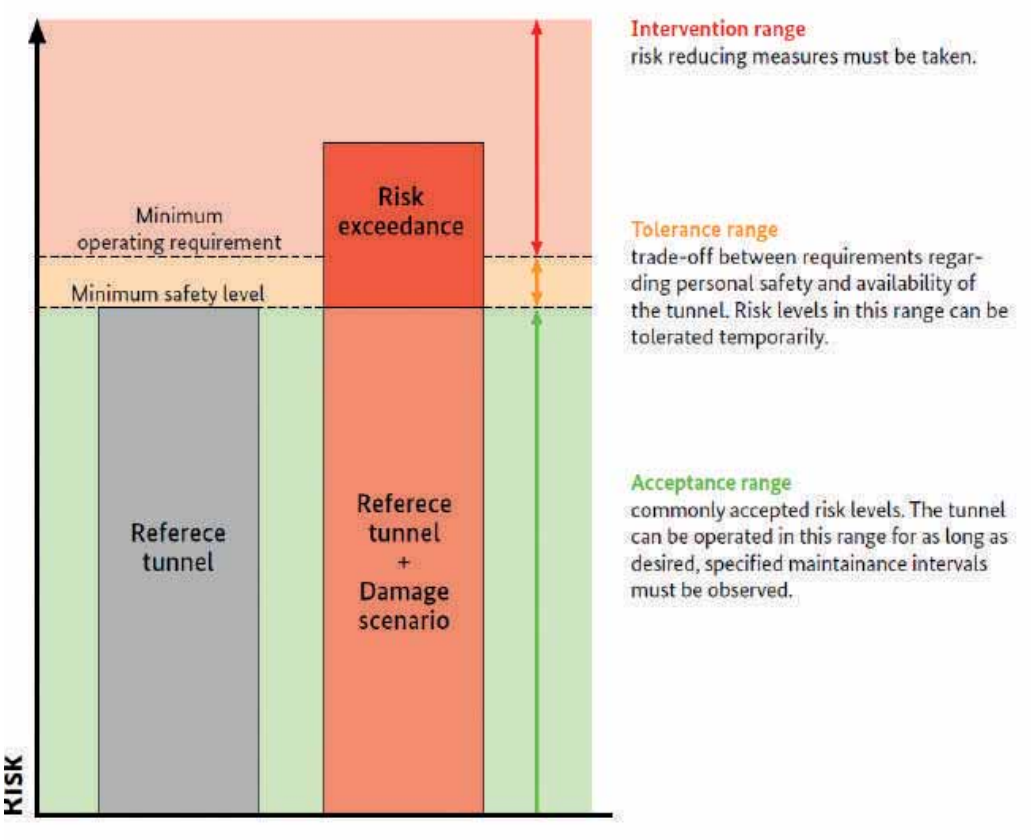


Figure 3: Thresholds for acceptable and unacceptable risks in the safety assessment of road tunnels

In a tunnel equipped in accordance with the applicable regulations (e.g. RABT3 in Germany), compliance with the prescribed minimum safety level is generally no longer ensured as a result of a damage scenario. On the basis of risk analyses it can be assessed in a comprehensible way whether the prescribed risk criteria are met, possibly with the aid of compensation measures, so that the normatively required safety level can still be maintained. In the German RABT it is explicitly pointed out that deviations from the specifications made in the guidelines for the specific tunnel are permitted if the described safety level is not undercut.

The safety of the tunnel users is the decisive risk factor here. As a reference value, the risk in a model tunnel fully equipped in accordance with applicable regulations is used. This reference value corresponds to the first of two thresholds that divide the risk scale into three areas (see Figure 3). The risk-analytical evaluation of damage scenarios requires the consideration of a large number of parameters, which is why clearly structured and comprehensible work steps are of particular importance. The following methodical sequence was developed for this purpose (Figure 4). Risk assessment is performed by evaluating safety relevance and safety significance. Safety-relevant are all damage scenarios that can cause relevant effects on the safety of persons through their occurrence. Safety-significant are all damage scenarios that show a risk exceeding the tolerance range and lead to reaching the intervention range (see figure 3). Risk reduction of the risks increased by a damage scenario can be achieved by functional or safety-related compensation. Through functional compensation, the damage of a component can be fully or partially compensated by existing redundancies or by other systems. For example, a visual opacimeter system can functionally replace the failure of a sensor to measure CO (NO) concentration. If no sufficient reduction of the risk can be achieved by functional compensation, additional safety-related measures must be taken to counteract, e.g. by a fire department unit at the tunnel portal.

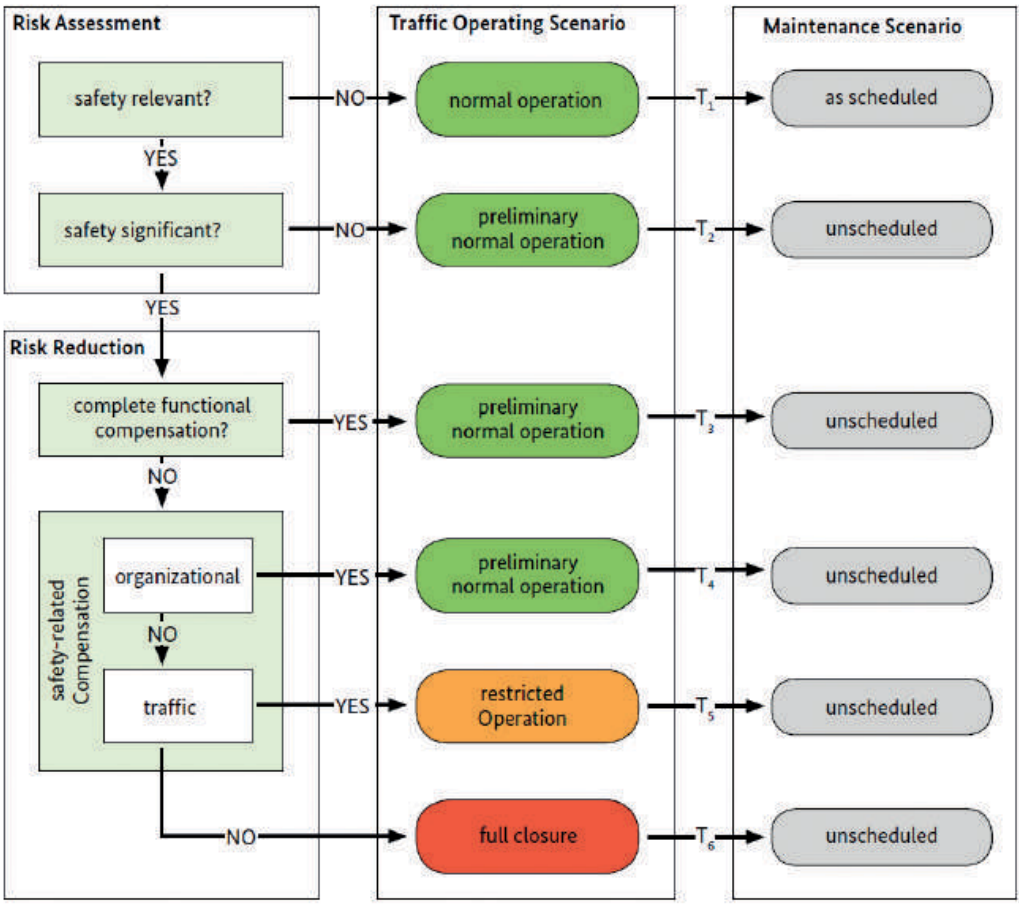


Figure 4: Framework for evaluating the effects of damage scenarios on operation and maintenance

Organizational measures for safety-related compensation have no influence on the traffic flow, so normal operation can be resumed for the time being. However, if traffic measures are necessary, they will result in a restricted traffic operating scenario. Technical measures such as video detection, thermal scanners or automatic fixed-fire-fighting systems, which are not part of the equipment required for example in the German RABT4, can also help to reduce the probability of occurrence and extent of damage of accidents and fires.

4. EFFECTS OF DAMAGE SCENARIOS ON TRAFFIC AND SOCIO-ECONOMIC COSTS

In order to evaluate the effects of damage scenarios on the traffic at the network level, scenarios for non-availability or limited availability for two tunnels have been defined. The effects were first mapped and quantified in a subnetwork of a Germany-wide traffic model. The model results are then used to calculate overall socio-economic costs from changes in travel and transport times, operating costs, air pollutant and climate gas emissions as well as accidents, based on the methodology of the Federal Transport Infrastructure Plan 20305. The calculations were carried out within a self-developed module.

4.1 Selection of the scenarios to be investigated

The type of impairments analysed with information on the extent of the closure, defined residual capacities and permissible maximum speeds are defined as traffic operating scenarios within the scope of the study.

The first scenario is defined as baseline scenario picturing the actual situation. The second scenario describes the extreme case of the tunnel being fully closed. The eight other scenarios are different traffic operating scenarios, in which one direction of travel is completely, partially or for certain vehicles closed. For these traffic operating scenarios model-based failure effects were determined.

4.2 Traffic model

The model used for the analysis is called PTV Validate traffic model and covers the entire German main road network as well as all other European countries. The model depicts car and truck traffic. The traffic assignment calculated in PTV Visum provides route information in addition to traffic volumes for all road stretches of the network: The model not only provides information on the number of vehicles passing a location, but also where they are coming from, where they are going and on which route they are travelling. Validate offers the possibility to cut out any desired sub-model and thus provides the ideal basis for local and regional studies in which, for example, changes in the transport network due to investments or damage scenarios are to be analysed.

For the present study, a wide-area subnetwork was generated and calibrated from Validate. When delimiting the spatial scope of the sub-network, the location of alternative routes was taken into account so that all relevant route shift effects in the road network are captured.

In the following, the basic network was supplemented with regard to individual aspects in order to be able to calculate overall economic costs according to the methodology of the Federal Transport Infrastructure Plan 20305.

4.3 Evaluation calculations

4.3.1 Target System

The target system is of particular importance in every assessment procedure because it forms its basis. In the evaluation of the analysed scenarios, the expectations and demands on the traffic system in the event of an incident are expressed with the help of the target system. The target system must therefore meet a wide range of requirements. In particular, aspects of sustainability must be taken into account. A target system consisting of three impact areas is used (see Figure 5):

- Social: Protection of human life and material goods represented by accidents
- Economy: regional economy represented by travel and transport times and operating costs
- Ecology: Environment, represented by air pollutant and climate gas emissions

Figure 5: Target System for the macroeconomic evaluation

The evaluation procedure derived from this includes indicators for describing or calculating the overall socio-economic effects of the above-mentioned areas. The calculation of the indicators is based on calculations in which scenarios that include a lower availability of the tunnels due to events are defined as case scenarios and are compared with the above-mentioned baseline scenario.

The results determined with the help of PTV Validate form the basis for determining the value of the indicators with which the fulfilment of the intentions and specifications of the target system can be verified. Monetisation is used to combine the partial results of the individual criteria into an overall result.

4.3.2 The indicators

- Change in travel and transport time

  One parameter for the evaluation of the overall economic effects is the change in travel time in the network in the comparison between the case scenario and the baseline scenario. Additional travel times of persons cannot be used by them for other, possibly also productive purposes. From a macroeconomic point of view, this results in costs. Transport times are also associated with costs in freight transport, as the goods tie up capital during the transport time that cannot be used productively. Furthermore, additional transport times mean longer reordering times and thus longer warehousing with corresponding cost disadvantages. Personnel costs in HGV transport are treated in accordance with the Federal Transport Infrastructure Plan assessment procedure within the framework of operating costs.

  To determine the change in travel and transport time, the sum of vehicle hours is calculated for all routes in the network for the case and baseline scenario.

- Change in operating costs

  Operating costs include costs resulting from the operation of vehicles. These include the following costs:

  - Provisioning costs are time-dependent costs resulting, for example, from time-dependent depreciation.
  - Basic operating costs are mileage-dependent costs resulting, for example, from mileage-dependent depreciation, tyre wear or in connection with lubricant consumption.
  - Energy costs result from the energy consumption of the vehicles.
  - Personnel costs in truck transport are taken into account as a fourth component.

  To the extent that tunnels are partially or completely unavailable, changes in these operating costs may result from changes in vehicle operating times and mileage due to a change in route choice.

  Consumption factors from the "Handbook of Emission Factors" (HBEFA) are used to quantify energy consumption. The consumption factors are integrated as an add-on module in the macroscopic simulation software PTV Visum. As part of the procedure, the energy consumption is evaluated separately for motorised individual traffic and for heavy goods traffic: The consumption factors are selected from the HBEFA data pool for each road stretch of the network. The selection is made depending on the traffic situation and vehicle group (heavy goods vehicles and light goods vehicles with the consumption concepts used) of the road stretch. The tabulated consumption factors show considerable differences. In this respect, the parameters have a considerable influence on the level of energy consumption. The following aspects of each road stretch are taken into account when calculating its energy consumption.

  - Road class (e.g. motorway or district road)

- Maximum permissible speed Location (urban or rural)
- Traffic condition (level of service) with predefined class limits
- Traffic volume of each vehicle group
- Composition of the vehicle groups with reference to fuel type, size class, emission level

The current level of service (traffic condition), the location (urban or rural) and the predefined HBEFA road class assigned to the road stretches (incl. the maximum permissible speed) result in a consumption factor for each applied vehicle group. This factor corresponds to the specific traffic situation and is multiplied by the current traffic volume of the vehicle group and the length of the road stretch. As a result, the absolute energy consumption in tonnes is summed up across all road stretches.

- Change in air pollutant and climate gas emissions

The changed traffic situation not only causes changes in travel times and mileage, but also changes in air pollutant and climate gas emissions. Vehicle exhaust emissions contain air pollutants that have a negative effect on people and the environment. In addition, greenhouse gases are released, which lead to an increase in the greenhouse gas concentration in the atmosphere. This increase is responsible, among other things, for the human-induced warming of the earth's surface and thus contributes significantly to climate change. Air pollutants and climate gas emissions cause macroeconomic costs, e.g. in the area of health costs.

The Federal Transport Infrastructure Plan methodology considers the following six pollutant types:

- Carbon monoxide (CO)
- Carbon dioxide (CO2)
- Nitrogen oxide (NOX)
- Particulate matter (PM)
- Hydrocarbons (HC)
- Sulphur dioxide (SO2)

Emission factors from the "Handbook of Emission Factors" (HBEFA) are used to calculate the level of emissions. The emission factors are integrated as an add-on module in the macroscopic simulation software PTV Visum. The procedure used is the same than for energy consumption.

- Change in accident occurrence

Despite a decline in the number of accidents on Germany's roads in recent decades, around 2.6 million accidents still occurred in 2017, resulting in approximately 390,000 injured and over 3,000 killed road users6. Accidents cause macroeconomic costs, e.g. in the health system.

In the course of the issues considered here, a change in the number of accidents results from the changed mileage and the use of more accident-prone road categories (rural roads, inner-city roads) on alternative routes as a result of a (partial) closure of a tunnel. Accidents can be subdivided into accidents involving personal injury and accidents involving damage to property.

In the methodology of the Federal Transport Infrastructure Plan 2030, accident costs are calculated using mileage-related accident cost rates for different road types.

4.4 Results

Figure 6 shows the results of the transport model for scenario 2 (full closure). In particular it shows the difference in traffic volume between the case scenario and the baseline scenario. The graphic thus shows which road stretches have a higher or lower traffic volume in the case scenario compared to the baseline scenario. It is therefore suitable for identifying the stretches that are significantly affected by route shifts. Higher levels of traffic are shown in varying shades of red, while green colouring is used to represent lower levels of traffic volume. The left picture shows these results for the regional level while the right one illustrates the situation on the local level.

Figure 6: Difference in traffic volume between scenario 2 and the baseline scenario at regional and local network level

4.4.1 Journey times and mileage

The bypasses that road users must accept increase both mileage and travel times in many of the scenarios studied. When many local route shifts occur, travel times increase but mileage decreases. In this case, local route shifts result in road users using inner-city routes, for which they need a longer journey time due to the lower maximum permitted speed and waiting times at junctions, but which at the same time are associated with low mileage due to the dense inner-city road network.

4.4.2 Costs from changes in travel and transport times

As a result of the higher journey times, there are higher overall economic costs from travel and transport times.

4.4.3 Changes in operating costs

The operating costs are made up of four components, three of which are directly dependent on the mileage (basic operating costs) or the journey times (provisioning costs and personnel costs in truck transport). The fourth component of energy costs depends on a multitude of influencing factors. Due to these interrelationships, it is not possible to make a general statement of whether higher or lower operating costs will result without detailed calculations. For example when higher journey times but savings in mileage are observed. The calculations show that, in most case scenarios the influence of the higher journey times predominates and leads to an increase in operating costs.

Sometimes lower operating costs result despite higher mileage and travel times. Since the increase in mileage and travel times is only marginal, the three operating cost components directly dependent on these parameters (provisioning costs, basic operating costs and personnel costs in truck traffic) hardly contribute to the total operating cost. Instead, the fourth component of the operating costs - the energy cost component - dominates. In addition to the mileage, the energy costs of each road stretch depend on

- its road class,
- its maximum permissible speed,
- its location (urban or rural), and
- its traffic condition.

Sometimes the mileage hardly changes, however, the maximum permitted speed is lower. This reduces the energy consumption for this section of the route. This effect dominates the result of the energy and thus also the total operating costs here.

In other examples, the effects of increasing mileage and travel times dominate and lead to increased operating costs.

4.4.4 Costs from changes in air pollutant and climate gas emissions

For the costs from air pollutant and climate gas emissions, a similar picture emerges as for the energy costs, since the calculation methods are identical: In some scenarios lower environmental costs arise due to the speed reduction in the tunnel, although slightly higher mileages are to be noted.

However, an opposite situation has also been observed in other scenarios: the environmental costs increase despite a reduction in mileage. This result is due to the fact that in these scenarios, shifts occur in particular on inner-city roads and as a consequence, there is a greater burden on the inner-city transport network. Since emissions increase disproportionately with increasing traffic volume, this effect dominates the result of the environmental costs and cannot be compensated by a reduction in total mileage.

For the other scenarios, the environmental costs increase, which is largely explained by the increase in mileage.

4.4.5 Costs from changes in the accident situation

The costs resulting from changes in the accident situation depend on the number of kilometres travelled and the types of routes on which these kilometres are travelled. In most of the analysed scenarios either mileage is increasing or road users shift to less safer routes. As a result, costs from changes in the accident situation are increasing.

4.4.6 Overall result

Most of the scenarios that have been analysed show a higher overall socio-economic costs than the undisturbed network. An exception is the case of a partial closure of the tunnel where hardly any route shifts are observed, and the reduction of the maximum permitted speed has a positive effect on energy consumption and emissions.

When comparing the scenarios, it is noticeable that the scenarios with the greatest traffic restrictions are also associated with the highest costs.

The total socio-economic costs are between – 3,300 €/day and 920,000 €/day.

5. MEASURES

Resilience measures can help to prevent or mitigate the effects of damage scenarios. In order to effectively increase resilience, 76 different measures were identified in consultation with experts in tunnel planning, tunnel safety and tunnel operation and documented individually in the guideline within the framework of measure fact sheets. They are structured according to the time at which their effects unfold in accordance with the resilience cycle (see figure 7):

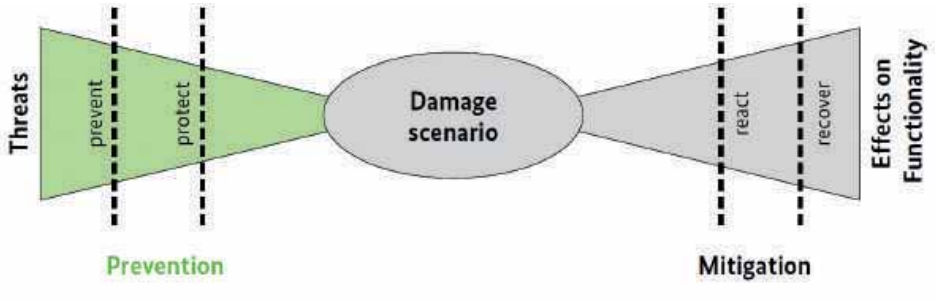


Figure 7: Classification according to prevention and mitigation of damage scenarios

- Preventive measures act before an event to reduce the probability of disruptive events occurring.
- Protective measures are passive measures that are effective after the occurrence of a disruptive event until it is overcome in order to prevent or mitigate certain damage scenarios.
- Reactive measures are active measures that are initiated after the detection of a disruptive event and remain in effect until it is overcome in order to prevent or mitigate certain damage scenarios.
- Recovery measures take effect after a disruptive event has been mastered to enable the fastest possible return to the original functionality.
- Preparatory measures and learning are continuously pursued measures that develop effectiveness across all phases and addresses known and new weaknesses.

For the prioritisation of measures and the targeted selection of these in practice, an assessment methodology for resilience measures was developed. The focus was on making it as simple and user-friendly as possible. The parameters for evaluating resilience measures are clearly shown in Figure 8.

Availability		Interaction				Existing			New		
Prevention	Mitigation	Security - safety	Object-overlapping	Tunnel-overreaching	threat-overlapping	Realizability	Costs	recommended	Realizability	Costs	recommended
●●●	●●●	●●●	Y/N	Y/N	Y/N	●●●	●●●	Y/N	●●●	●●●	Y/N

Figure 8: Evaluation parameters of resilience measures for existing and new tunnels

In principle, the measures were assessed on the basis of their preventive or mitigating effect on damage scenarios (resilience assessment). Resilience measures often have positive effects on personal safety. In some cases, however, negative effects also result, which must be considered when implementing the measures. In addition to the effects on the tunnel itself, the use of resilience measures can also have effects on the surrounding road network and on several tunnel structures at the same time. Furthermore, it is shown whether a measure has an effect specifically on a threat or across threats. The above-mentioned interactions must be taken into account in the course of the cost-effectiveness analysis of the individual measures.

Depending on whether an existing or a new tunnel is considered, the feasibility and costs of a measure are also assessed. Both have to be assessed individually based on the local conditions of a tunnel. Finally, the interaction of the evaluation parameters is assessed on the basis of the specific requirements. The methodology provides support for the selection of suitable measures in order to achieve a targeted and efficient increase in resilience.

6. CONCLUSION

The results of the RITUN research project are intended to help owners and operators to improve the resilience of road tunnels. The identification of potential threats and the damage that can occur, a large number of parameters interact in a complex interplay. It is therefore not possible to make general statements about threats and damage scenarios. Each tunnel must be eva¬luated individually depending on its characteristics, environmental influences and its function in the network.

Furthermore, analyses of two tunnels show, that there is a wide range of socio-economic costs depending on these circumstances and the respective damage scenario. Therefore, it is recommended to assess socio-economic costs of damage scenarios by applying traffic models as they allow to consider characteristics of the tunnel, the scenario, the surrounding network and its traffic demand.

In order to assess the effects of damage scenarios on tunnel operation and to avoid tunnel closure by means of risk-reducing compensation measures while maintaining the required safety level, minimum operating requirements were developed. It is recommended to investigate these minimum operating requirements for damage events in advance in order to be able to maintain reduced availability in case of an incident and keep costs as low as possible. The measures were grouped into Preventive and Mitigative Measures depending on their ef¬fectiveness. For the selection of resilience measures, parameters were formulated that qualitatively assess the effects on availability, synergy effects, feasibility and costs incurred.

REFERENCES

1. https://www.bmvi.de/SharedDocs/EN/Articles/G/federal-transport-infrastructure-plan-2030.html
2. Thoma, K; acatech (Hrsg.). (2014). Resilien-Tech - Resilience-by-Design: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen, (acatech POSITION). München, Germany: Herbert Utz Verlag
3. Joint Project RITUN "Guide for improving the resilience of road tunnels" available at https://www.bast.de/BASt_2017/EN/Structural_Technology/Subjects/B3-RITUN/RITUN.html
4. FGSV, Road and Transport Research Association. (2006). RABT - Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln, Germany: FVSG Verlag.
5. PTV AG et.al (2016): FE-Projekt-Nr.: 97.358/2015 Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030. Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, München. Retrieved from BMDV - Inhalte zum BVWP 2030 herunterladen (bmvi.de)
6. DESTATIS (2018): Retrieved from: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Transport-Verkehr/Verkehrsunfaelle/Verkehrsunfaelle.html

NUEVO TÚNEL VIARIO: SOTERRAMIENTO DE UN TRAMO DE LA AUTOVÍA A-5 EN MADRID

Carlos García Acón
CEO de Esteyco

Mª Dolores Ortiz Sánchez
Directora General de Planificación e Infraestructuras de Movilidad del Ayto de Madrid

Sebastián Guerrero
Director del Área de Estudios de Esteyco

Manuel de Cabo
Director de Producción de Subterra

Por encargo del Ayuntamiento de Madrid, Esteyco y Subterra han redactando el proyecto constructivo del soterramiento de la autovía A-5 en Madrid, entre la entrada de acceso al túnel actual de la Avenida de Portugal, hasta causar la Avenida de los Poblados (dirección Badajoz). El nuevo túnel tendrá una longitud aproximada de 3,5 km, que se deberán añadir a los 43 km que tienen los túneles de Calle 30 en la actualidad (siendo el túnel urbano más largo de Europa).

Actualmente tiene una IMD de unos 80.000 vehículos. La propuesta del túnel es de 3 carriles por sentido, de los cuales uno de ellos será carril Bus/VAO. El túnel, al estar ubicado próximo a la superficie (de 1,5 m a 2 m), será construido con el método Cut and Cover. A lo largo del tramo se han previsto 5 accesos del túnel a la superficie, por los cuales transitarán 2 carriles (1+1) de tráfico local y el transporte colectivo (urbano e interurbano).

Se han previsto 36 salidas de emergencia al exterior directamente y de forma lateral (18 en cada sentido), con un máximo de 200 m entre salidas.

Como medidas de seguridad adicionales para los servicios de emergencia, se han previsto dos apartaderos de 100 m de longitud en el punto medio del túnel, que se situarán uno a cada lado. Además, se han previsto comunicaciones entre los tubos para vehículos de emergencia cada 1.000 m aproximadamente y comunicaciones a pie cada 250 m.

Se ha considerado una ventilación transversal a lo largo del nuevo túnel. Se insuflará aire fresco mediante unas cámaras laterales.

Se han proyectado 3 estaciones de ventilación, donde se albergarán las instalaciones de ventilación de filtrado del aire viciado y las salas técnicas. Todas las instalaciones del nuevo túnel serán continuación de las existentes de Calle 30.

NEW ROAD TUNNEL: UNDERGROUNDING OF A SECTION OF THE A-5 MOTORWAY IN MADRID

On request of the Madrid City Council, Esteyco and Subterra are drafting the construction project for the burying of the A-5 motorway in Madrid, between the entrance to the current tunnel of "Avenida de Portugal", until the "Avenida de los Poblados" (direction towards Badajoz). The new tunnel will have an approximate length of 3.5 km, that will be added to the 43 km that the "Calle 30" tunnels currently have (being the longest urban tunnel in Europe).

It currently has an IMD of about 80.000 vehicles. The proposed tunnel counts with 3 lanes in each direction, of which one of them will be bus/VAO lane. The tunnel, being located close to the surface (from 1,5 m to 2 m), will be built with the Cut and Cover method. Along the stretch, 5 accesses to the surface from the tunnel have been planned, through which 2 lanes (1 + 1) of local traffic and collective transport (urban and interurban) will travel.

Moreover, 36 emergency exits have been planned to the outside directly and laterally (18 in each direction), with a maximum of 200 m between exits.

As additional security measures for the emergency services, two 100 m long sidings have been planned at the midpoint of the tunnel, that will be located one on each side of the tunnel. In addition, communications between the tubes for emergency vehicles are planned approximately every 1.000 m and foot communications every 250 m.

NOUVEAU TUNNEL ROUTIER : MISE EN SOUTERRAIN D'UN TRONÇON DE L'AUTOROUTE A-5 À MADRID

Pour le compte de la Mairie de Madrid, Esteyco et Subterra ont rédigé le projet de construction pour l'enfouissement de l'autoroute A-5 à Madrid entre l'entrée d'accès au tunnel actuel sur l'Avenida de Portugal, jusqu'à l'Avenida de los Poblados (direction Badajoz). Le nouveau tunnel aura une longueur d'environ 3,5 km, qui s'ajoutera aux 43 km que possèdent actuellement les tunnels de la Calle 30 (étant le plus long tunnel urbain d'Europe).

Il dispose actuellement d'une intensité moyenne journalière d'environ 80 000 véhicules. La proposition de tunnel est de 3 voies dans chaque direction, dont l'une sera une voie Bus/VMO. Le tunnel, étant situé près de la surface (de 1,5 m à 2 m), sera construit selon la méthode Cut and Cover. Le long du tronçon, 5 tunnels d'accès à la surface sont prévus, par lesquels transiteront 2 voies (1+1) de circulation locale et de transport collectif (urbain et interurbain).

Il est prévu un total de 36 issues de secours vers l'extérieur directement et latéralement (18 dans chaque sens), avec un maximum de 200 m entre les issues.

Comme mesures de sécurité supplémentaires pour les services de secours, deux voies de service de 100 m de long ont été prévues au milieu du tunnel, une de chaque côté. De plus, des communications entre les tubes pour les véhicules de secours sont prévues tous les 1 000 m environ et des communications à pied tous les 250 m.

Une ventilation transversale a été envisagée le long du nouveau tunnel. L'air frais sera soufflé à travers les chambres latérales.

3 stations de ventilation sont prévues, où seront logées les installations de ventilation filtrant l'air vicié et les locaux techniques. Toutes les installations du nouveau tunnel seront une continuation de celles existantes sur la Calle 30.

1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de redacción incluye el Soterramiento de la Autovía A5 en Madrid entre el actual acceso al túnel existente de la Avenida de Portugal hasta superar la Avenida de Los Poblados (dirección Badajoz).

El nuevo túnel tendrá una longitud aproximada de 3,4 km, que deberá coexistir y funcionar de manera coordinada con los 43 km que tienen los túneles de Calle 30 en la actualidad.

Las instalaciones y equipamientos de seguridad se han diseñado teniendo en cuenta el Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, las Especificaciones Técnicas de Bomberos y Calle 30 de 2020, y las directrices internacionales teles como CETU (Centre D'estudes des Tunnels) y la PIARC.

El proyecto incluirá todas las instalaciones y equipamiento de seguridad necesarios para el buen funcionamiento de éste en régimen de explotación. Se ha diseñado un sistema de ventilación transversal con tres estaciones soterradas de extracción e impulsión.

El túnel contará con aceras transitables para peatones para que los usuarios del túnel las empleen en caso de avería. La anchura del espacio es de 0,75 m y el gálibo mínimo vertical sobre la acera es de al menos 2,50 m.

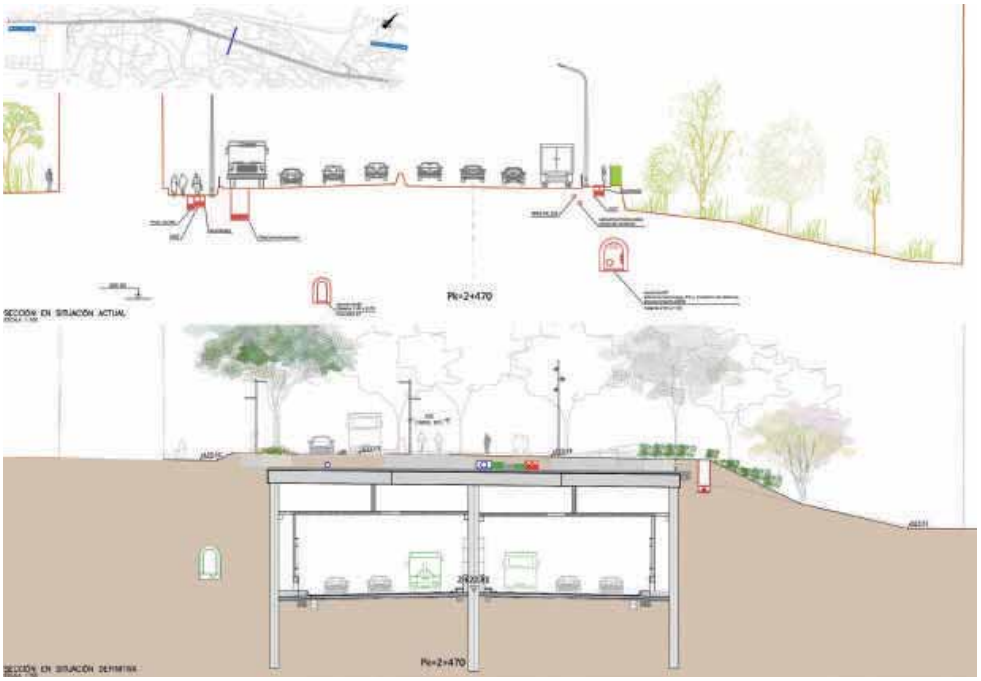


Ilustración 1 – Situación actual de la A-5 (arriba) y situación futura del túnel (abajo)

Las instalaciones y equipamientos principales son los siguientes:

- Aceras
- Salidas de emergencia
- Conexiones entre tubos para vehículos de emergencia
- Conexiones entre tubos para personal de emergencia
- Barreras exteriores
- Cruces de la mediana fuera de cada boca

- Apartaderos
- Extintores
- Circuito cerrado de TV
- Sistema informático de extracción de humos, automático y manual
- Iluminación normal, de seguridad y de emergencia
- Ventilación
- Suministro eléctrico
- Generadores de emergencia
- Sistema de alimentación ininterrumpida (SAI)
- Detectores de monóxido de carbono
- Opacímetros
- Cables para detección de incendios
- Detección automática de incidentes
- Puestos de emergencia
- Estaciones de emergencia
- Señalización del túnel, y de las salidas y equipamientos de emergencia
- Paneles de señalización variable
- Semáforos exteriores e interiores
- Megafonía
- Red de hidrantes
- Aforadores
- Sistema de radiocomunicación para servicios de emergencia
- Mensajería de emergencia por canales de radio para usuarios
- Sistema de control de gálibo
- Termoactivación

Con esto se consigue un descenso de emisiones de CO2 que se situaría en un 5,2 % respecto a las actuales en hora punta de mañana y en un día laborable, y de hasta un 50% para las emisiones NOx.

Dada la alta IMD del túnel, se propone dejar en superficie un carril en cada sentido (1+1) para transporte público urbano y vial de servicio para la accesibilidad de los barrios adyacentes (máximo 10.000 IMD), el resto (80.000 IMD) pasarían por el túnel (total: 3+3 carriles). También hemos considerado necesario implantar un carril BUS / VAO en el túnel en cada sentido (2+1 en cada sentido).

Sin duda, gracias al túnel, habrá una mejora significativa y de la gestión del tráfico en ese ámbito de Madrid.

El carril BUS / VAO estará señalizado con balizas luminosas (verde / rojo) para una mejor gestión de su utilización en horas punta , mañana y tarde , así como señalizar también los tramos en el túnel de embarques y desembarques del propio carril BUS / VAO.

2. OBJETIVOS

Se plantea una actuación desde diversos objetivos, incluyendo la mejora de la calidad del aire como vector principal, y transformando consecuentemente la ciudad y la movilidad en este ámbito.

Los objetivos definidos en Madrid 360 y la respuesta que debe dar el proyecto son los siguientes:

1. Transformar la ciudad - respuesta: extensión Madrid Río; objetivo de permeabilizar, secuenciar y activar el nuevo Paseo de Extremadura, mejorando la calidad del aire y disminuyendo los ruidos.
2. Transformar la movilidad – respuesta: soterrar las A5; objetivo, mejorar las condiciones de tráfico de entrada a Madrid, resolviendo la conectividad transversal y apostando por una movilidad "blanda" (peatones y bicicletas"), mejorando la accesibilidad general.
3. Transformar la administración – respuesta: sistema de gestión inteligente; objetivo, el proyecto debe permitir un sistema de gestión inteligente, dejando la infraestructura necesaria preparada (ITS, balizamiento luminoso en calzada, paneles, cartelería fija).

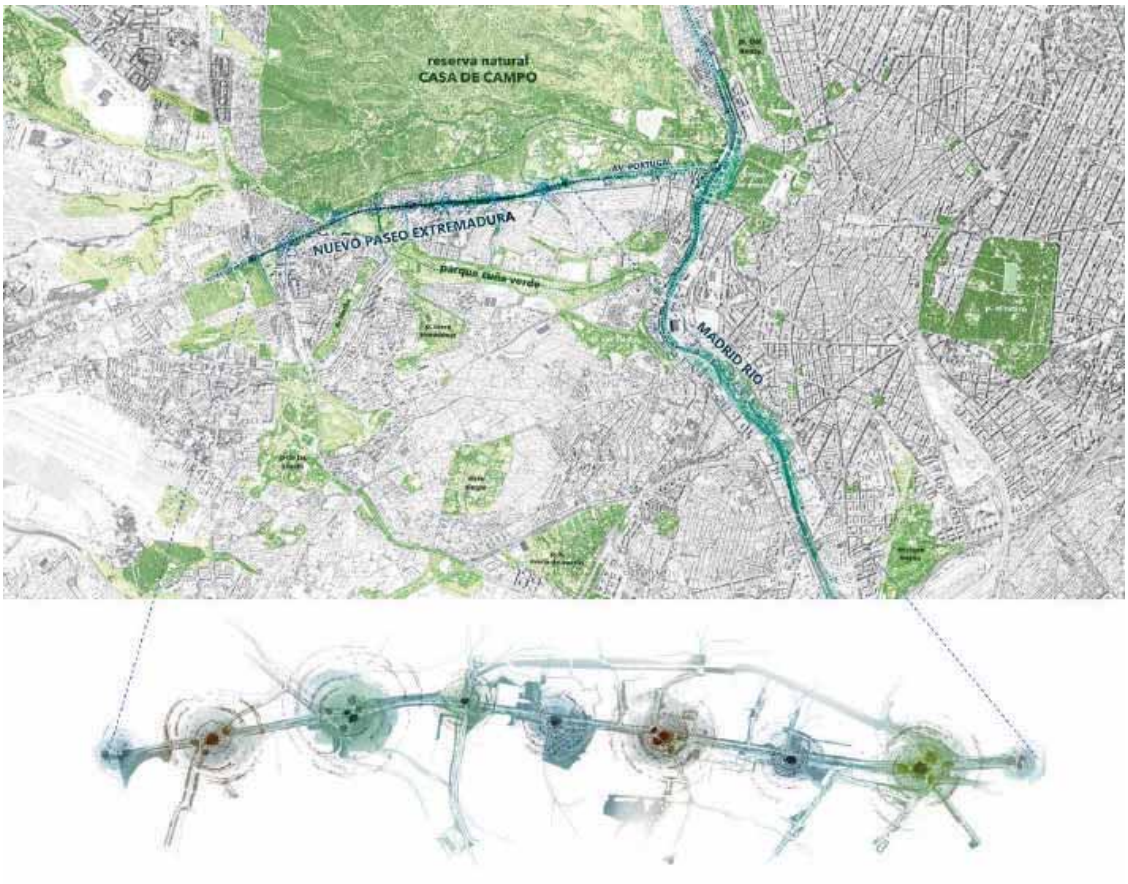


Ilustración 2 - Emplazamiento privilegiado del proyecto en el Distrito de Latina, rodeado de zonas verdes, con la Casa de Campo al norte y la cuña verde al sur y Madrid río al este

Esta estrategia alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de Naciones Unidas

3. CRITERIOS DE DISEÑO: DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA CIUDAD

1. Potenciar la movilidad "blanda" – posibilidad de 3,4 km de nuevo paseo peatonal continuo y carril bici: objetivo Madrid saludable
2. Mejorar la permeabilidad en superficie – multiplicar los ejes transversales a nivel para peatones: objetivo Madrid accesible
3. Nuevas polaridades: multiplicar usos, programas y sinergias entre paseo y equipamientos existentes: objetivo Madrid eficiente
4. Multiplicar el verde y la biodiversidad + zona de bajas emisiones: objetivo Madrid sostenible
5. Nuevo foco de atracción de la ciudad- continuidad de Madrid Río y nueva puerta a la Casa de Campo: objetivo Madrid global
6. Explotar al máximo la complejidad de sus sistemas. (soterramiento + BUS V.A.O. + transporte público + sistemas de control inteligente): objetivo Madrid inteligente

Ilustración 3 – Urbanización en superficie del túnel

4. CRITERIOS DE DISEÑO: DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA INFRAESTRUCTURA

1. Eficiencia:

- Subir la rasante del túnel como criterio general (respecto a los estudios previos) para minimizar inversión, tratando de ajustar al máximo el soterramiento a la superficie, eliminando sobrecostes innecesarios y asegurando una cobertura de tierras del orden de 1,5m que garantice nuevas plantaciones de calidad.
- Revisar y optimizar los puntos de conexión del tronco con la superficie: no tiene sentido hacer la inversión de un túnel de esta envergadura y tratar de reproducir todos los movimientos actuales.

2. Económicos:

- Mínima a afección a los condicionantes físicos (metro, colectores, viviendas, subestación, …) para asegurar viabilidad económica y plazos y, en caso de afectarlos, reposición manteniendo los mismos niveles de servicio.
- Respetar el planeamiento vigente, minimizando las expropiaciones a las estrictamente necesarias para el proyecto.

3. Sostenibilidad:

- Soluciones estructurales que garanticen la ejecución por fases garantizando los niveles de servicio establecidos, que minimicen los costes de mantenimiento futuro, la huella de CO_2 y la generación de residuos.
- Solución a la ventilación que garantice la máxima mejora de calidad del aire, minimizando la repercusión en planta y alzado de la subestructura dados lo restringido del corredor disponible
- Circularidad: compensación y aprovechamiento máximo de tierras procedentes de la excavación y materiales procedentes de la deconstrucción de las estructuras actuales.

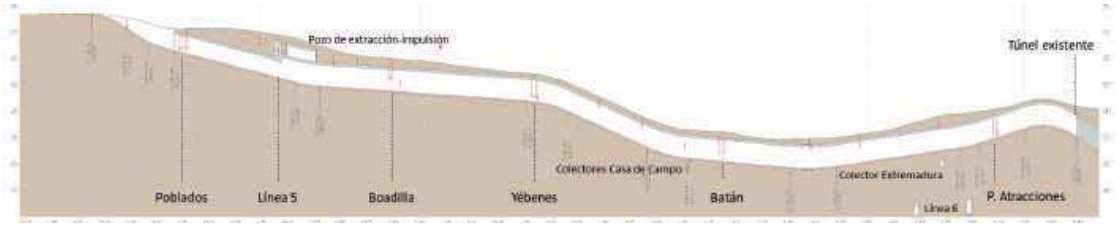


Ilustración 4 – Perfil longitudinal del túnel

5. MOVILIDAD

Se han analizado diversas alternativas para las posibles conexiones del tronco del túnel con los viales en superficie, además de la posición de la boca oeste del nuevo túnel. Después de estudiar más de una decena de variantes para cada enlace, la solución propuesta parte de las siguientes consideraciones:

- Se puede dividir el tramo en dos nodos que funcionan de manera prácticamente independiente: el nodo Batán-Lucero, que abarca desde el enlace Parque de Atracciones-Paseo de Extremadura hasta el enlace de la calle Yébenes con la Casa de Campo; y el nodo Boadilla-Poblados que relaciona Campamento y Aluche y la carretera de Boadilla.
- Si además de las conexiones con el tronco se considera la red local actual, se pueden garantizar todos los movimientos concentrando algunos ramales de conexión con el túnel en Parque de Atracciones, Yébenes, Boadilla y Poblados.

Nodo Poblados / Boadilla

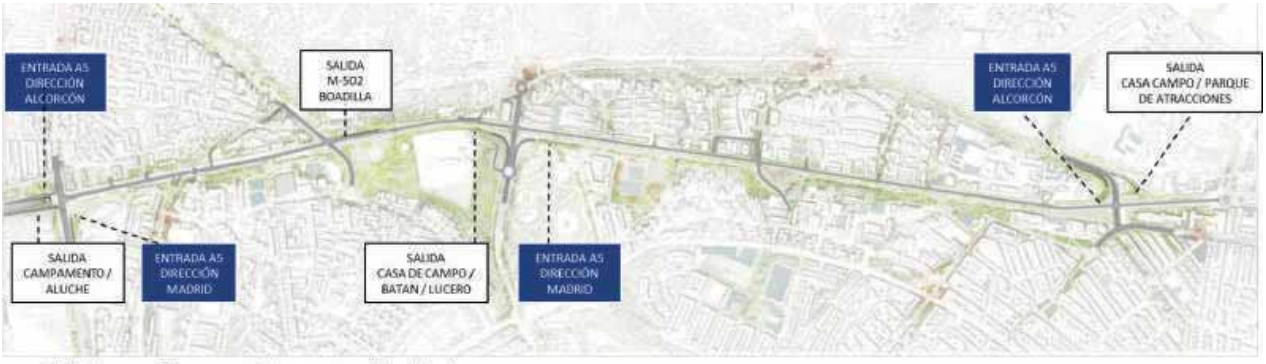
1. Salida Madrid – Boadilla / Campamento / Aluche
2. Incorporación Boadilla / Campamento / Aluche – Madrid
3. Boca del túnel: salida Boadilla / Campamento / Aluche – Alcorcón; incorporación Alcorcón – Boadilla / Campamento / Aluche

Nodo Batán / Lucero

1. Salida Madrid – C. Campo / Batán / Lucero (existente)
2. Incorporación C. Campo / Batán / Lucero – Alcorcón
3. Incorporación C. Campo / Batán / Lucero – Madrid
4. Salida Alcorcón – C. Campo / Batán / Lucero

6. VIALIDAD EN SUPERFICIE Y CONECTIVIDAD CON EL TÚNEL

Con este esquema de movilidad, se han integrado todos los movimientos e incorporaciones descritos con la nueva vialidad en superficie, resultando un esquema de vialidad sencillo, con una vía "parque" longitudinal con un carril por sentido en todo el ámbito, 6 nuevos ejes en superficie reproduciendo los actuales enlaces más una conexión en Av. Padre Piquer, y, en definitiva, una trama mucho más urbana y acorde a los objetivos del proyecto.



Vialidad en superficie y propuesta de accesos y salidas al túnel

Ilustración 5 - Vialidad en superficie y propuesta de accesos al túnel

7. TRANSPORTE COLECTIVO, BUS URBANO

Se ha considerado que se mantiene la oferta actual de líneas urbanas y con su mismo itinerario adaptado, según la necesidad, a la nueva configuración de los enlaces.

Las paradas de la Vía Parque se han considerado siempre en carril (baja IMD) y en carril bus cuando hay dos carriles en superficie (tramo Padre Piquer-metro Campamento).

Ilustración 6 - Posición de paradas actual

Ilustración 7 – Esquema posición final

8. BUS / VAO

La solución propuesta, en las condiciones óptimas de funcionalidad y operatividad, es similar a la proyectada en la Autovía A-2 (Madrid-Centro/ Alcalá/ Torrejón).

En el nuevo túnel, el carril BUS/VAO se instalaría en el carril izquierdo de cada sentido de la circulación (1 carril BUS/VAO +2 carriles).

Esta disposición supondría una mayor operatividad del túnel, con una utilización como carril 'normal' fuera de las franjas horarias "punta" (07:00-09:00; tarde 18:00-20:00).

Se realizará una gestión inteligente del túnel, ITS, balizamiento luminoso en calzada, paneles, cartelería fija.

Esta disposición de BUS/VAO, también permite la posibilidad de 'embarques' intermedios en ambas direcciones.

Ilustración 8 – Posición del carril BUS / VAO en el túnel

9. EJECUCIÓN – ORGANIZACIÓN DE LA OBRA DEL TÚNEL

Para la realización de las obras y un funcionamiento razonable del tráfico, se han considerado cuatro grandes fases de desvíos y obra que se complementarán con fases adicionales, en función de tramos de obras más singulares y relevantes por su complejidad, como son el paso del túnel bajo la Línea 5 del Metro y el tramo de conexión con el túnel existente de la Av. de Portugal.

El túnel, prácticamente en su totalidad -salvo en el ámbito de los cinco enlaces actuales-, se ha previsto ejecutarlo por el método "cut and cover" debido a su cercanía a la superficie. El túnel está compuesto de dos celdas, con tres alineaciones de pilotes y una losa superior de espesor constante de 1m, postesada. Con esta composición del túnel, se han previsto las siguientes fases de ejecución:

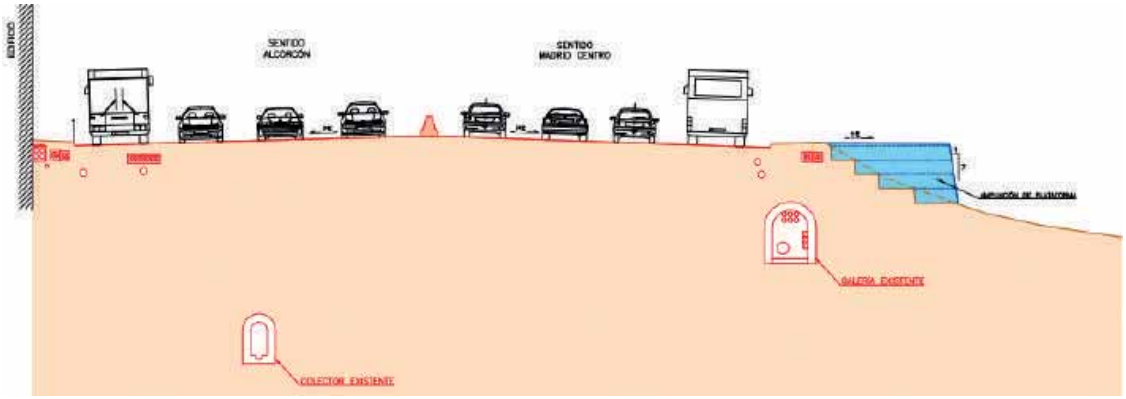


Ilustración 9 - Fase 0. Preparación de los desvíos de la Fase 1

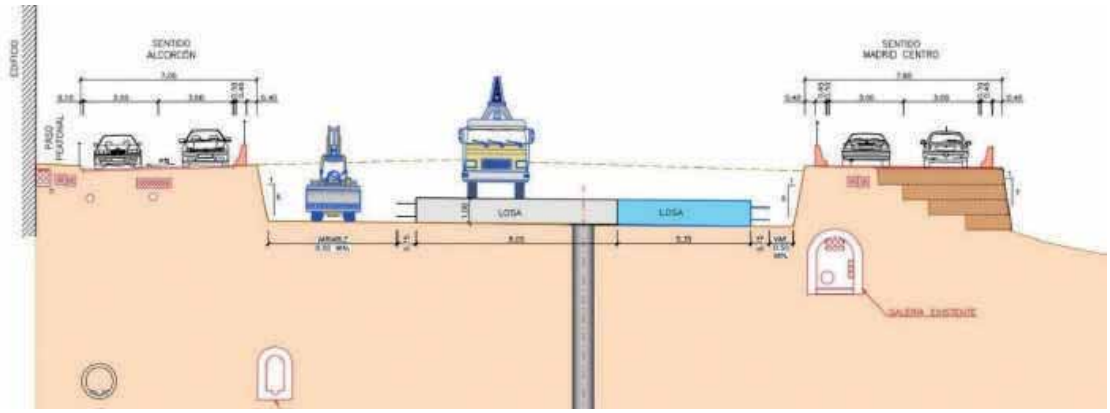


Ilustración 10 - Fase 1. Ejecución de pilotes y losa central

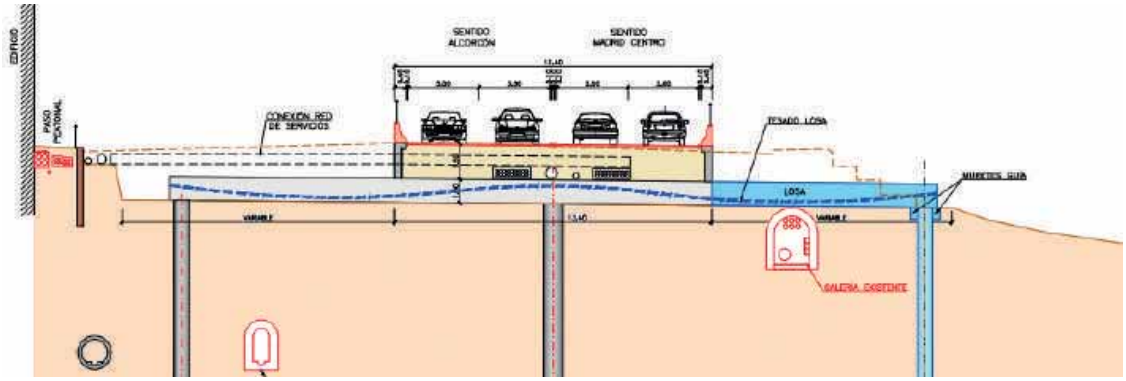


Ilustración 11 - Fase 2. Ejecución de pantallas de pilotes y losas laterales

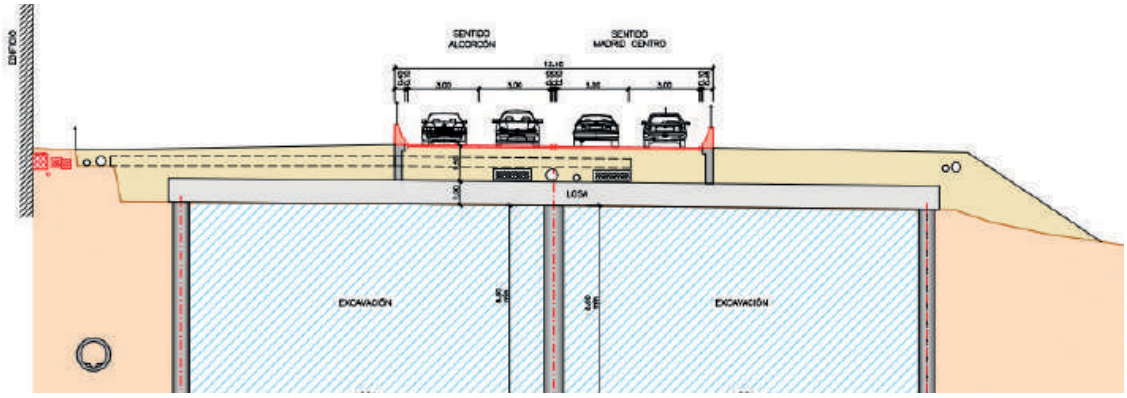


Ilustración 12 - Fase 3. Excavación e instalaciones del túnel y urbanización en superficie

10. AFECCIONES Y RIESGOS DURANTE LA EJECUCIÓN DEL TÚNEL

Todo proceso de excavación implica una alteración en el estado tensional del terreno, lo cual está asociado a la generación de un campo de deformaciones en el entorno de una obra subterránea. Estas deformaciones, que se manifiestan en superficie originadas por la alteración del equilibrio tensional del terreno y no por sobrecargas, constituyen el fenómeno conocido como subsidencia.

En el Proyecto se ha llevado a cabo una estimación y análisis de los efectos que estos movimientos pudieran tener sobre la integridad de las edificaciones ubicadas en el entorno de la traza, definición de las medidas de mitigación y de los procedimientos para su auscultación.

Cabe resaltar que el proceso constructivo planteado para el túnel diseñado minimiza las deformaciones en el terreno, ya que las excavaciones del interior del túnel se llevarán a cabo siempre con la losa de cubierta ya construida. Las pantallas laterales estarán por lo tanto acodaladas y empotradas en su coronación, minimizando por lo tanto las deformaciones en el terreno adyacente y por ende las asociadas subsidencias.

Con todo, ninguno de los edificios estudiados ha dado resultados que impliquen tener que pasar a la etapa 3 (análisis del riesgo de afecciones en aquellos edificios clasificados como no aptos), debido fundamentalmente al proceso constructivo diseñado con excavación interior del túnel al abrigo de la estructura completamente construida.

El Proyecto incluye un Plan de Monitoreo, que tiene como objeto el seguimiento que permite garantizar la ejecución de las obras con seguridad y sin perjuicio a terceros, y un Plan de Contingencia, para el caso de que durante las obras se llegaran a detectar mediante el seguimiento de las instrumentaciones instaladas unos asientos / deformaciones excesivos y no previstos.

La obra no conllevará riesgos hidrogeológicos, ni problemas de inundaciones en el túnel.

- El nivel freático no se ha detectado en la campaña geotécnica a las cotas por las que transcurre la obra.
- El sistema de drenaje del túnel evita acumulaciones de agua de lluvia.
- Los revestimientos de las pantallas de pilotes y la losa de fondo minimizarán cualquier riesgo de infiltraciones al túnel (a pesar de que tampoco se esperan).

11. VISUALIZACIONES EN LA SUPERFICIE DEL TÚNEL URBANIZADA

Ilustración 13 - Vista "eye level" entorno Batán actual (arriba) y después de la actuación en superficie (abajo)

Ilustración 14 - Vista "eye level" entorno Lourdes actual (arriba) y después de la actuación en superficie (abajo)

VALORACIÓN OBJETIVA DE LA RESILIENCIA EN TÚNELES DE CARRETERA

David Zamora Martínez
CEO Tecasem

Esta comunicación pretende exponer y concretar procedimientos, que permitan de una parte definir con claridad el término resiliencia aplicado a las infraestructuras, en nuestro caso los túneles, y de otra los procedimientos para poder valorar de forma objetiva la resiliencia, detectando, definiendo y cuantificando los indicadores más significativos para su determinación.

Con frecuencia se ha asociado como principal riesgo para el mantenimiento de la actividad de los túneles los incendios, y, aunque también, existen otros riesgos que pueden impedir la explotación segura de la infraestructura, en ocasiones riesgos sobrevenidos y más frecuentes en los últimos tiempos, como pueden ser los ciberataques.

Cuando se produce una circunstancia que interrumpe la situación de funcionamiento normal del túnel, y que afecta de forma directa a la seguridad de los usuarios, trabajadores asignados a la explotación, e incluso a la integridad de la propia infraestructura, la restitución del servicio con prontitud, su capacidad de respuesta, suele estar vinculada también a su entorno, desde la importancia del servicio que presta, vías consideradas como críticas, a la existencia de vías alternativas capaces de convertirse en alternativa, y por supuesto a la organización de los servicios de respuesta y su formación y entrenamiento.

Una parte de la comunicación la dedicaremos a los aspectos mencionados en último término, por considerar que la formación de los responsables de la explotación, su organización y entrenamiento, deben ser valorados en su justa medida, contrastados y acreditados con la ejecución de simulacros, que constituyen un valor sustancial para valorar la resiliencia del túnel.

OBJECTIVE ASSESSMENT OF RESILIENCE IN ROAD TUNNELS

The aim of this communication is to set out and specify procedures which allow, on the one hand, a clear definition of the term resilience applied to infrastructures, in our case tunnels, and on the other hand, the procedures to be able to objectively assess resilience, detecting, defining and quantifying the most significant indicators for its determination.

Fire has often been associated as the main risk to the continued operation of tunnels, but there are also other risks which may prevent the safe operation of the infrastructure, sometimes emerging risks which have become more frequent in recent times, such as cyber-attacks.

When a circumstance occurs which interrupts the normal operating situation of the tunnel, and which directly affects the safety of users, workers assigned to the operation, and even the integrity of the infrastructure itself, the prompt resumption of service, its response capacity, is usually also linked to its environment, from the importance of the service it provides, roads considered as critical, to the existence of alternative roads capable of becoming alternative, and of course to the organisation of the response services and their education and training.

Part of the communication will be devoted to the aspects mentioned last, as we consider that the training of those responsible for the operation, its organisation and training, must be assessed in the right measure, contrasted and accredited with the execution of simulations, which constitute a substantial value for assessing the resilience of the tunnel.

ÉVALUATION OBJECTIVE DE LA RÉSILIENCE DES TUNNELS ROUTIERS

L'objectif de cette communication est d'exposer et de spécifier les procédures qui, d'une part, permettent de définir clairement le terme de résilience appliqué aux infrastructures, dans notre cas les tunnels, et d'autre part, les procédures pour évaluer objectivement la résilience, en détectant, définissant et quantifiant les indicateurs les plus significatifs pour sa détermination.

L'incendie a souvent été associé au principal risque pour le maintien de l'exploitation des tunnels, mais il existe également d'autres risques qui peuvent empêcher l'exploitation sûre de l'infrastructure, parfois des risques émergents qui sont devenus plus fréquents ces derniers temps, comme les cyber-attaques.

Lorsque se produit une circonstance qui interrompt la situation normale d'exploitation du tunnel, et qui affecte directement la sécurité des usagers, des travailleurs affectés à l'exploitation, voire l'intégrité de l'infrastructure elle-même, la reprise rapide du service, sa capacité de réponse, est généralement liée aussi à son environnement, depuis l'importance du service qu'elle fournit, les routes considérées comme critiques, jusqu'à l'existence de routes alternatives capables de devenir alternatives, et bien sûr à l'organisation des services d'intervention et à leur formation.

Une partie de la communication sera consacrée aux aspects mentionnés en dernier lieu, car nous considérons que la formation des responsables de l'exploitation, son organisation et son entraînement, doivent être évalués à leur juste mesure, contrastés et accrédités avec l'exécution de simulations, qui constituent une valeur substantielle pour évaluer la résilience du tunnel.

La presente comunicación surge a raíz de los trabajos en proyectos, participación en Comités Técnicos y comunicaciones en jornadas y congresos, en los que el firmante de la comunicación participa, como CEO de TECASEM.

Cabe destacar el trabajo realizado para Ferrovial, en el marco del Proyecto Europeo FORESEE, en relación con los efectos de un ciberataque en una infraestructura del transporte, centrado en el caso de los Túneles de Madrid Calle 30, desde el punto de vista de la resiliencia.

PROCEDIMIENTOS

Esta comunicación pretende exponer y concretar procedimientos, que permitan de una parte definir con claridad el término resiliencia aplicado a las infraestructuras, en nuestro caso los túneles, y de otra los procedimientos para poder valorar de forma objetiva la resiliencia, detectando, definiendo y cuantificando los indicadores más significativos para su determinación.

Las interrupciones del servicio en las infraestructuras provocan retrasos, atascos y tienen un impacto socioeconómico muy relevante ya que afecta a los desplazamientos diarios de un porcentaje importante de los usuarios, tanto en ciudad, como en desplazamientos interurbanos.

Con frecuencia se ha asociado como principal riesgo para el mantenimiento de la actividad de los túneles los incendios, y, aunque también, existen otros riesgos que pueden impedir la explotación segura de la infraestructura, en ocasiones riesgos sobrevenidos y más frecuentes en los últimos tiempos, como pueden ser los ciberataques.

Con el fin de situar en su justa medida la resiliencia conviene indicar que es más que simplemente prevenir que ocurra un desastre; la resiliencia implica cómo un sistema planifica y se prepara para resistir y absorber, recuperarse y adaptarse a las interrupciones y los peligros (Linkov, Trump e Hynes 2019).

Cabe estimar la importancia que la resiliencia tiene sobre el carácter reputacional de la infraestructura como tal, ya que podría tras un evento pasar a no responder a las expectativas del servicio esperado, y en consecuencia perder una parte importante de su utilidad.

Cuando se produce una circunstancia que interrumpe la situación de funcionamiento normal del túnel, y que afecta de forma directa a la seguridad de los usuarios, trabajadores asignados a la explotación, e incluso a la integridad de la propia infraestructura, la restitución del servicio con prontitud, su capacidad de respuesta, suele estar vinculada también a su entorno, desde la importancia del servicio que presta, vías consideradas como críticas, a la existencia de vías alternativas capaces de convertirse en alternativa, y por supuesto a la organización de los servicios de respuesta y su formación y entrenamiento.

Los aspectos mencionados en último término merecen una especial valoración, por considerar que la formación de los responsables de la explotación, su organización y entrenamiento, deben ser valorados en su justa medida, contrastados y acreditados con la ejecución de simulacros, que constituyen un valor sustancial para acreditar la resiliencia del túnel.

DESCRIPCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA

Las infraestructuras de transporte están expuestas a una variedad de amenazas antropogénicas, tanto accidentales (como una explosión involuntaria) como intencionales, provocadas por el hombre (como ataques terroristas). Estas tendencias, junto con la creciente demanda de transporte y las cargas de tráfico cada vez mayores, ejercerán una mayor presión sobre la infraestructura europea y mundial.

Por lo tanto, está claro que se deben tomar acciones para hacer que las infraestructuras sean más resilientes, minimizando las interrupciones, así como los daños y los costos, en resumen, manteniendo en las mejores condiciones el nivel de servicio.

Entre los componentes de la infraestructura de transporte, los túneles representan quizás los sistemas activos más intensivos, que requieren mecanismos de control de tráfico, sistemas electromecánicos, iluminación, ventilación y muchos otros sistemas de seguridad asociados para garantizar su funcionalidad en las condiciones que garanticen la seguridad de los usuarios. Todos estos sistemas están interconectados y gestionados desde un centro de control de red.

Según diferentes estudios, la mayoría de los accidentes en infraestructuras se deben a derrumbes y catástrofes originados en la fase de operación y mantenimiento, por lo que tiene sentido trabajar y ahondar en estas últimas fases del ciclo de vida de la estructura para reducir el impacto económico, social y medioambiental, sin olvidar que los estudios previos, el proyecto y la ejecución de la obra serán determinantes para el resultado final.

El principio básico para garantizar la seguridad de un túnel, es un enfoque integral que describa un modelo mediante el que, en base al ciclo de vida, se establezca y mantenga el nivel previsto de seguridad para su explotación.

No obstante, en esa visión integral, es preciso introducir la interacción que significan aspectos como la propia infraestructura, el equipamiento, el comportamiento de los usuarios del túnel, la idoneidad en la fórmula de explotación, y lo procedimientos y capacidad de la respuesta ante las emergencias.

El sistema de control de la seguridad de un túnel, fija el seguimiento en una serie de instalaciones, equipos y elementos, sin cuya disposición, no se puede garantizar el nivel mínimo de seguridad para mantenerse en servicio. Éstos son los elementos o sistemas críticos.

Los centros de control se encargan de gestionar las operaciones mediante el uso de sistemas de transporte inteligente (ITS), u otros sistemas de gestión. Reciben la información, y tras su valoración, responden con los procedimientos previamente establecidos, especialmente en todo lo que concierne a esos sistemas críticos.

DEFINICIÓN DE ELEMENTO/SISTEMA CRÍTICO:

El sistema de control de la seguridad de un túnel, fija el seguimiento en una serie de instalaciones, equipos y elementos, sin cuya disposición, no se puede garantizar el nivel mínimo de seguridad para mantenerse en servicio. Éstos son los elementos o sistemas críticos.

Pasamos a detallar por orden los sistemas que consideramos críticos:

- Sistema de cierre del túnel
- Suministro de energía externo e interno.
- Sistema de Ventilación.
- Equipamiento y control de incendios. Sistema de agua nebulizada
- Sistema de iluminación.
- Sistema de señalización.
- Sistema de Videovigilancia. D.A.I.
- Sistema de comunicación de Postes SOS/Megafonía.
- Sistemas de análisis y control de factores medioambientales.
- Sistemas de gestión de evacuación.
- Equipos de comunicaciones.

Cada uno de los sistemas invalidados o afectados por incidencias que degraden su funcionamiento, exigirán una respuesta por parte del Centro de Control, y la situación de servicio degradado que genera el fallo simultáneo, debe desencadenar la sistemática de respuesta y toma de decisiones en pro de la seguridad.

Cómo valorar y cuantificar la resiliencia en relación con el funcionamiento de los sistemas críticos, y en consecuencia la capacidad de recuperación del servicio a sus niveles aceptables de seguridad, así como los costes que en general generan estos incidentes, se deben tener en cuenta si queremos definir la capacidad de resiliencia de una infraestructura, en nuestro caso los túneles.

El control permanente de los equipos e instalaciones del túnel, gestión del tráfico, supervisión del mantenimiento, y la gestión de la emergencia, está encomendado por normativa al Centro de Control/Operaciones.

Para ello este CCO., recibe información permanente de los elementos ITS que gestionan y controlan equipos e instalaciones.

Todos los elementos críticos tienen su reflejo en los sistemas de control y gestión, contando con

alarmas, taradas con los valores admisibles establecidos por norma como de servicio correcto, y que habilitan la respuesta objetiva del operador del CCO.

El CCO., por tanto, es el punto donde confluye toda la información, y desde dónde se coordina la respuesta inmediata.

Cada uno de los sistemas y subsistemas de control, tienen asociado un equipo de supervisión, y un indicador que valora de forma unitaria el funcionamiento, su aportación al conjunto de la seguridad, y el nivel aceptable de funcionamiento en caso de servicio degradado.

El nivel de servicio generalmente está normalizado, bien por la propia normativa aplicable de túneles, o por el propio sistema de calidad de la explotación, generalmente referida a su contrato de servicio.

Como ya indicamos con anterioridad la "organización de la explotación" en su vertiente tanto humana como técnica, adquiere una relevancia, en ocasiones determinantes, para garantizar el éxito de las intervenciones.

Como en las presentes jornadas tendremos la oportunidad de conocer importantes experiencias desde el punto de vista operativo, "la importancia de la resiliencia en el equipo humano" de Juan Torres García de Emesa, en el presente documento nos limitaremos a indicar que aspectos se deben valorar en este apartado, a los efectos de un conocimiento global de la resiliencia de la infraestructura en su fase de explotación.

MEDIDA DE LA RESILIENCIA

Cuando tratamos la medida de la resiliencia de una infraestructura, no solo debemos tener en cuenta la probabilidad y las posibles consecuencias de los eventos disruptivos, sino también las diferentes formas en que se restablece el servicio, ya sea temporalmente a través de rutas alternativas o con restricciones durante las intervenciones.

Para ello debemos crear las herramientas precisas, que nos permitan realizar las medidas de los distintos escenarios posibles, y especialmente en lo que se refiere a las simulaciones de tráfico para medir y comparar el servicio prestado con y sin eventos e intervenciones. Se requiere el uso de simulaciones de tráfico para obtener buenas estimaciones del servicio prestado y la resistencia de los sistemas de transporte.

El planteamiento inicial debe ser elegir los distintos parámetros que utilizamos para definir nuestro nivel de servicio, generalmente detallados en el Plan de Calidad, elementos que con mayor o menor facilidad podemos determinar cuantitativamente.

Para medir el servicio podemos tomar distintos indicadores, tales como el coste anual de mantenimiento, número de personas que viajan por día, mercancías que viajan por día, coste del tiempo libre y socioeconómico por persona y otros.

De otra parte, debemos implementar datos y variables que dependen del resultado del evento, como el coste de intervención tras el evento, días para recuperar el servicio normal, y el resultado sobre las personas y la propiedad.

Indicaremos su valor en condiciones normales, y el tiempo o su valor para recuperar su situación inicial en condiciones de pérdida del servicio o de servicio degradado.

Debe incluirse la descripción del alcance, las variables y los requisitos de gestión de datos necesarios para evaluar la resiliencia en los modelos de transporte cuando algunas variables de entrada sean cuestionables.

Hemos considerado que sería conveniente relacionar estos factores con la existencia de un plan de calidad que ayude al seguimiento permanente de los indicadores establecidos.

Tiene especial relevancia el análisis de los indicadores relacionados con la organización de la gestión de la explotación, con indicadores que se definen previos al evento, destacando la estrategia y existencia de un plan de mantenimiento, así como de otros relacionados con las actividades a realizar en presencia del evento y posteriores, en los que se indica la existencia y prácticas del plan de emergencias, así como las previsiones para la restitución en tiempo de la normalidad en el servicio.

La asignación de los valores de los indicadores de resiliencia, debe tener en cuenta el estado de la infraestructura, en las fases ante, durante y pos evento, las medidas de protección en las que se incluyen las rutas alternativas, la existencia de un sistema de alerta, y las medidas de evacuación.

Consideramos de especial importancia la valoración de los indicadores relativos al medio ambiente, y el valor del efecto sobre distintos eventos pasados, y relacionados con los indicadores ya descritos con anterioridad.

La valoración de estos indicadores, puede realizarse utilizando ponderaciones o pesos iguales, considerando que consideramos como más objetivo el método que consiste en valorar el impacto que tiene sobre los indicadores sobre el servicio esperado en condiciones óptimas.

Los indicadores de servicio para fines de tráfico, se pueden medir estimando el tiempo necesario para transportar mercancías y personas para una demanda de volumen específica.

Para medir la resiliencia, necesitamos comparar una referencia caso base con las condiciones durante y después del evento disruptivo, utilizando para ello simulaciones.

Consideramos que sería una ventaja disponer en los Centros de Control de módulos de simulación, para estudiar a partir de diversos escenarios, los resultados de la aplicación de distintas estrategias de gestión.

A título de ejemplo, la disposición de una herramienta en la que el Gestor pueda de forma inmediata introducir distintas variables, para resolver las cuestiones que indicamos a continuación, será determinante para su aplicación:

- Efectos sobre el tráfico, congestión, ante la adopción de distintas alternativas, ya sean de corte total parcial o disminución de la capacidad.
- Decisión sobre la velocidad máxima exigible.
- Tiempos de incremento de los viajes.
- Posible afección a las rutas alternativas ante el desvío.

De esta forma podremos establecer valores para cada uno de los momentos, y que, comparados con el valor inicial, nos dará un resultado de resiliencia de la infraestructura.

Hasta aquí hemos utilizado elementos relacionados con el tráfico, pero éste es sólo uno de los indicadores para el estudio, y que se realizará de forma individualizada para cada uno de los indicadores que maneje nuestro Plan de Calidad.

CONCLUSIÓN

En definitiva, se trata de valorar aquellos indicadores fijados en nuestro Plan de Calidad, antes, durante y con posterioridad al evento, y su valoración conjunta nos aproximará a la capacidad de resiliencia de la infraestructura a gestionar.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL: HERRAMIENTA CLAVE PARA INCREMENTAR LA RESILIENCIA DE LOS TÚNELES

César Fernández Ramírez
Responsable Infraestructuras Túnel / Metro
SIEMENS

Dentro de la temática "Explotación y gestión sostenible de los túneles" uno de los aspectos fundamentales de una infraestructura como los túneles, es mantenerla operativa el mayor tiempo posible y volver a un estado seguro en caso de que se produzca cualquier incidente. Esto se puede conseguir hoy en día con sistemas como el Condition Monitoring y realizando una buena analítica de datos con algoritmos de Inteligencia Artificial que nos ayuden a desarrollar mantenimientos predictivos o tomar medidas antes de cualquier incidente. De esta manera tendremos túneles mas seguros y con menor tasa de incidentes en los mismos. Desde Siemens, somos expertos en automatización y en la digitalización de todos y cada uno de los sistemas que se incluyen en un túnel. Dentro de mi artículo he puesto como ejemplo la captura de las vibraciones en los ventiladores para que, una vez obtengamos los datos, podamos analizarlos y tomar las mejores decisiones que nos ayuden a reducir sensiblemente las incidencias.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE: KEY TOOL FOR INCREASING TUNNEL RESILIENCE

Within the theme "Sustainable operation and management of tunnels" one of the fundamental aspects of an infrastructure such as tunnels is to keep it operational for as long as possible and to return to a safe state in the event of any incident. This can be achieved today with systems such as Condition Monitoring and good data analytics with Artificial Intelligence algorithms that help us to develop predictive maintenance or take measures before any incident. In this way, we will have safer tunnels with a lower incident rate. At Siemens, we are experts in automation and in the digitalization of every one of the systems included in a tunnel. In my article I have given as an example the capture of vibrations in the fans so that, once we obtain the data, we can analyze them and take the best decisions that will help us to significantly reduce incidents.

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : UN OUTIL CLÉ POUR ACCROÎTRE LA RÉSILIENCE DES TUNNELS

Dans le cadre du thème "Exploitation et gestion durables des tunnels", l'un des aspects fondamentaux d'une infrastructure telle que les tunnels est de la maintenir opérationnelle le plus longtemps possible et de revenir à un état sûr en cas d'incident. Cela peut être réalisé aujourd'hui grâce à des systèmes tels que la surveillance des conditions et une bonne analyse des données avec des algorithmes d'intelligence artificielle qui nous aident à développer une maintenance prédictive ou à prendre des mesures avant tout incident. De cette façon, nous aurons des tunnels plus sûrs avec un taux d'incidents plus faible. Chez Siemens, nous sommes des experts de l'automatisation et de la numérisation de chacun des systèmes inclus dans un tunnel. Dans mon article, j'ai donné comme exemple la capture des vibrations dans les ventilateurs afin que, une fois les données obtenues, nous puissions les analyser et prendre les meilleures décisions qui nous aideront à réduire considérablement les incidents.

1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de máquinas y sistemas es un requisito básico para la productividad. Para minimizar los tiempos de inactividad no planificados, es necesario detectar las fuentes de error en una etapa temprana. Entonces es posible planificar actividades de mantenimiento para garantizar que no interrumpan la operación productiva. Aquí es precisamente donde entran los sistemas de Condition monitoring como SIPLUS CMS. Supervisan continuamente el estado de los componentes mecánicos en su equipamiento y en toda la Infraestructura.

Como resultado, cualquier cambio resultante del desgaste u otro daño basado en los historiales de tendencias documentados se puede detectar en una etapa inicial y resolver los problemas antes de que provoquen un tiempo de inactividad de la instalación.

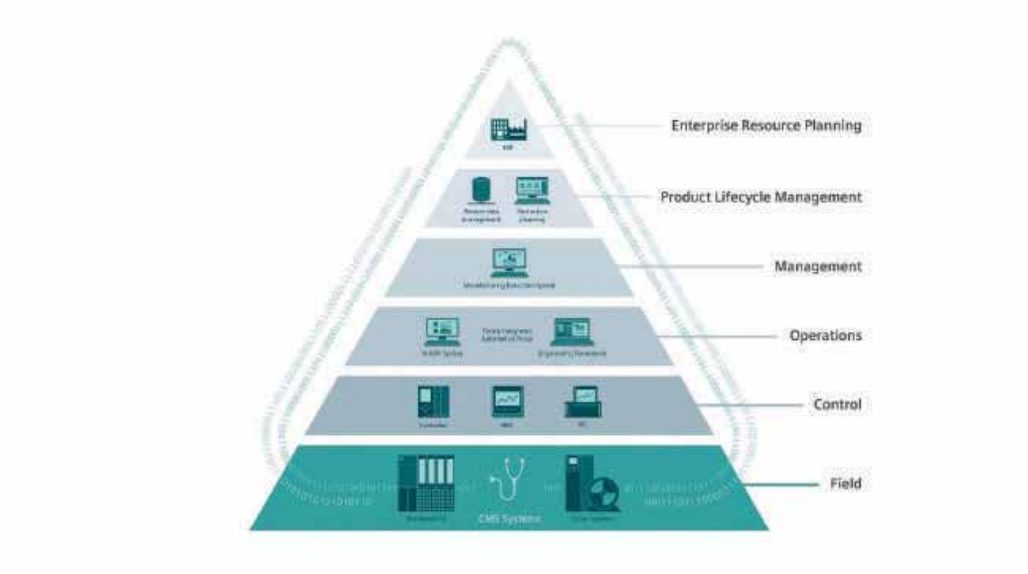
Las empresas de equipos, tecnología y telecomunicaciones 5G están colaborando con las ciudades para definir la nueva generación de movilidad autónoma. Las interacciones entre estos entornos tan complejos serán las que inspiren la innovación en la ingeniería. La inteligencia artificial (IA) es el hilo conductor que vincula estas comunidades para crear nuevas soluciones inteligentes, conectadas y que puedan automatizar y predecir de forma antes inimaginable. Para los vehículos autónomos, aquí es donde presente y futuro se encuentran.

Inteligencia Artificial y Realidad Aumentada

Las nuevas tecnologías de TI ayudarán a las empresas de todos los sectores a superar los retos del futuro. Siemens integra continuamente estas tecnologías en su cartera para ofrecer el futuro de la automatización.

Transparencia en todos los niveles, con Totally Integrated Automation (TIA)

SIPLUS CMS registra y analiza las variables mecánicas de los sistemas, las integra en el mundo de la automatización y proporciona ayuda para la toma de decisiones al personal de mantenimiento, los operadores y la gerencia. La arquitectura de sistema abierto y la interacción eficiente entre todos los componentes de automatización (TIA) permiten monitorear el estado de los componentes mecánicos en toda la instalación en todos los niveles. Con este enfoque, los centros de control pueden monitorear de cerca la información de estado actualizada. En caso de anomalía, es posible estimar rápidamente cuánto tiempo más es posible una operación segura. Además, las anomalías en una instalación se pueden comparar directamente con la condición de los componentes circundantes para determinar si un aumento en la temperatura es una indicación de sobrecalentamiento de un cojinete.



Jerarquía de planta en forma de pirámide

2. CONCEPTOS GENERALES, INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En un entorno industrial o una infraestructura, los motores, accionamientos, controladores y sensores suministran datos en una gran cantidad (Big Data), que se procesan localmente (por ejemplo, a través de la informática on premise) o en una nube. El volumen y la calidad de los datos recopilados y nuestros servicios gestionados garantizan que la inteligencia artificial (IA) se adapte a sus necesidades individuales. La mejora continua y la transparencia llevarán a su infraestructura al siguiente nivel de productividad y eficiencia, en términos de operación y mantenimiento.

Condition monitoring

El aprendizaje de las máquinas y la inteligencia artificial desempeñan un papel importante en el seguimiento a largo plazo de los datos generados de forma continua. Los conjuntos de datos generados por una infraestructura se pueden utilizar para detectar tendencias y patrones que, con la ayuda de una combinación de diferentes parámetros de sensores, pueden ayudar a que el sistema sea más eficiente o ahorre energía. En consecuencia, las infraestructuras como los túneles se adaptan constantemente a las nuevas circunstancias y se optimizan aún más sin la intervención del operador.

Tecnologías aplicadas en el Condition monitoring. ¿A quién va dirigido?

Existe gran diversidad en la aplicación de técnicas de Condition Monitoring. Aquí algunos de los ejemplos más importantes:

- Análisis de vibraciones
- Medición de temperatura
- Medición de Velocidad
- Monitoreo y análisis de corriente
- Termografía
- Ultrasonido
- Análisis de lubricante
- Análisis acústico

Aspectos Claves para implementar correctamente soluciones en Condition Monitoring

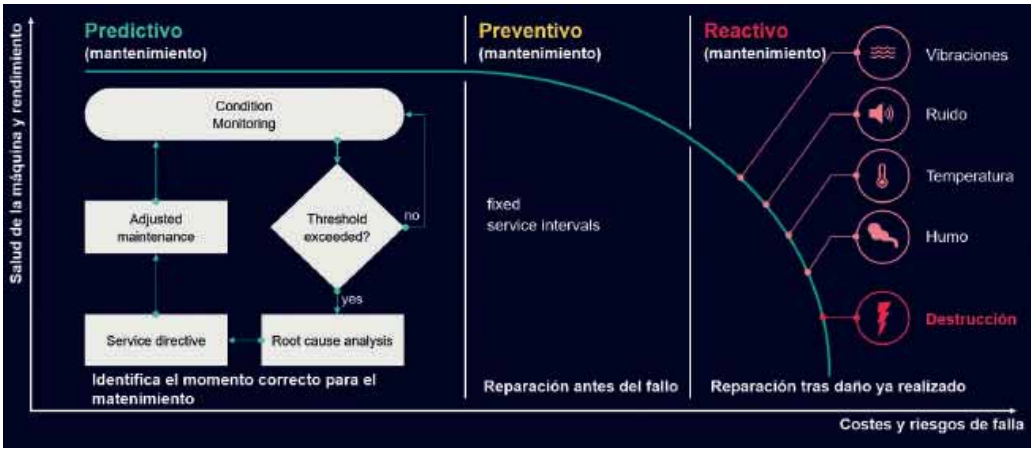
El proceso de Condition Monitoring y vibración tienen aspectos claves para lograr el objetivo en un corto plazo. Es difícil saberlo todo cuando se empieza y por ello es importante tener en cuenta los siguientes consejos:

Saber que quieres medir: Es muy importante decidir que parámetros quieres medir en una máquina, así como también que máquina quieres medir. Los parámetros más importantes para el Condition Monitoring son la vibración, la temperatura y la corriente.

Establece un punto de partida: Probablemente no seas un analista experto y tampoco necesitas serlo. El primer paso siempre será establecer un punto de partida. Hasta donde sabe, su máquina está funcionando de manera correcta por el momento, así que necesita saber cuándo algo cambie. Un punto de partida le permitirá saber cuándo su máquina ha excedido valores actuales. Con el tiempo y con ayuda de información, más adelante sabrás cuales son los valores límites para cada máquina.

Verificación periódica: De nada servirá lo que hagas si no tienes la rutina de verificar el estado de tu maquinaria y las alarmas desplegadas. Se crean aplicaciones móviles, así como software para PC y WEB para que puedas hacerlo de manera sencilla.

Establece Alarmas: En algún momento verás que tus parámetros de vibración cambian o aumentan. Verifica tu gráfica de tendencia, evalúa y ajusta tus valores de alarma para saber en cuanto tiempo vuelven a ser superadas.

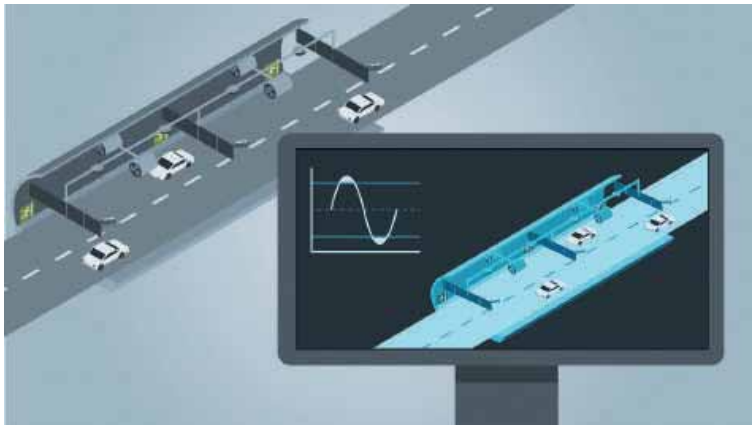


Tipos de Mantenimiento en función de cuando se producen.

Simulaciones y datos contextuales.

Ya hoy vemos la IA aplicada a conjuntos de datos creados y organizados promueve nuevas formas para mejorar los conocimientos y la comprensión.

Los ejemplos incluyen gráficos de conocimiento, que capturan el significado y las relaciones entre elementos en diversos conjuntos de datos, y gemelos digitales, que proporcionan representaciones digitales detalladas y simulaciones de sistemas, activos o procesos reales.



Ejemplo de simulador y Gemelo digital de un túnel

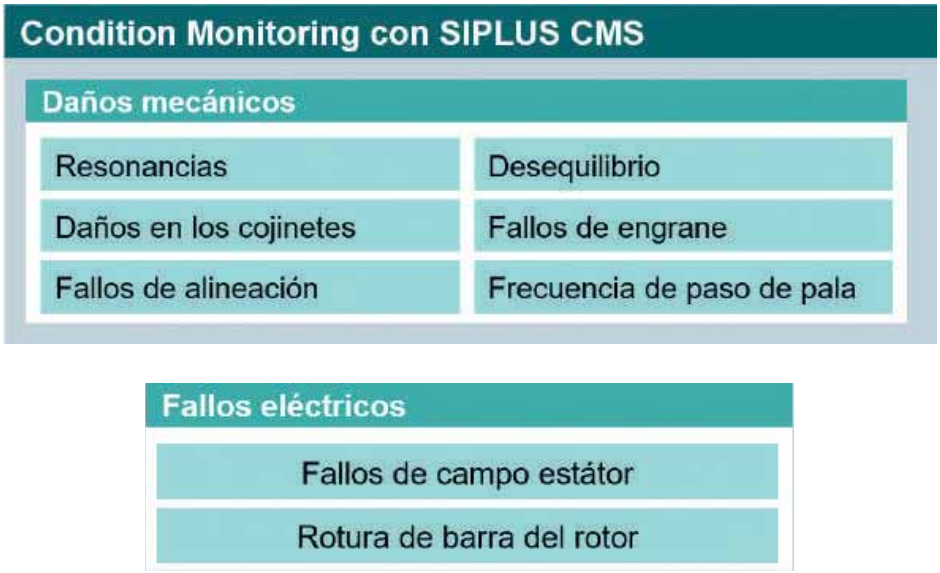
Dentro de las posibilidades del Condition Monitoring podemos ver como existen formas hoy en día, en la cual los mantenedores de la instalación son capaces de detectar alguna anomalía, en la imagen inferior vemos cómo podemos observar humo, sentir sobre temperaturas o incluso escuchar ruidos anormales. De esa manera somos capaces de reaccionar, aunque en algunos casos puede llegar a ser tarde. La tecnología y sistemas como el Condition Monitoring son capaces de identificar patrones y reaccionar incluso con meses de antelación ante una incidencia no deseada.

Dentro de un túnel, existen varios sistemas que pueden ser susceptibles de implementar IA y CM como los sistemas de ventilación, Galerías, puertas de Emergencia, etc.

Ventiladores y Jet fans dentro de un túnel o un parking.

Salida de emergencia

Si nos centramos en un caso de uso típico como son los accionamientos, nos podemos encontrar con fallos mecánicos usuales y que, a pesar de hacer mantenimientos correctivos, lo ideal sería prevenirlos y de esa manera mejorar la disponibilidad del túnel.



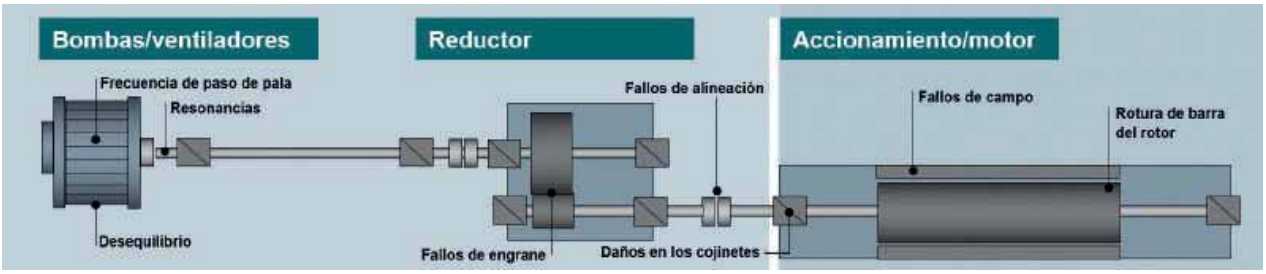
Para proteger un sistema eficientemente durante el servicio frente a daños mecánicos y poderlos reconocer con antelación, hay que supervisarlo permanentemente.

Para poder reconocer los daños mecánicos de un sistema, hay que supervisar especialmente las vibraciones mecánicas. Las vibraciones aparecen sobre todo debido a la fuerza centrífuga que tienen las partes rotativas de las máquinas.

Por ejemplo, debido a lo siguiente:

- Cargas no equilibradas
- Fallos de equilibrado en los ejes de las máquinas
- Daños en los cojinetes
- Fallos en los mecanismos
- Fuerzas magnéticas, hidráulicas y cambiantes debidas a la funcionalidad de la máquina

La solución para supervisar componentes mecánicos, Siemens dispone del "Condition Monitoring Systems" SIPLUS CMS. Este sistema de supervisión permite tener en un sólo vistazo todas las máquinas y la instalación completa. Esto permite planificar mejor y con tiempo todos los procesos de mantenimiento.



Los tres métodos de análisis podríamos colocarlos en un diagrama en función del valor que nos aporta.

El prioritario para hacer un buen estudio es seleccionar una serie de valores característicos y plotearlos en gráficas para un primer análisis y toma de decisiones. Esto nos determina el estado real de mi máquina. Se suelen usar indicadores para medir la desviación frente a la situación ideal o teórica. Claramente es el más sencillo de implementar.

Si queremos ir un paso más allá, se pueden realizar análisis selectivos por frecuencia. Cada daño tiene un espectro de frecuencias propio y podemos adelantarnos a cualquier desequilibrio.

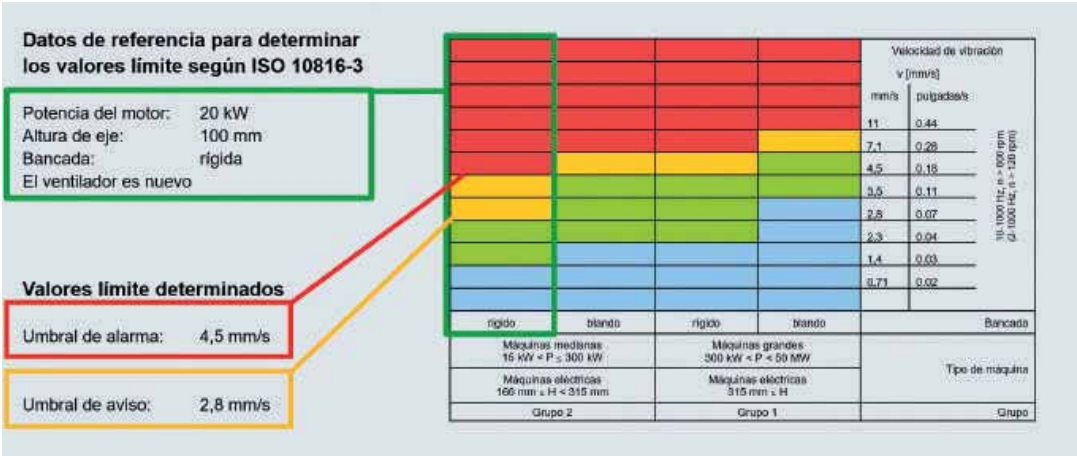
Por último, se podría hacer un análisis más experto nos permite hacer una recogida en streaming con tools dedicadas y realizar una analítica dedicada incluso aplicando algoritmos de inteligencia Artificial para aprender y realizar un mantenimiento predictivo de nuestra instalación.

Equipamientos para Condition Monitoring dentro del porfolio de Siemens

Si hacemos un análisis basado en valores característicos, se debe tener en cuenta magnitudes típicas como la velocidad efectiva que básicamente lo que nos devuelve dentro de una banda de frecuencia el valor efectivo en ese ancho de banda. Importante en las vibraciones de mi máquina. Y para el cálculo de la aceleración efectiva dentro de la banda. O para el cálculo de la DKW en el momento de la puesta en marcha.

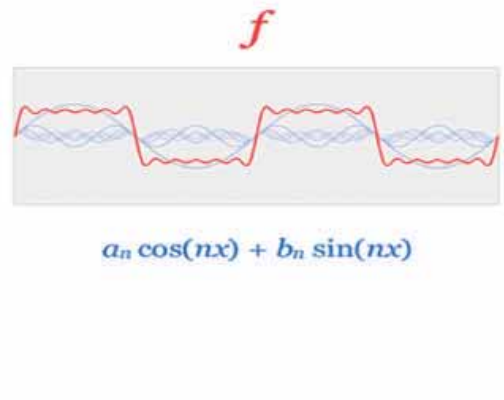
Este tipo de análisis se suele llevar a una baliza o un semáforo que nos indica el estado actual del análisis seleccionado.

Existe la norma ISO 10816-3 que Determina los límites de los valores característicos en función del tamaño del motor, la bancada etc.



Datos de referencia de la norma ISO 10816-3

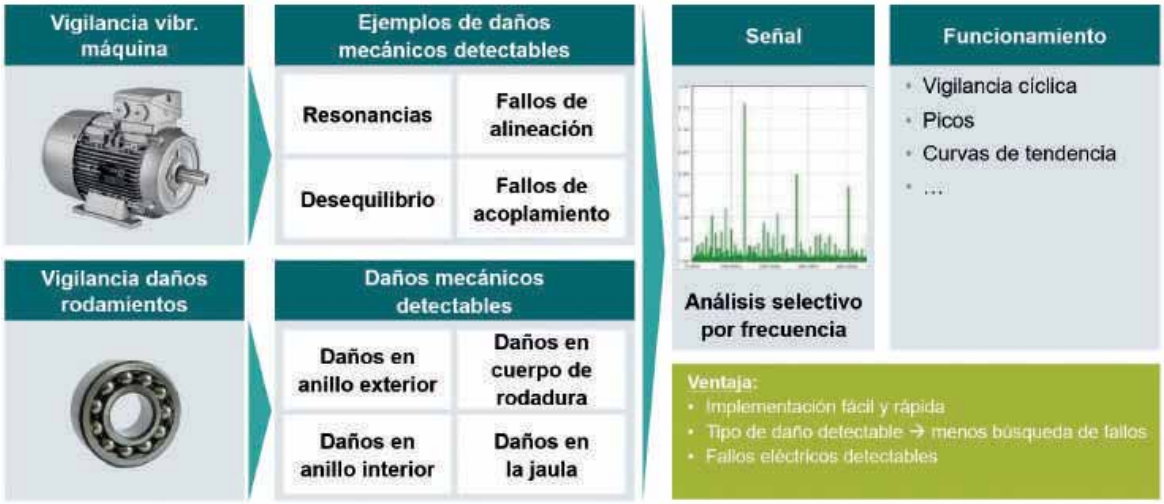
En el caso de un análisis selectivo por frecuencia, toda señal de vibración podemos sacar su descomposición en frecuencia (Transformada de Fourier). Lo que nos va a permitir precisar el tipo de error que podemos estar detectando en nuestro sistema.



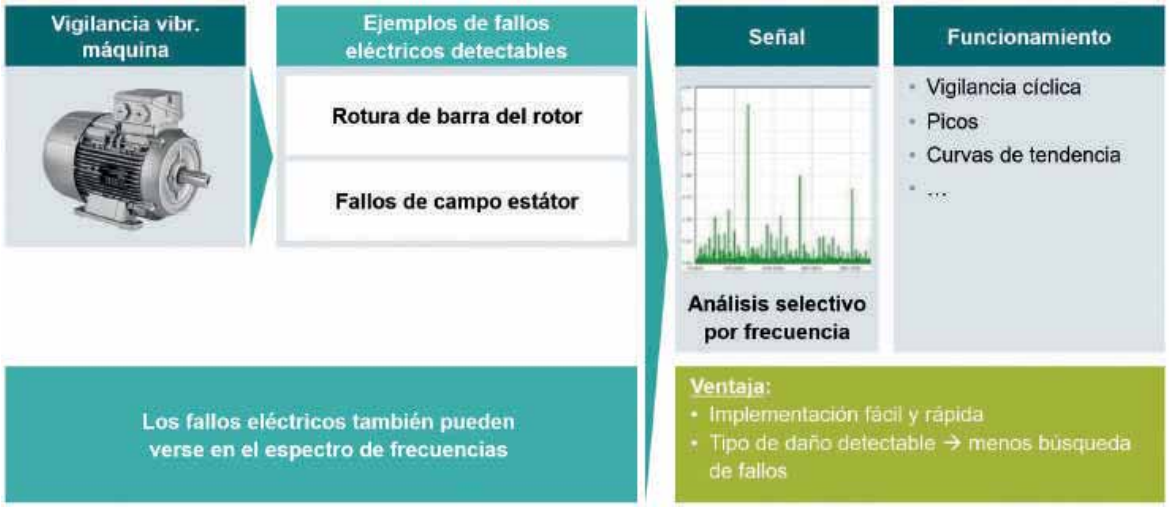
Ventajas del diagnóstico selectivo por frecuencia:

- Todo daño mecánico tiene su propio espectro de frecuencias
- Un simple vistazo al espectro de frecuencias es suficiente para delimitar aprox. la causa del daño
- La búsqueda de la causa real del daño se reduce a un mínimo
- La amplitud permite evaluar la magnitud del daño, y así sacar conclusiones sobre la vida útil restante. Aquí desempeñan un papel decisivo los valores empíricos del operador

Ejemplo de daños mecánicos detectables nos encontramos fallos de alineación, acoplamiento o desequilibrio, así como precisar fallos en los rodamientos y detectar daños en anillo exterior o interior etc.

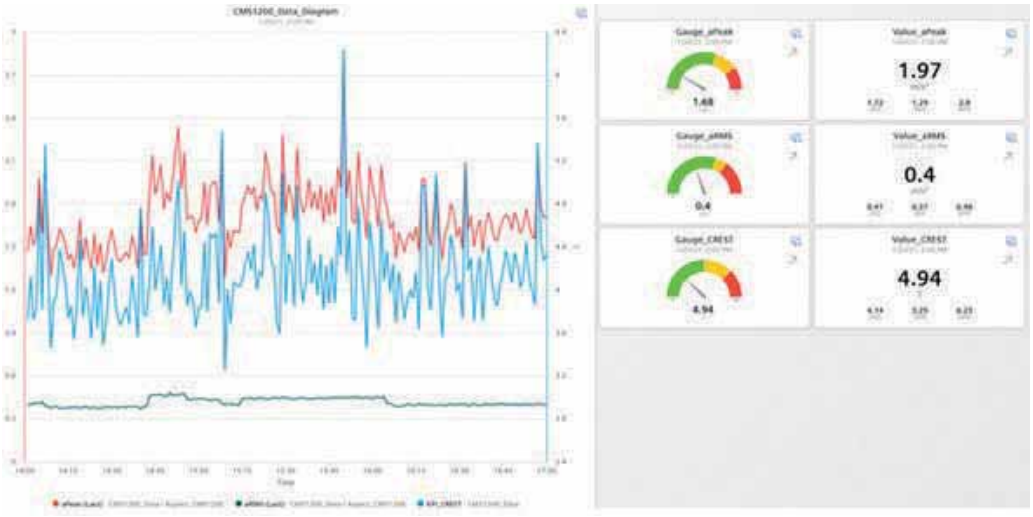


Los fallos eléctricos también pueden verse en el espectro de frecuencias.



Si nos vamos a métodos de análisis expertos, podemos exportar esta analítica de datos y crear algoritmos de Inteligencia artificial para realizar mantenimientos predictivos.

Analítica y toma de decisiones gracias a la información recogida y representada



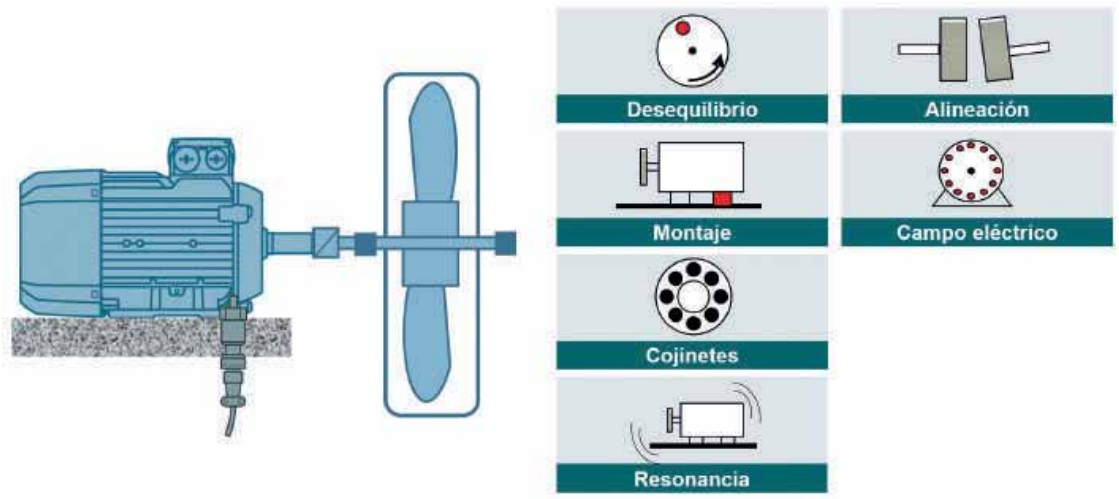
Dashboard con información de tendencias y semáforos de indicación de estado actual

Si nos vamos a un ejemplo práctico para terminar como es la vigilancia de los ventiladores en un túnel, vemos que dentro del sistema de ventilación nos encontramos con el motor, la bancada, el acoplamiento al ventilador, cojinetes etc.

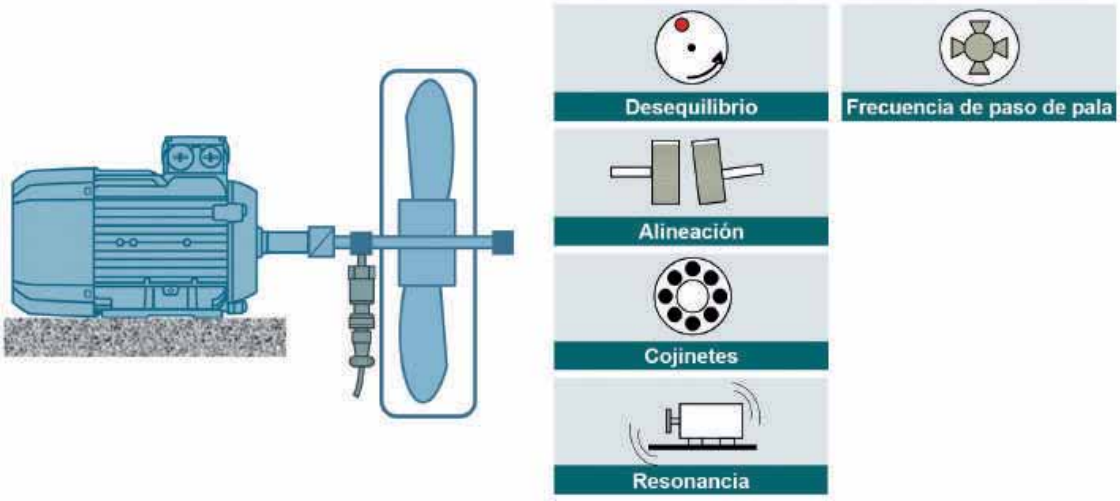
Parte interior de un túnel con un ventilador y una salida de emergencia

Dentro de un ventilador podemos encontrar daños mecánicos y daños eléctricos. Todos ellos con un buen sistema CMS podemos vigilar y anticiparnos a cualquier incidencia no programada.

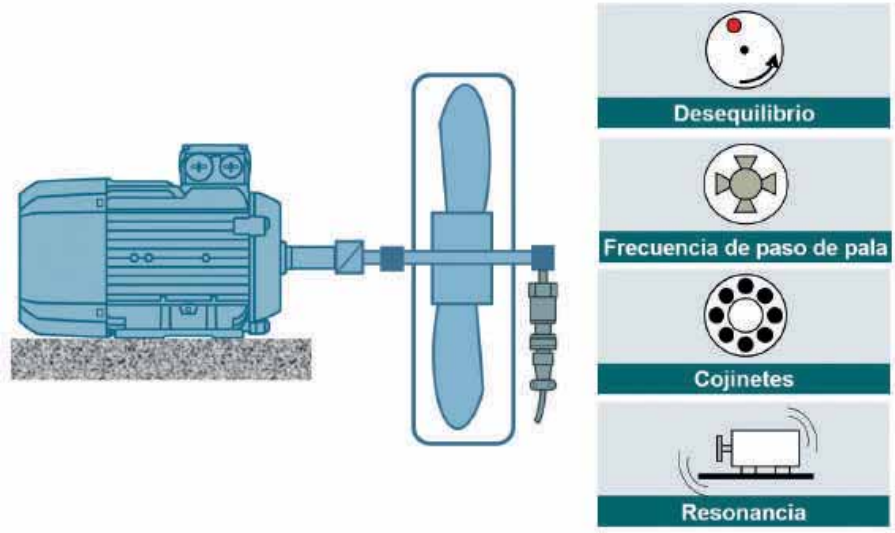
En toda aplicación de Condition Monitoring, es muy importante la ubicación de los sensores que nos van a medir las vibraciones del sistema. Como podemos ver en las imágenes inferiores, en función de la ubicación del sensor, seremos capaces de detectar diferentes tipos de daños mecánicos o eléctricos.



Colocación del sensor en la parte del motor próximo a la carga

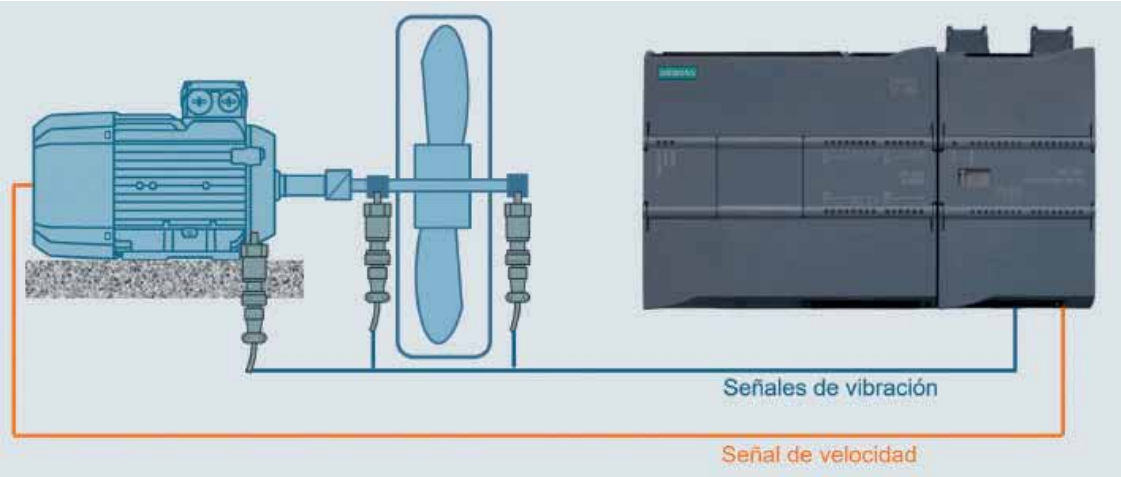


Colocación del sensor en la parte del ventilador



Colocación del sensor en la parte final del ventilador

Por tanto, una configuración mínima para este ejemplo del ventilador es tomar datos de al menos todos los puntos detectados y cablearlos al CMS 1200 para su supervisión.



3. CONCLUSIONES

Por último, y a modo de conclusión me gustaría puntualizar cuales son los ocho pasos

para una solución de Condition Monitoring (CM)

1. Aclarar los requisitos del CM:

   ¿Qué componentes mecánicos deben ser monitoreados y para qué daños?

2. Seleccionar el sistema de CM que se ajuste a los requisitos del sistema:

   Número de sensores, integrados o autónomos; cojinete de deslizamiento/rodamiento etc.

3. Instalar los sensores y el sistema CM:

   Selección de los lugares de medición/montaje de los sensores (tornillos, adhesivo), tener en cuenta las longitudes máximas de los cables.

4. Seleccionar el método de análisis: parámetros y/o espectros

5. Puesta en marcha del sistema CM a través de la biblioteca o ejemplo de aplicación:

   Especifique los límites de alarma/advertencia de los parámetros de acuerdo con la norma ISO 10816-3;

   Los límites del espectro corresponden a la experiencia del personal de mantenimiento

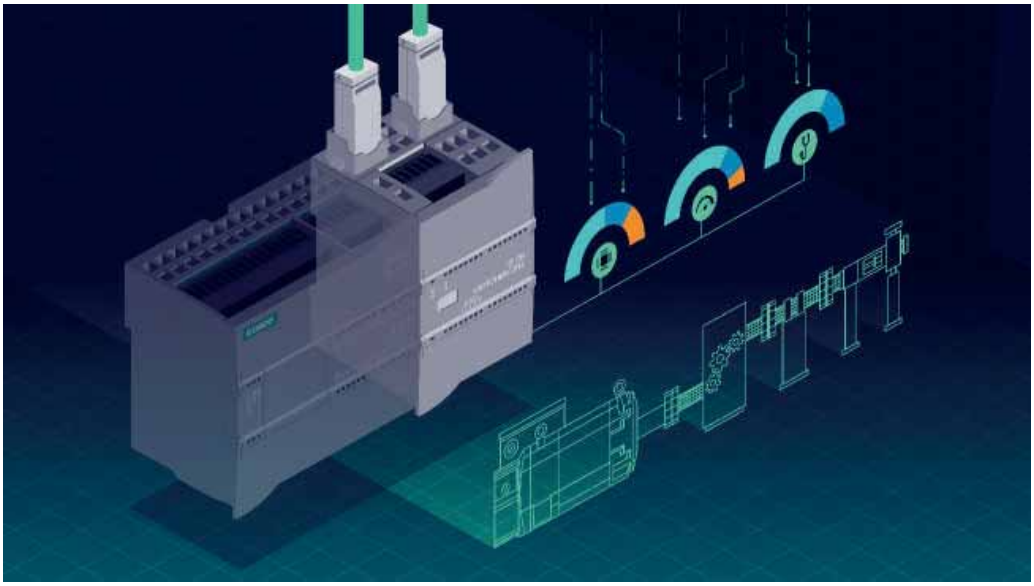
6. Puesta en servicio de CM del sistema de control o sistema autónomo:

   ¿Qué datos de CM deben visualizarse/informarse y para quién?

7. Optimización de los límites de alerta y alarma según las curvas de tendencia iniciales en el funcionamiento en curso.

8. Predicción del comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios para tomar las decisiones correctas.

Aplicar soluciones de Condition Monitoring e Inteligencia Artificial ayudan a mejorar la capacidad de análisis, a mitigar las incidencias y, por tanto, a mejorar la resiliencia de la infraestructura.



PLAN DE MANTENIMIENTO DE ESTRUCTURAS EN TÚNEL DE LA AUTOVÍA DE CIRCUNVALACIÓN DE MADRID M-30

Sergio Barral García
Luis Benito Olmeda
José Antonio Morena Villanueva

Dpto. de Estructuras de Madrid Calle 30

La construcción de nuevas infraestructuras, con su diversidad de tipologías, así como con la repercusión que tiene para el tráfico de la ciudad de Madrid, hacen que resulte muy conveniente la generación de un documento que establezca de forma clara y objetiva, qué labores se deben realizar de cara a mantener esta importante infraestructura de una manera eficiente. El Plan de Mantenimiento de túneles de M-30, a pesar de no disponerse de normativa de obligado cumplimiento que señale los puntos mínimos y periodicidad que debe recoger, vertebra las inspecciones realizadas en esos elementos de la infraestructura de dicha vía de circunvalación de la ciudad de Madrid. El objeto, del mismo, es que, mediante un mantenimiento de carácter preventivo, se consiga no solo alargar la vida útil de los túneles que conforman la M-30, si no disponer de información de primera mano de ellas, con el fin de poder intervenir cuando el estado lo demande, consiguiendo mediante intervenciones de un menor calado, tanto económico como de afección a la vía, un nivel de servicio lo más optimizado posible. Para ello se precisa un conocimiento de la vía mediante un inventario detallado, una inspección periódica, exhaustiva y lo más objetiva posible, para conseguir evaluar el estado real mediante una matriz de riesgos. En esta se divide el túnel en tramos de 20 metros de longitud, para otorgar distintos colores en función de los tipos de daños, por un lado, y de la necesidad de intervención, a corto o medio plazo. Por último, con la obtención de los índices de estado se realizan las operaciones de mantenimiento y conservación necesarias: operaciones de mantenimiento ordinario, operaciones de conservación de carácter extraordinario, operaciones de renovación u obras de rehabilitación y/o refuerzo.

MAINTENANCE PLAN FOR STRUCTURES IN THE M-30 MADRID RING ROAD TUNNEL

The construction of new infrastructures, with its diversity of typologies, as well as the repercussion it has on traffic in the city of Madrid, make it very convenient to generate a document that clearly and objectively establishes what tasks must be carried out perform in order to maintain this important infrastructure in an efficient manner. The M-30 Tunnel Maintenance Plan, despite not having mandatory regulations that indicate the minimum points and periodicity that must be collected, is the backbone of the inspections carried out on these elements of the infrastructure of said city ring road from Madrid. The purpose of the same is that, through preventive maintenance, it is possible not only to extend the useful life of the tunnels that make up the M-30, but also to have first-hand information about them, in order to be able to intervene when the state demands it, achieving through interventions of a lesser depth, both economic and affecting the road, a service level that is as optimized as possible. For this, knowledge of the road is required through a detailed inventory, a periodic, exhaustive and objective inspection as possible, in order to assess the real state through a risk matrix. In this, the tunnel is divided into sections of 20 meters in length, to give different colors depending on the type of damage, on the one hand, and the need for intervention, in the short or medium term. Lastly, once the status indices are obtained, the necessary maintenance and conservation operations are carried out: ordinary maintenance operations, extraordinary conservation operations, renovation operations or rehabilitation and/or reinforcement works.

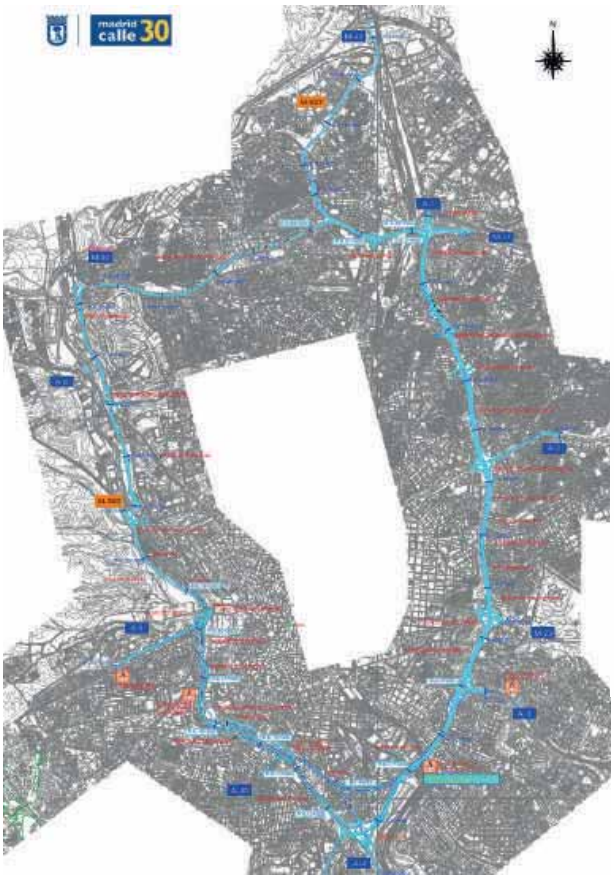
PLAN D'ENTRETIEN DES STRUCTURES DANS LE TUNNEL DE L'AUTOROUTE DE CIRCUMVALATION M-30 DE MADRID

La construction de nouvelles infrastructures, avec sa diversité de typologies, ainsi que la répercussion qu'elle a sur le trafic dans la ville de Madrid, rendent très pratique la génération d'un document qui établit clairement et objectivement les tâches à effectuer pour maintenir cette importante infrastructure de manière efficace. Malgré l'absence de réglementations obligatoires indiquant les points minimaux et la périodicité à collecter, le plan d'entretien du tunnel M-30 est l'épine dorsale des inspections effectuées sur ces éléments de l'infrastructure dudit périphérique de la ville de Madrid. Le même objectif est que, grâce à la maintenance préventive, il est possible non seulement de prolonger la durée de vie utile des tunnels qui composent le M-30, mais également d'avoir des informations de première main à leur sujet, afin de pouvoir intervenir quand l'État l'exige, en obtenant par des interventions de moindre profondeur, tant économiques qu'affectant la voirie, un niveau de service aussi optimisé que possible. Pour cela, la connaissance de la route est requise au travers d'un état des lieux détaillé, d'une inspection périodique, exhaustive et objective dans la mesure du possible, afin d'en apprécier l'état réel au travers d'une matrice des risques. En cela, le tunnel est divisé en tronçons de 20 mètres de long, pour donner des couleurs différentes selon le type de dégâts, d'une part, et le besoin d'intervention, à court ou moyen terme. Enfin, une fois les indices d'état obtenus, les opérations d'entretien et de conservation nécessaires sont réalisées : opérations d'entretien ordinaire, opérations extraordinaires de conservation, opérations de rénovation ou travaux de réhabilitation et/ou de renforcement.

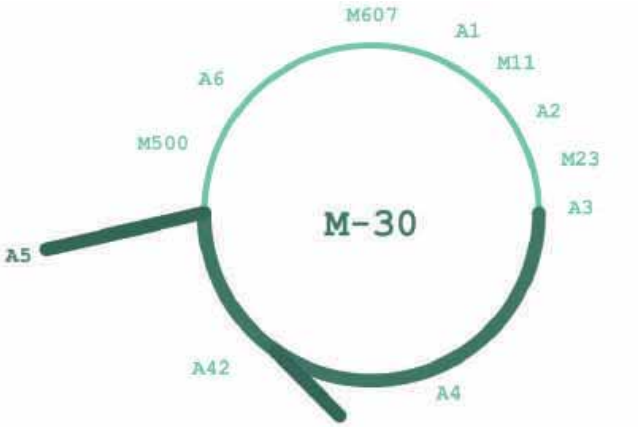
1. INTRODUCCIÓN

Las particularidades de la autovía de circunvalación de Madrid, M-30, hacen que se deba disponer de documentación soporte que clarifique, priorice y coordine las tareas de inspección, vigilancia y mantenimiento de la infraestructura. Conviene señalar que la M-30, no solo es la vía con mayor IMD de España, sino una de las autovías urbanas más importantes de toda Europa.

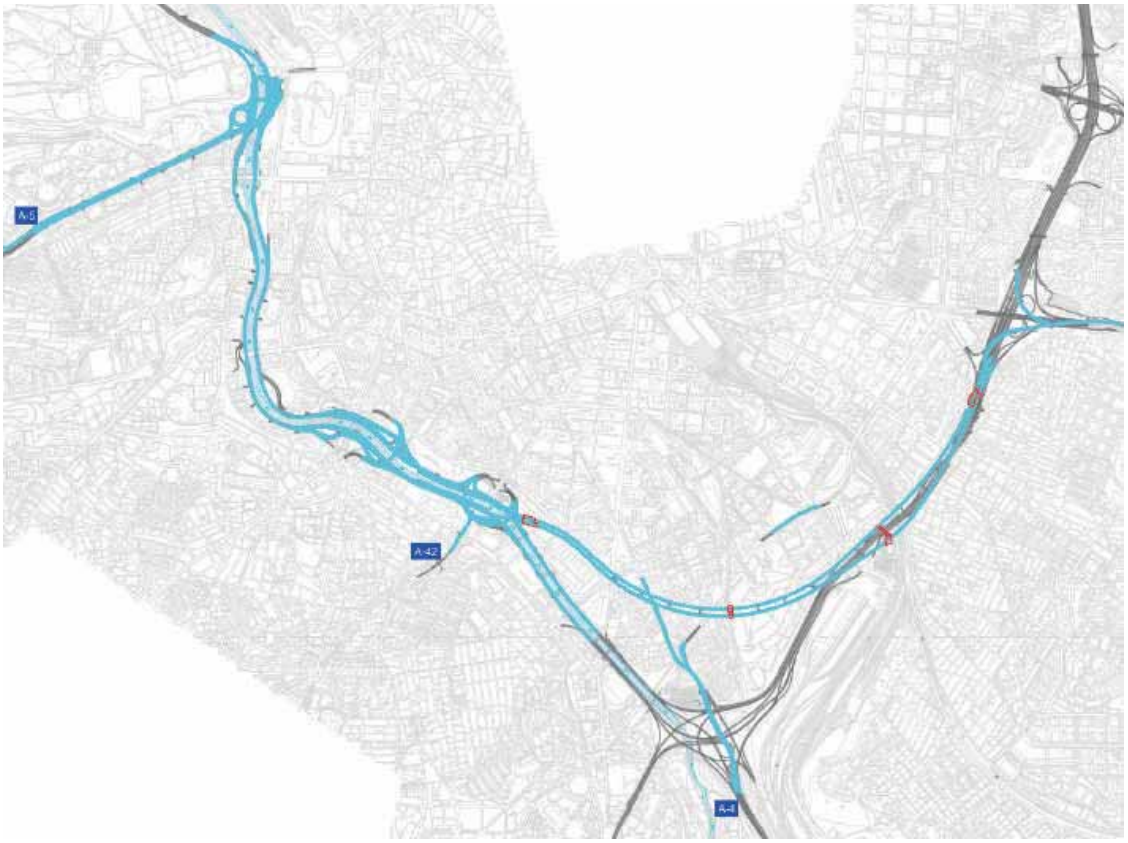
Conviene indicar que esta vía, cambió de titularidad estatal a municipal en 2004. Hasta 2007 las estructuras existentes en la misma se limitaban básicamente a estructuras en superficie, con distinta tipología, edad y estado de conservación. Estos cambios son relevantes desde el punto de vista de la distinta forma de afrontar la conservación de la infraestructura. Como se indicaba anteriormente, 2007 es un hito importante en la vida de la M-30, dado que finalizaron diversas obras de adecuación de este anillo de Madrid. El principal exponente de ese profundo cambio fue soterramiento de gran parte del sector sur, además de dos zonas puntuales de salida hacia las autovías radiales A3, A4 y A5. Ello supuso la generación de más de 40 kilómetros de túnel, entre los ppkk 9 y 18 de la M-30. El modelo elegido por el ayuntamiento de Madrid para la conservación y mantenimiento de toda la vía viene siendo la creación de una empresa mixta Madrid Calle 30, que también coordinó las obras anteriormente mencionadas, y en estos momentos realiza las labores propias de una administración, así como gestiona la adjudicación mediante licitación de los trabajos de mantenimiento y explotación a una empresa privada, cuyo actual adjudicatario es la firma Emesa.



Plano de planta de la M-30 sobre la cartografía de Madrid



Esquema de la M-30 y situación con respecto a distintas vías



Plano de planta de los túneles de M-30 sobre la cartografía de la zona sur de Madrid

La existencia de estas nuevas infraestructuras, con su diversidad de tipologías, así como con la repercusión que tiene para el tráfico de la ciudad de Madrid, hacen que resulte muy conveniente la generación de un documento que establezca de forma clara y objetiva, qué labores se deben realizar de cara a mantener esta importante infraestructura de una manera eficiente. Es relevante indicar que el proceso de elaboración del Plan de Mantenimiento de túneles de M-30 (PMT_M30), se inicia, por las razones antes indicadas, pero sin normativa a nivel local. De hecho, al inicio del vigente contrato de mantenimiento existía una carencia absoluta a nivel nacional de normas o pliegos, en relación a la inspección y mantenimiento estructural de túneles. Por ello, a pesar de que, a día de hoy, existen muy pocos documentos de referencia, el ámbito de aplicación de los existentes se extiende a túneles de la Red de Carreteras del Estado. Tanto estos, como otras fuentes normativas fueron el germen del PMT_M30. En concreto se tuvo en cuenta la siguiente documentación:

- Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del consejo del 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras.
- R.D. 635/2006, de 26 de mayo sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de la red de carreteras del estado.
- Orden Circular 27/2008 sobre la Metodología de Inspección de Túneles. Ministerio de Fomento.
- Nota de Servicio sobre la realización de inspecciones de nivel básico en obras de fábrica (Muros y Obras de contención, Obras de Paso y Túneles) de la Red de Carreteras del Estado.
- Pliego de Inspección Estructural de túneles de la Red de Carreteras del Estado, del año 2013.
- Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08
- Instrucción de Acero Estructural EAE

Se valoraron además otros documentos que, si bien no constituyen una norma, podían aportar información útil para el desarrollo del documento:

- Guía para la redacción del Plan de Mantenimiento de puentes editada por la ATC.
- Recomendaciones para la gestión del mantenimiento y las inspecciones técnicas de túneles de carretera.
- Good Practice for the Operation and Maintenance of Road Tunnels.
- Manual Highway and Rail Transit Tunnel Inspection Manual. U.S. Department of Transportation.

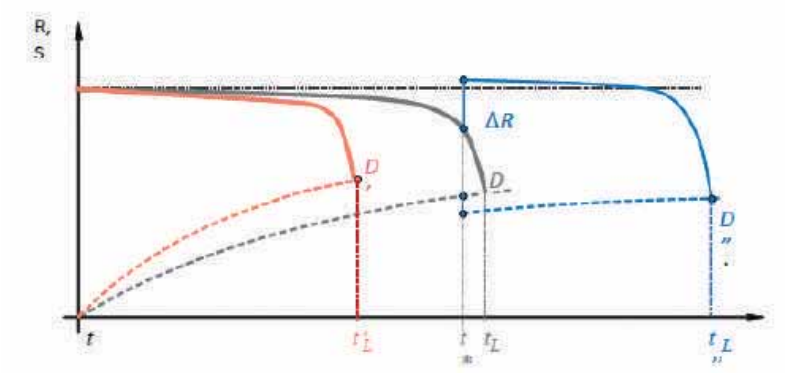
Y, por último, se tuvieron en cuenta documentos redactados específicamente para los túneles de la M-30, tales como:

- Criterios y directrices para la elaboración del Plan de Mantenimiento y conservación de estructuras de Calle 30, tanto de superficie, como túnel, redactado por LRA.
- Informe relativo a la durabilidad de las estructuras metálicas de las galerías, salidas de emergencia y pozos de la Calle 30.
- Política de mantenimiento de estructuras de la Calle 30.
- Procedimiento General para la Inspección Estructural de los Túneles de la Calle30.
- Procedimiento para la Inspección Estructural de los túneles del By- Pass de la M-30.
- Metodología para la Inspección de los aparatos de apoyo en el tramo norte y sur del By-Pass de los túneles de la M-30.
- Definición de criterios y metodología para la valoración de estado del túnel.
- Informes de Inspección Estructural para los 8 tramos en los que se dividen los túneles de la M-30.

El primer plan de mantenimiento de túnel de la M-30 es de reciente vigencia, data del 2020, aunque anteriormente se venían realizando inspecciones periódicas no recogidas en un documento como este, pero que han servido de base para tener un profundo conocimiento de las distintas problemáticas que puede presentar este túnel urbano.

Es fundamental establecer una estrategia general que sea la base del Plan de Mantenimiento, por ello se debe tener en cuenta el objetivo a lograr, las líneas de actuación para alcanzarlo, así como el contexto donde éste se va a aplicar. La EHE-08, en su apartado dedicado al mantenimiento, define tanto estos conceptos, como en sí mismo lo que es mantenimiento: "es el conjunto de actividades encaminadas a que el nivel de prestaciones R(t) se mantenga por encima de un umbral mínimo Rmín a lo largo de toda la vida útil de la estructura (tu)".

Cada vez que nos referimos a mantenimiento estructural, los conceptos pueden quedar esquematizados en la siguiente gráfica:



Esquema de la evolución de las prestaciones y solicitaciones de una estructura a lo largo del tiempo

El mantenimiento es una actividad de carácter preventivo, que evita o retrasa la aparición de problemas en las estructuras que, de lo contrario, tendrían una resolución más complicada y una cuantía económica muy superior.

El PMT_M30, es un documento vivo, queda abierto a actualizase cada año con las mejoras propuestas, dadas las circunstancias especiales que se pueden ir dando en esta vía tan particular y recoge la programación de las diferentes actuaciones a realizar en la estructura de los túneles de la M-30 en esa anualidad, encaminadas a conservar ese nivel de prestaciones por encima del umbral mínimo exigible. Para darle forma a todo ello en el PMT_M30 se establece las siguientes fases de gestión de la conservación:

1. Inventariado
2. Inspección
3. Evaluación
4. Conservación
5. Documentación

Ese apartado 4, Conservación, es en sí mismo el que engloba las actuaciones propias del PMT_M30 en los túneles.

1. INVENTARIADO

Previamente a diseñar la política de gestión de conservación, hay que conocer cuántos y qué tipo de elementos. En este caso, los más de 40 km de túneles se dividen en 8 tramos, como se hizo durante su construcción:

- Tramo 1. Puente del Rey- Avenida de Portugal y M-30 entre el paseo de Marqués de Monistrol- Puente de Segovia.
- Tramo 2. Puente de Segovia- Puente de San Isidro.
- Tramo 3. Puente de San Isidro- Puente de Praga.
- Tramo 4. Puente de Praga- Nudo Sur.
- Tramo By-Pass.
- Tramo Avenida de Portugal.
- Tramo Embajadores.
- Tramo Enlace A-3

Los diferentes tramos han sido ejecutados conforme a diferentes sistemas constructivos, véase: "Cut and Cover", tuneladora tipo escudo EPB o métodos convencionales, lo que conlleva una gran variedad trazados o secciones, así como numerosos puntos críticos.

El sistema "Cut and Cover", se ha utilizado en la mayor parte de los tramos del soterramiento. Consiste básicamente en la contención del terreno mediante pantallas de hormigón armado, la construcción de la losa de cubierta, y por último, la excavación del terreno al abrigo de estas pantallas hasta llegar a la cota máxima en la que se construye la solera o contrabóveda. Estas pantallas se soportan lateralmente mediante la losa de cubierta, y cuando la profundidad de excavación es importante, se utilizan arriostramientos o losas intermedias.

La utilización de una tuneladora tipo EPB en los tubos del by-pass permitía la realización de la excavación y la colocación del revestimiento (dovelas) de forma simultánea, lo que resultaba muy adecuado para las características geológicas existentes en Madrid. En lo que respecta al tramo de Embajadores, se necesitaba resolver

el cruce bajo los colectores del Abroñigal y la M-30, para lo que utilizó un sistema convencional basado en el denominado Método Belga, que consiste básicamente en la excavación y hormigonado de la bóveda, realizando previamente una galería de avance en clave, la posterior excavación de la destroza, el hormigonado de hastiales por bataches y finalmente la excavación y hormigonado de la contrabóveda.

Para dar idea de las dimensiones de la infraestructura a gestionar conviene indicar que los túneles de la actual M-30 se encuentran estructurados en base a cuatro calzadas, dos laterales, y dos centrales, con un trazado coincidente con el antiguo en el tramo comprendido entre Legazpi y Pirámides (calzadas laterales) y en el tramo entre el Puente de Praga y el Paseo de Marqués de Monistrol (calzadas centrales). Dentro de las calzadas laterales, podemos diferenciar una interior denominada NL con sentido de circulación norte y otra exterior denominada XL con sentido de circulación sur, y lo mismo ocurre con las calzadas centrales, existe una interior denominada NC y otra exterior denominada XC con los mismos sentidos de circulación que las anteriores. Las calzadas centrales comienzan en la zona de Conde de Casal con el by-pass, encontrándose con las calzadas laterales a distinta cota a la altura del Puente de Praga, a partir de donde discurren superpuestas en aproximadamente 600 m, hasta que se encuentran a nivel en otros 800 m, punto a partir del cual existe una única calzada central hasta el Paseo de Marqués de Monistrol. Cada tramo está formado no sólo por las calzadas principales, sino además por, ramales, salidas de emergencia, pozos de ventilación, cuartos técnicos, galerías y recintos auxiliares

Dada la variedad de sistemas constructivos empleados, su configuración o su singularidad, existen numerosos puntos del túnel a los que se les deba prestar una especial atención desde el punto de vista estructural. Si a esto sumamos los puntos a tener en cuenta debido a su exposición a ambientes agresivos o a la presencia cercana del río, obtenemos los denominados "puntos críticos", o puntos relevantes por distintos aspectos, de cara a la realización de una inspección y mantenimiento completa y adecuada, y que se resumen en:

- Puntos que suponen un cambio en la solución constructiva (p. ej. pantalla continua a pantalla de pilotes).
- Pantallas con afección directa al cajero del río, especialmente si son pantallas de pilotes.
- Losas situadas bajo el río.
- Elementos estructurales en cruces con otras infraestructuras (cruces bajo puentes, cruces con colectores, elementos relacionados con la operación Campamento…).
- Intersecciones en alzado de 2 ó más calzadas.
- Puntos con reparaciones previas importantes.
- Puntos con filtraciones especialmente importantes extraídos de la termografía. Conviene destacar en este momento, que se realizó una inspección mediante láser escáner 3D y termografía de las calzadas y galería de servicio del by-pass, sobre lo que profundizaremos más adelante, que permitió identificar los puntos conflictivos derivados de la presencia de agua en sus inmediaciones).
- Discontinuidades entre pantallas.

Los puntos críticos de cada uno de los tramos que configuran el túnel, se identifican con anterioridad al comienzo de las inspecciones principales Este listado se ha completado con los puntos críticos recogidos durante la primera inspección completa del túnel, y que corresponden a puntos con patologías significativas que no era posible identificar previamente.

2. INSPECCIÓN

Una vez identificado qué tenemos, necesitamos conocer su estado. Para ello se deben tener claros los distintos tipos de inspección que se pueden realizar:

Inspecciones Rutinarias:

Son inspecciones visuales, llevadas a cabo por el personal encargado de la conservación (no especializados en patología estructural) orientada a la detección temprana de patologías.

El propio personal de conservación revisa las calzadas principales y ramales. Al encontrarse de manera constante en la vía no se realiza una campaña programada en sí misma. No ocurre lo mismo en galerías y recintos auxiliares, ya que no accede a todos ellos de manera periódica. Por ello se programan inspecciones rutinarias cada 6 meses en salidas de emergencia, pozos de ventilación y cuartos técnicos, y cada 30 meses en las galerías de ventilación o recintos por los que no se transita habitualmente y en los que es necesario disponer de medios de auxiliares de acceso.

Un caso especial son las galerías superiores de ventilación del by-pass o plenum, cuyo acceso requiere equipos de seguridad excepcionales. Las principales patologías que pueden aparecer son filtraciones o cejas entre dovelas. Por ello, se establece una periodicidad de 5 años, quedando englobada dentro de las inspecciones periódicas detalladas. No obstante, cuando se dé una incidencia en la calzada de entidad lo suficientemente significativa, para presuponer la existencia de patologías relevantes en el plenum, se llevará a cabo una evaluación de forma inmediata y en función de la misma, se planificarán las actuaciones necesarias en el periodo de tiempo conveniente.

Inspecciones Principales Generales o Detalladas:

En ambos casos son inspecciones visuales realizadas por técnicos especialistas en estructuras, aunque en el primero no es necesaria la utilización de medios de acceso y en el segundo sí.

Estas inspecciones se realizan con una periodicidad aproximada de 5 años en todos los tramos del túnel, y en cada tramo se diferencian dos fases, una primera en la que se inspeccionan calzadas y ramales (Fase I), y una segunda en la que se estudian salidas de emergencia, pozos de ventilación, cuartos técnicos, galerías de ventilación y recintos auxiliares (Fase II). Para los elementos de la Fase I, la inspección adquiere el carácter de detallada por la necesidad de utilizar plataforma elevadora para su ejecución, mientras que para los elementos de la Fase II, la utilización de medios especiales de acceso queda condicionada por la complejidad de su utilización, y por ello, las inspecciones adquieren el carácter de general. En la Fase I se discretiza el túnel en elementos de 20 m de longitud y en estos tramos se condensan cada una de las patologías que presentan.

Para la inspección, el modelo de ficha que se utiliza en la Fase I recoge, de manera separada en cada uno de los hastiales y la losa:

- Los ppkk de los puntos de inspección.
- La tipología existente en dicha sección.
- Si se trata de un punto con alguna singularidad.
- La existencia o no de filtraciones y/o eflorescencias.
- La existencia o no de fisuras y su tipología.
- La existencia de daños en armaduras.

- Si existen fallos de hormigonado.
- Si la zona ha sufrido reparaciones previas.
- Si se trata de una zona de discontinuidad o existe una junta abierta.
- La existencia de desprendimientos de terreno o gunita.
- Si existen problemas de drenaje.
- En caso de existir elementos metálicos, si estos se encuentran oxidados o no.
- En las zonas con vitrex, si se encuentra deformado o falta alguno de sus elementos.

Mientras que en la Fase II, como los elementos a inspeccionar tienen una tipología distinta, la inspección se centra en:

- La localización del elemento.
- Si es o no colindante con algún otro elemento.
- La tipología existente en dicha sección.
- En qué porcentaje es observable.
- La existencia o no de filtraciones y/o eflorescencias.
- La existencia o no de fisuras y su tipología.
- La existencia de daños en armaduras.
- Si existen fallos de hormigonado.
- Si la zona ha sufrido reparaciones previas.
- Si se trata de una zona de discontinuidad o existe una junta abierta.
- La existencia de desprendimientos de terreno o gunita.
- Si existen problemas de drenaje.
- En caso de existir elementos metálicos, si estos se encuentran oxidados o no.
- En las zonas con falso techo, si existe roturas o humedades en los mismos.

Inspecciones Especiales:

Inspección llevada a cabo por personal especializado y realizada cuando se detectan problemas estructurales en el túnel, cuyo objetivo fundamental es la evaluación del estado y detección de la necesidad de actuación a través de un diagnóstico preciso de las patologías.

3. EVALUACIÓN

El estado del túnel se deriva de las inspecciones periódicas detalladas. para cuantificar el estado se utiliza la "matriz de riesgos". Como se ha indicado en el apartado de inspección, se divide cada eje en tramo de 20 m de longitud, a los que posteriormente se les asignarán las patologías encontradas durante la inspección. Esta matriz se realiza independientemente para cada uno de los hastiales, y para la losa. Cada patología lleva asignada una puntuación lo que nos permite obtener una valoración de cada tramo, tal y como se indicaba en el documento "Definición de criterios y metodología para la valoración del estado del túnel"

Con los valores numéricos obtenidos de dicha matriz, función de aspectos visuales, termográficos (presencia de agua) y constructivos se consigue clasificar cada tramo de 20 m en uno de los cuatro siguientes intervalos, que constituyen los índices de estado:

Zonas sin daños relevantes	
Zonas con daños leves sin necesidad actuación a valorar según evolución.	
Zonas con daños medios, con necesidad actuación a medio plazo a valorar según evolución.	
Zonas con daños con necesidad actuación corto plazo.	

4. CONSERVACIÓN

Para realizar las actividades de conservación se definen cuatro categorías, función del tipo de operación que se lleve a cabo:

Operaciones de mantenimiento ordinario:

Se trata de operaciones que tienen por objeto ralentizar la velocidad de deterioro de la estructura. Consisten en pequeñas reparaciones o reposiciones que se aplican a zonas puntuales de los elementos estructurales.

Estas operaciones se programan con una periodicidad dada, previamente establecida, aunque también pueden realizarse según necesidad, como consecuencia de las inspecciones principales.

Operaciones de conservación de carácter extraordinario:

Como las anteriores, tienen por objeto ralentizar la velocidad de deterioro de la estructura, aunque en este caso se aplican a zonas más extensas y sobre elementos con un nivel de deterioro más acusado. Tienen carácter correctivo y suponen una mejora del estado de los elementos, realizándose como consecuencia de las inspecciones principales detalladas, que son las que aportan un nivel de inspección de suficiente detalle como para detectar y diagnosticar con precisión las patologías que requieren una operación de este tipo.

Requieren, de forma general, una evaluación previa por parte de un técnico especialista para diagnosticar con precisión el problema y seleccionar, dentro del catálogo de operaciones de carácter extraordinario, la realmente procedente.

Operaciones de renovación:

Corresponden a actuaciones puntuales de mejora de las prestaciones de una estructura por renovación de un elemento que ha agotado su vida útil por otro de iguales características.

En el caso de los túneles, la renovación de elementos se centra, sobre todo en el equipamiento de galerías y recintos auxiliares (por ejemplo, renovación de escaleras, pasamanos, carpintería metálica) cuya vida útil es menor que la de las estructuras que los contienen.

Dada la gran diversidad y variada casuística de estos elementos, no es posible pautar unas operaciones de renovación para cada tipo de elementos, por lo que el PMT_M30 no incluye operaciones tipificadas de renovación. En cualquier caso, se entiende que los elementos más susceptibles de renovación, serán elementos metálicos, elementos de drenaje o paneles de revestimiento.

La renovación de estos elementos se realiza como consecuencia de las Inspecciones Principales Detalladas o Especiales.

Obras de rehabilitación y/o refuerzo:

En este caso no se trata de pequeñas, sino de grandes obras de reparación o reposición que pretenden devolver a la estructura sus prestaciones iniciales o incluso mejorarlas.

Este tipo de obras pueden suponer una modificación de las características de la estructura, bien introduciendo algún elemento nuevo que no existía en la original (nuevos elementos de drenaje, nuevo tipo de junta), o bien modificando las características funcionales y prestacionales de elementos existentes (nuevo sistema de contención, aplicación de un tratamiento de protección frente a la penetración en paramentos de hormigón) o incluso incrementando su resistencia (reconstrucción de paramentos de hormigón, refuerzo con fibras de carbono, recalces, etc.).

Estas actividades que implican un cambio de la configuración y características de la estructura original se engloban dentro de estas actuaciones de rehabilitación y refuerzo.

Así pues, el mantenimiento ordinario y la renovación de elementos por finalización de vida útil, con su inspección y evaluación correspondientes, es el conjunto de operaciones que permiten mantener una estructura con un nivel de prestaciones superior a un umbral mínimo, que se traduce en que las características funcionales, resistentes, durables e incluso estéticas sean lo más parecidas posible a las originales con que la estructura fue construida.

No obstante, una estrategia de conservación no puede basarse únicamente en operaciones de mantenimiento o renovación, sino que es necesario cada cierto tiempo, realizar actuaciones de rehabilitación o refuerzo que permitan recuperar las características resistentes y funcionales da la estructura.

Para la redacción del PMT_M30 se aplicarán no solo las bases definidas hasta el momento, sino también los aspectos extraídos de los informes de inspecciones principales. Según estos aspectos, los tramos se califican según cuatro colores, correspondientes a los índices de estado, descritos en el apartado Evaluación: verde, amarillo, naranja o rojo. Para la adopción de los criterios de actuación se establecen dos grupos, por un lado, los tramos verdes o amarillos, y por otro los calificados como naranjas o rojos.

A continuación, se establecen las operaciones que se fijan en estos dos grupos:

Operaciones en tramos o recintos con índice de estado verde, amarillo:

El objetivo fundamental para estos tramos consiste en mantener el índice de estado de una Inspección Principal a otra, y la estrategia a seguir según las bases definidas anteriormente, pasa por llevar a cabo los siguientes tipos de actuaciones,

Operaciones de mantenimiento ordinario programadas:

Estas operaciones, recogidas en el Bloque 1, se realizarán de forma continua a todo lo largo del periodo en servicio de la estructura y desde la puesta en marcha del presente plan.

Las actividades del bloque 1 para operaciones de mantenimiento ordinario programadas incluyen básicamente la limpieza canaletas, eflorescencias, vitrex, dovelas, etc.

Operaciones de mantenimiento ordinario según necesidad:

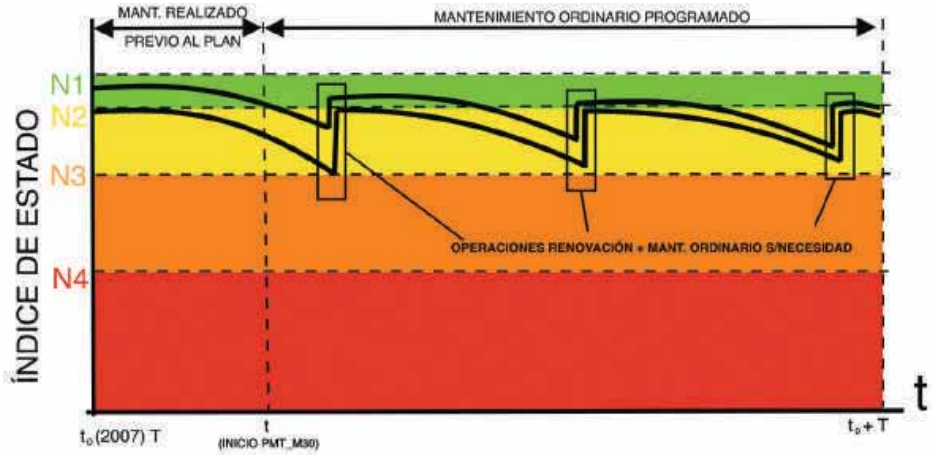
Estas operaciones, recogidas también en el Bloque 1, se realizarán en aquellos tramos o espacios verdes o amarillos que, entre dos Inspecciones Principales Detallas consecutivas, su índice de estado empeore desde verde o amarillo a peor.

En este caso, las actividades del bloque 1 recogen trabajos, tales como: saneo, sellado e inyección de fisuras, repintados, reparación de coqueras, sellado de juntas abiertas, retirada de recubrimientos mal adheridos y reconstrucción de paramentos deteriorados, reconstrucción de elementos que no cumplan adecuadamente su función de drenaje o desagüe, reposición de paneles y falso techo, actuaciones en apoyos, etc..

Operaciones de renovación:

Estas operaciones se realizan según necesidad por finalización de la vida útil del elemento, generalmente tras una Inspección principal detallada o Inspección especial, justificadas adecuadamente.

No es posible definir todas las posibles operaciones a realizar, debido a la enorme casuística que se puede presentar.



Las labores de mantenimiento tratan de mantener las estructuras entre los índices de estado 1 y 2. Como se detalla en la gráfica, desde el inicio de los trabajos que se reflejan en el plan de mantenimiento, donde se define el estado de cada estructura, el paso del tiempo conlleva una pérdida de prestaciones, que hace que vaya descendiendo su índice de estado. Aunque esta disminución es normalmente asintótica, siempre y cuando las actividades de mantenimiento se realicen de manera adecuada, el paso del tiempo hace que llegado cierto momento, el deterioro de las estructuras aumente drásticamente. Ello supone que para poder volver a tener un nivel 1 ó 2 durante mucho más tiempo, sea necesario realizar operaciones de renovación, así como realizar labores de mantenimiento ordinario según la necesidad de la estructura. Estas actividades habrá que realizarlas cuando las inspecciones periódicas indiquen que existe riesgo para la estructura de caer en un nivel de servicio 3. Es evidente que cuanto más se posponga la realización de estas actividades especiales, que conllevan una mejora puntual de la estructura, más costosas son habitualmente y menor eficacia se puede conseguir con ellas.

Operaciones en tramos o recintos con índice de estado naranjas o rojos:

El estado en que se encuentran los tramos naranjas y rojos es precario, por lo que el objetivo y la estrategia de conservación difieren de la referida para los tramos verdes y amarillos.

Es precisamente este estado el que daría lugar a la necesidad de llevar a cabo proyectos de rehabilitación globales que devolviesen a la estructura sus condiciones iniciales, pero la imposibilidad de llevar a cabo estos proyectos por su duración y afección a la explotación, es lo que ha llevado a contemplar la posibilidad de ejecutar proyectos puntuales de rehabilitación y a la realización de operaciones extraordinarias de abono independiente.

Hasta que esa intervención se produce, se debe ejecutar actuaciones de mantenimiento ordinario que ralenticen los procesos de deterioro. Estas son las incluidas en el denominado Bloque 2. Estas actividades recogen labores de limpieza, repintado y canalización de filtraciones, pero al tratarse de problemas generalizados no conllevan la reparación completa de los problemas existentes, si no que tratan de que los daños no se vean agravados.

Por tanto, las operaciones a realizar en estos tramos son las siguientes:

- Operaciones de mantenimiento ordinario programadas:

  Corresponden al Bloque 2, se realizarán de forma continua a todo lo largo del periodo en servicio de la estructura y desde la puesta en marcha del PMT_M30.

- Operaciones de mantenimiento ordinario según necesidad:

  También corresponden al Bloque 2, se realizarán de forma continua a todo lo largo del periodo en servicio de la estructura y desde la puesta en marcha del presente plan, con objeto de ralentizar los efectos dañinos de los agentes agresivos, pero no eliminan la causa del deterioro.

- Operaciones de conservación de carácter extraordinario:

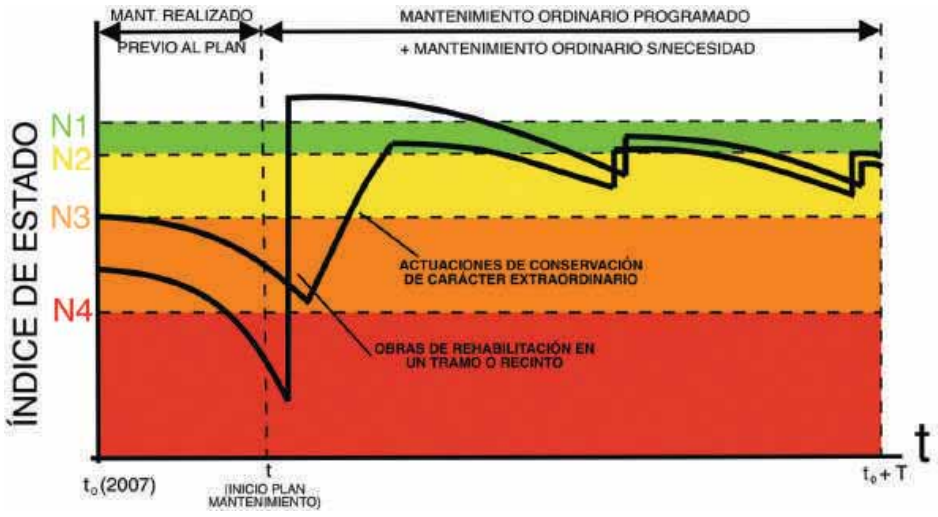
  Estas corresponden al Bloque 3. Se realizarán en aquellos tramos con un nivel de deterioro acusado y evolución desfavorable, tras una Inspección principal detallada o inspección especial, justificadas de manera conveniente.

- Operaciones de renovación:

  Estas operaciones se realizan según necesidad por finalización de la vida útil del elemento, generalmente tras una inspección principal detallada o inspección especial, justificadas adecuadamente.

- Operaciones de rehabilitación y/o refuerzo:

  Se llevarán a cabo en zonas localizadas del túnel o recintos con mayor nivel de deterioro, es decir zonas de estado rojo, tras una Inspección especial, justificada de manera conveniente y la posterior redacción de un proyecto de construcción.



Cuando nos encontramos con estructuras con índice de estado 3 ó 4, es completamente necesario ejecutar actividades que superan las labores de mantenimiento habitual, para revertir el deterioro acelerado que, como se puede ver en la gráfica, se están produciendo en la estructura. En algunas ocasiones, la estructura mejora realizando en sus elementos actuaciones de conservación de carácter extraordinario, a lo largo de un periodo determinado. En cambio, en otras circunstancias, es imprescindible realizar obras de rehabilitación para llevar a la estructura a un índica 1 ó 2. A partir, de la recuperación de índices de estado a verdes o amarillos, se puede actuar en la estructura con labores de mantenimiento habituales, como las definidas en el punto anterior.

En definitiva, una estrategia de conservación basada únicamente en operaciones de mantenimiento puede no ser eficaz, sino que necesita cada cierto tiempo la realización de actuaciones de rehabilitación o refuerzo que permitan recuperar las características resistentes y funcionales de la estructura, que habían disminuido debido al inexorable deterioro de uno o varios de sus elementos o frente a un incremento de solicitaciones. Solo así, la estrategia de conservación será congruente con el proceso de deterioro de las estructuras y, se podrá garantizar la eficacia de esta.

Todas y cada una de las operaciones se definen con fichas de intervención donde además de los datos anteriores, se definen los criterios de actuación, el proceso de reparación a seguir, y los medios necesarios para ello, detallando cada uno de los pasos a realizar en la operación.

5. DOCUMENTACIÓN

La documentación para incorporar al sistema de gestión debe incluir:

- Partes de actuaciones de conservación realizadas
- Informes y/o proyectos de rehabilitación y sus correspondientes informes de obra
- Datos de ensayos para el seguimiento de la mejora de la agresividad del ambiente en los túneles, según se indica en el informe de estrategia de durabilidad.

Podríamos resumir el esquema general de la gestión de las estructuras del túnel en:

RESUMEN DEL ESQUEMA GENERAL DE GESTIÓN DE LA CONSERVACIÓN DE LA ESTRUCTURAS DE CALLE 30			
	Nivel de inspección/evaluación	**Nivel de intervención**	**Documento de referencia**
Estructuras en túnel	Inspecciones rutinarias (vigilancia diaria / 6 meses / 30 meses)	Operaciones de mantenimiento ordinario programadas	Plan de mantenimiento y conservación de estructuras de Calle 30
	Inspecciones principales + evaluación	No aplica	
	Inspecciones principales detalladas + evaluación (5 años)	Operaciones de mantenimiento ordinario según necesidad	
		Operaciones de renovación de elementos	
	Inspecciones especiales + evaluación (según necesidad)	Actuaciones de conservación de carácter extraordinario	
		Obras de rehabilitación y/o refuerzo (*)	Proyecto de construcción

(*) Las obras de rehabilitación y refuerzo pueden tramitarse también a raíz de las inspecciones principales

MIGRACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE TÚNELES EN EXPLOTACIÓN A SCADAS ABIERTOS. BEIRA INTERIOR UN CASO DE ÉXITO DESPUES DE UN AÑO DE EXPERIENCIA

Antonio O. Martín Crisenti
Director de Transportes y Comunicaciones de COMSA INDUSTRIAL, S.A.U.
Eduard Cuadrat
Jefe de obra COMSA INDUSTRIAL, S.A.U.

La migración de los sistemas de control de túneles en el momento en que han llegado al final de su vida útil es hoy en día una necesidad, tanto por razones de economía como de operatividad.

La A23 de Beira Interior cuenta con un corredor de túneles que está compuesto por 8 túneles unidireccionales con dos carriles cada uno. Los de Alpedrinha de 310 m, los de Gardunha de 1.595m, los de Ramela de 320 m y los de Barraçao de 360m. Estaban equipados con 7 ERU de control, 4 servidores locales y un centro de control. No estaban todos los sistemas de control integrados y faltaban ciertas funcionalidades. El coste de Mantenimiento y ampliaciones era muy elevado por estar obligatoriamente ligados a un único suministrador. Una vez tomada la decisión de migrar los controladores locales y el SCADA de control, aprovechando la red de comunicaciones existente, se vieron algunas dificultades, pero especialmente la falta de documentación sobre lo existente que hubo que reconstruirla realizando ingeniería inversa.

La renovación del software propietario se realiza con el SCADA abierto System Platform de Wonderware y las ERUs se reemplazan por PLCs redundantes de alta disponibilidad de Schneider.

El plazo total del proyecto fue de más de un año, siendo el retraso causado en gran parte por la pandemia de COVID y el cierre de fronteras. El plazo de ejecución de la migración fue de únicamente 3 semanas para los 8 túneles con mínimas afectaciones al tráfico durante este periodo.

La implantación de softwares abiertos y de equipos industriales tipo PLC ha eliminado la cautividad que ha existido en el control de túneles, abriendo para el cliente la posibilidad de poder seleccionar diferentes integradores haciendo el mercado más competitivo.

Los SCADAS comerciales tipo Wonderware permiten integrar todos los subsistemas existentes en los túneles, optimizando las funcionalidades existentes y las integraciones.

La migración realizada se ha asumido rápidamente por los operadores de centro de control al ser el software y la integración más sencillo de explotar que los sistemas existentes y estar totalmente integrados.

MIGRATION OF TUNNEL CONTROL SYSTEMS FROM OPERATING TUNNELS TO OPEN SCADAS. BEIRA INTERIOR A SUCCESS STORY AFTER ONE YEAR OF EXPERIENCE

The migration of tunnel control systems at the time they have reached the end of their useful life is today a necessity, both for reasons of economy and operability.

The Beira Interior A23 has a tunnel corridor that is made up of 8 unidirectional tunnels with two lanes each. Those of Alpedrinha of 310m, those of Gardunha of 1,595m, those of Ramela of 320m and those of Barraçao of 360m. They were equipped with 7 control ERUs, 4 local servers and a control centre. Not all control systems were integrated, and certain functionalities were missing. The cost of maintenance and extensions was very high as they were necessarily linked to a single supplier. Once the decision was made to migrate the local controllers and the control SCADA, taking advantage of the existing communication network, some difficulties were seen, but especially the lack of documentation on the existing one that had to be created by reverse engineering.

Proprietary software renovation is done with Wonderware's open SCADA System Platform and ERUs are replaced by highly available redundant PLCs from Schneider.

The total time of the project was more than a year, the delay being caused in large part by the COVID pandemic and the border closures. But the execution time of the migration was only 3 weeks for the 8 tunnels with minimal traffic effects during this period.

The implementation of open software and PLC-type industrial equipment has eliminated the captivity that has existed in tunnel control, opening up for the customer the possibility of being able to select different integrators, making the market more competitive.

Wonderware-type commercial SCADAs allow the integration of all existing subsystems in tunnels, optimizing existing functionalities and integrations.

The migration carried out has been quickly accepted by control centre operators as the software and integration are easier to exploit than existing systems and are fully integrated.

LA MIGRATION DES SYSTÈMES DE CONTRÔLE DES TUNNELS EN EXPLOITATION VERS LES SCADAS OUVERTS. BEIRA INTERIOR : UNE RÉUSSITE APRÈS UN AN D'EXPÉRIENCE

La migration des systèmes de contrôle des tunnels au moment où ils ont atteint la fin de leur vie utile est aujourd'hui une nécessité, à la fois pour des raisons d'économie et d'opérabilité.

La Beira Interior A23 a un couloir de tunnel composé de 8 tunnels unidirectionnels à deux voies chacun. Celles d'Alpedrinha de 310m, celles de Gardunha de 1 595m, celles de Ramela de 320m et celles de Barraçao de 360m. Ils étaient équipés de 7 ERU de contrôle, de 4 serveurs locaux et d'un centre de contrôle. Tous les systèmes de contrôle n'étaient pas intégrés et certaines fonctionnalités manquaient. Le coût de la maintenance et des extensions était très élevé car ils étaient nécessairement liés à un seul fournisseur. Une fois la décision prise de migrer les contrôleurs locaux et le SCADA de contrôle, en profitant du réseau de communication existant, certaines difficultés sont apparues, mais surtout le manque de documentation sur l'existant qui a dû être créé par rétro-ingénierie.

Le renouvellement du logiciel propriétaire est effectué avec la plate-forme système SCADA ouverte de Wonderware et les ERU sont remplacées par des API redondants hautement disponibles de Schneider.

La durée totale du projet était de plus d'un an, le retard étant causé en grande partie par la pandémie de COVID et les fermetures de frontières. Mais le temps d'exécution de la migration n'a été que de 3 semaines pour les 8 tunnels avec des effets de trafic minimes durant cette période.

La mise en place de logiciels ouverts et d'équipements industriels de type PLC a éliminé la captivité qui existait dans le contrôle du tunnel, ouvrant au client la possibilité de pouvoir sélectionner différents intégrateurs, rendant le marché plus compétitif.

Les SCADA commerciaux de type Wonderware permettent l'intégration de tous les sous-systèmes existants dans les tunnels, en optimisant les fonctionnalités et les intégrations existantes.

La migration effectuée a été rapidement acceptée par les opérateurs de centres de contrôle car le logiciel et l'intégration sont plus faciles à exploiter que les systèmes existants et sont entièrement intégrés.

1. INTRODUCCIÓN

La migración de los sistemas de control de túneles en el momento que han llegado al final de su vida útil es hoy en día una necesidad, tanto por razones de economía como por operatividad.

Esta migración de sistemas debe realizarse con la mínima interferencia al tráfico y a los usuarios, y la máxima seguridad en la operación. Requiere una detallada planificación e ingeniería y en la mayoría de los casos, por deterioro o pérdida de información y/o por desaparición o falta de colaboración del integrador anterior, una ingeniería inversa.

Asimismo, se necesita la formación de un equipo de trabajo unido entre el operador, el mantenedor de la instalación y el integrador.

2. SITUACIÓN INICIAL

La concesión A23 Beira interior une las localidades de Guarda y Torres Novas. Contando con 8 túneles unidireccionales con 2 carriles cada uno de ellos.

TÚNEL	LONGITUD (m)
Alpedrinha	310
Gardunha	1.595
Ramela	320
Barracão	360

Figura 1. Ubicación A23 Beira interior y resumen de los túneles y fotografía del centro de control.

Los túneles de Gardunha, con 1.595 m y 1.604 m. son unos túneles de carretera situados al sur de Fundao en el distrito de Castelo Branco. El primero de ellos fue abierto al tráfico a inicios de 1.997, siendo en esa fecha bidireccional con un carril por sentido y una velocidad de diseño de 60 Km por hora formando parte de la AP2. El segundo de ellos fue inaugurado en diciembre de 2.003, quedando con 2 carriles unidireccionales cada uno de ellos y pasando la velocidad nominal a 80 km por hora.

El sistema de control de estos túneles se había instalado en 2.003, contando con 7 estaciones remotas (ERU), ubicadas 4 en los túneles de Gardunha, 2 en cada boca y los 3 restantes, 1 para cada grupo de 2 túneles.

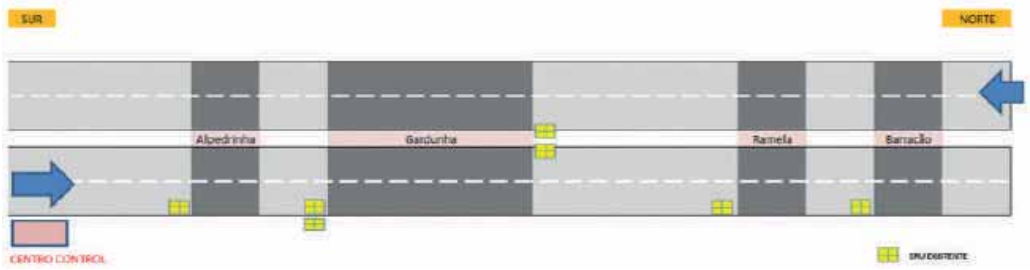


Figura 2. Esquema situación túneles de Beira.

El proyecto de migración contaba con los siguientes condicionantes:

- El espacio de las salas técnicas era muy reducido, lo que impedía instalar los nuevos equipamientos en paralelo con los existentes para hacer la migración a continuación, se debían utilizar las mismas envolventes de las ERU para instalar los PLC.
- La red de comunicaciones había sido cambiada hacía menos de 5 años, por lo que se consideraba aprovechar la misma.
- La documentación existente no estaba completa ni actualizada, faltaban cosas tan importantes como los algoritmos de ventilación e iluminación y la configuración de las ERUS. Fue necesario hacer ingeniería inversa para conocer los datos imprescindibles y definir los algoritmos requeridos para la ventilación y la iluminación.
- El software instalado era propietario con una arquitectura cliente-servidor, equipado con un servidor central y 4 servidores locales, uno en cada grupo de 2 túneles.
- No estaban integrados los sistemas de: Megafonía, CCTV, DAI, Postes SOS y Gestión de Mantenimiento asistida por ordenador (GMAO).
- Tampoco disponía de funcionalidades cómo: planes de emergencia, informes o gráficos de tendencias.

3. SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución propuesta está basada en el software abierto System Platform de Wonderware, sustituyendo las ERUs existentes por PLCs redundantes en las bocas del túnel de Gardunha y por PLCs no redundantes en las bocas del resto de túneles.

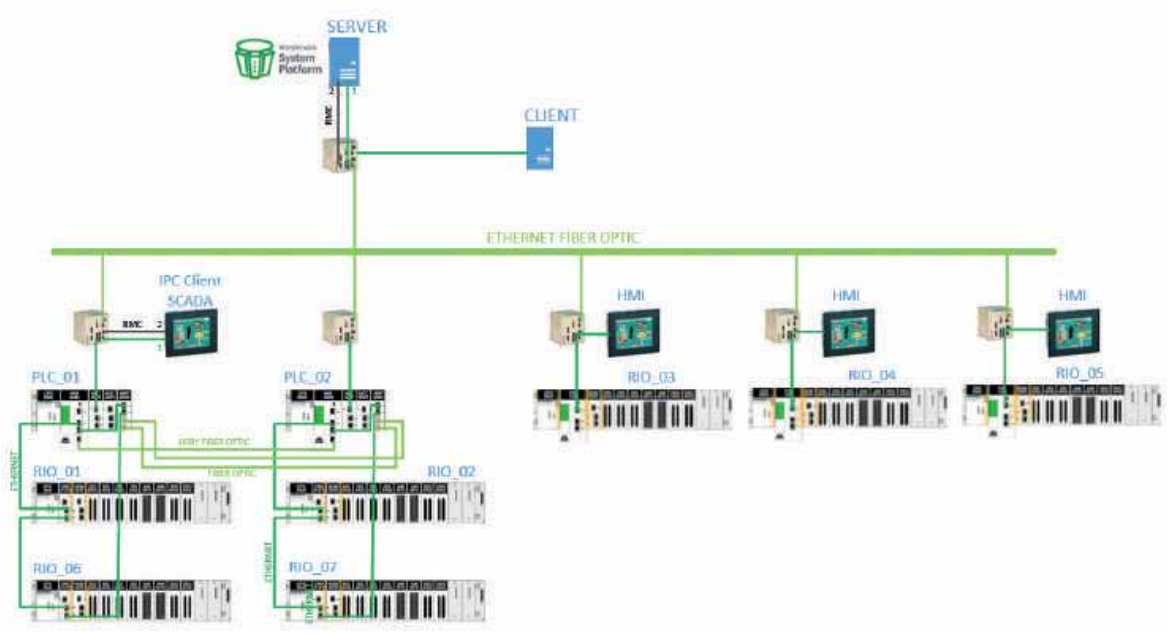


Figura 3. Arquitectura de control.

El centro de control cuenta con un servidor redundante. Los túneles de Gardunha cuentan con un cliente en boca de túneles para funcionamiento en modo degradado. Y cada uno de los otros grupos de túneles cuenta con un Hombre Máquina Interface (HMI) para este tipo de funcionamiento.

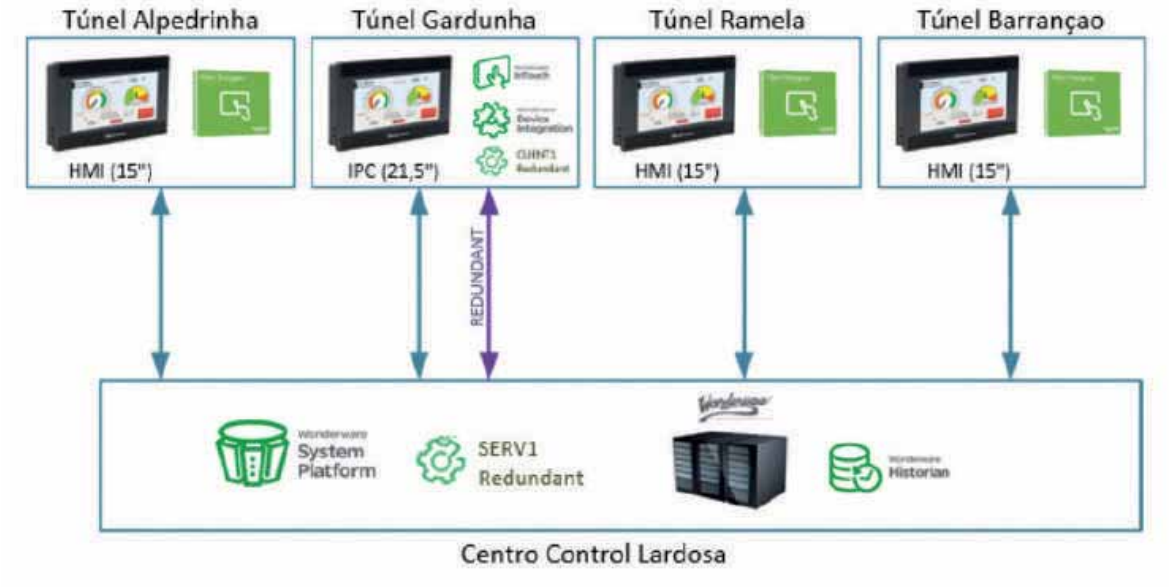


Figura 4. Funcionamiento en modo degradado.

En el centro de control se ha instalado 2 clientes con una pantalla principal de 49" (pantalla 1) y una de trabajo de 27" (pantalla 2) para optimizar la interacción y ergonomía con el operador.

Figura 5. Cliente e interface en centro de control.

Todos los sistemas estan integrados en una única aplicación y se añaden las funcionalidades que no existían en la versión inicial. Existen además de las pantallas de alarmas y el sinóptico general, tantas pantallas como sean necesarias para el detalle de los diferentes subsistemas.

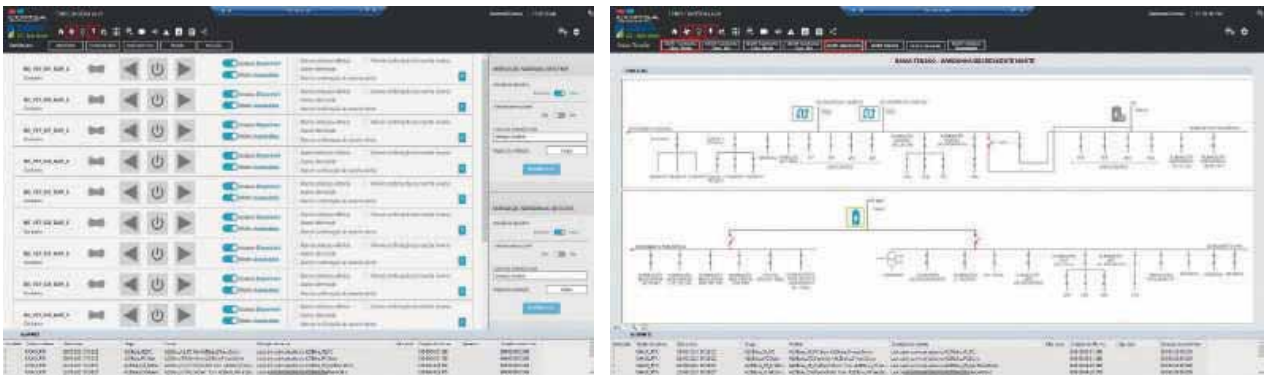


Figura 6. Pantallas específicas por subsistema.

4. PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN

La planificación inicial se aprecia en la figura 7.

En ella se preveían 10 meses de ejecución. Pero una vez una vez analizada la situación en detalle y la información existente el plazo de la toma de datos y realización de ingeniería inversa tuvo que ser ampliado a 6 meses.

FASES	TAREAS	PLAZO
FASE 1	TOMA DE DATOS	1 semana
FASE 2	INGENIERIA: Ingeniería Inversa, Esquemas de Control, Validación Cliente	2 meses
FASE 3	DESARROLLO SOFTWARE Y ALGORITMOS: Fibrolaser, Sistema DAI, Megafonía, PLCs Galerías, Planes, Informes, etc.	3 meses
FASE 4	MIGRACIÓN Y PUESTA EN MARCHA •Implantación infraestructura Base Centro de Control •Formación Básica •Migración y pruebas de cada túnel •Formación Final	3 Semanas
FASE 5	DEPURACIÓN Y NUEVOS ALGORITMOS DE VENTILACIÓN	3 meses
FASE 6	CERTIFICACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN	1 semana
FASE 7	DOCUMENTACIÓN ASBUILT	3 semanas

Figura 7. Planificación inicial.

Los desarrollos y algoritmos cumplieron sus plazos y al ir a realizar la migración y puesta en marcha, al coincidir con el cierre de fronteras por la pandemia del COVID, la fase 4 se tuvo que retrasar hasta enero del 2.021.

En la ejecución de esta fase se realizó durante la primera semana la migración de los túneles de Alpedrinha, probándose que todos los desarrollos realizados funcionaban adecuadamente. En la segunda semana se realizó la migración de los túneles de Ramela y Barraçao y en la última la de los túneles de Gardunha. Siendo finalizado en estas 3 semanas.

La depuración y los nuevos algoritmos de ventilación fueron realizados a continuación y se realizó unas pruebas de humos al finalizar esta fase, las cuales sirvieron para verificar el buen funcionamiento de todos los sistemas existentes.

Figura 8. Ensayos de humos.

5. CONCLUSIONES

Las soluciones actuales de tipo PLC presentan una funcionalidad que permite la integración total de todos los sistemas de un túnel tanto hacia los niveles superiores: Centro de Control; como para los de nivel jerárquico inferior: equipos de campo en el túnel.

La implantación de softwares abiertos y de equipos industriales tipo PLC elimina la cautividad que ha existido en el control de túneles, abriendo para el cliente la posibilidad de poder seleccionar diferentes integradores haciendo el mercado más competitivo.

La migración puede realizarse con mínimas afectaciones al tráfico en un plazo corto.

Los SCADAS comerciales tipo Wonderware permiten integrar todos los subsistemas existentes.

La migración realizada se ha asumido rápidamente por los operadores de centro.

Se han actualizado las funcionalidades existentes y se han optimizado las integraciones permitiendo con facilidad los cambios de los sistemas obsoletos.

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.

RESILIENCE ASSESSMENT TOOL FOR ROAD TUNNELS

K. Anastassiadou; U. Bergerhausen; F. Linstroem; C. Zulauf
Federal Highway Research Institute (BASt)

Dealing with disruptive events, such as a cyber-attack at a tunnel control center or a car accident with fire exposure inside a tunnel, is a major challenge for transport infrastructure owners and tunnel operators. To maintain the functionality of the transport infrastructure during disruptive events or to restore it as quickly as possible after such events, applicable concepts and methodologies are required, which enable a systematic assessment of the functionality of the road infrastructure. Based on that, adequate measures can be identified and prioritized e.g. based on their cost-effectiveness.

A resilience assessment tool for a practical implementation was developed to strengthen the resilience of a road system on a long-term basis. The approach is based on a holistic understanding of the interaction of the individual components regarding resilience and it supports the improvement of the resilience if necessary. Within the framework developed, the methodological approach consists of the three following elements: resilience screening, evaluation of measures and resilience optimization. First, within the resilience screening process, the need for action is identified using a predefined set of criteria. The result provides information to the decision makers about those fields of action, which show the highest potential for improvement. Based on that, specific measures to improve the resilience are defined. In the second step, the identified measures are assessed with respect to their impact on the system's resilience. Finally, in the third step, the effort required for the implementation of the measures (e.g. costs) are determined and set into relation to their (resilience) effectiveness. Based on the cost-effectiveness, the measures can be prioritized.

This work is carried out within the framework of the BMDV Network of Experts "Knowledge – Ability – Action" (https://www.bmvi-expertennetzwerk.de) of the German Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure.

HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA DE LOS TÚNELES DE CARRETERA

Hacer frente a sucesos perturbadores, como un ciberataque en el centro de control de un túnel o un accidente de tráfico con exposición al fuego en el interior de un túnel, es un reto importante para los propietarios de infraestructuras de transporte y los operadores de túneles. Para mantener la funcionalidad de la infraestructura de transporte durante los eventos disruptivos o para restaurarla lo más rápidamente posible después de dichos eventos, se requieren conceptos y metodologías aplicables que permitan una evaluación sistemática de la funcionalidad de la infraestructura vial. A partir de ahí, se pueden identificar las medidas adecuadas y priorizarlas, por ejemplo, en función de su rentabilidad.

Se ha desarrollado una herramienta de evaluación de la resiliencia para su aplicación práctica con el fin de reforzar la resiliencia de un sistema de carreteras a largo plazo. El enfoque se basa en una comprensión holística de la interacción de los componentes individuales con respecto a la resiliencia y apoya la mejora de la resiliencia si es necesario. Dentro del marco desarrollado, el enfoque metodológico consta de los tres elementos siguientes: cribado de la resiliencia, evaluación de las medidas y optimización de la resiliencia. En primer lugar, dentro del proceso de cribado de la resiliencia, se identifica la necesidad de actuar utilizando un conjunto predefinido de criterios. El resultado proporciona información a los responsables de la toma de decisiones sobre los campos de acción que muestran el mayor potencial de mejora. A partir de ahí, se definen las medidas específicas para mejorar la resiliencia. En el segundo paso, las medidas identificadas se evalúan con respecto a su impacto en la resiliencia del sistema. Por último, en el tercer paso, se determina el esfuerzo necesario para la aplicación de las medidas (por ejemplo, los costes) y se pone en relación con su eficacia (de resiliencia). Sobre la base de la rentabilidad, las medidas pueden priorizarse.

Este trabajo se lleva a cabo en el marco de la Red de Expertos BMDV "Conocimiento - Capacidad - Acción" (https://www.bmdv-expertennetzwerk.de) del Ministerio Federal de Transporte e Infraestructura Digital de Alemania.

OUTIL D'ÉVALUATION DE LA RÉSILIENCE DES TUNNELS ROUTIERS

Faire face à des événements perturbateurs, tels qu'une cyber-attaque contre un centre de contrôle d'un tunnel ou un accident de voiture avec exposition au feu à l'intérieur d'un tunnel, est un défi majeur pour les propriétaires d'infrastructures de transport et les exploitants de tunnels. Pour maintenir la fonctionnalité de l'infrastructure de transport pendant les événements perturbateurs ou pour la rétablir aussi rapidement que possible après de tels événements, des concepts et des méthodologies applicables sont nécessaires, qui permettent une évaluation systématique de la fonctionnalité de l'infrastructure routière. Sur cette base, des mesures adéquates peuvent être identifiées et classées par ordre de priorité, par exemple en fonction de leur rapport coût-efficacité.

Un outil d'évaluation de la résilience pour une mise en œuvre pratique a été développé pour renforcer la résilience d'un système routier à long terme. L'approche est basée sur une compréhension holistique de l'interaction des composants individuels en ce qui concerne la résilience et elle soutient l'amélioration de la résilience si nécessaire. Dans le cadre développé, l'approche méthodologique se compose des trois éléments suivants : l'examen de la résilience, l'évaluation des mesures et l'optimisation de la résilience. Tout d'abord, dans le cadre du processus d'examen de la résilience, le besoin d'action est identifié à l'aide d'un ensemble de critères prédéfinis. Le résultat fournit des informations aux décideurs sur les domaines d'action qui présentent le plus fort potentiel d'amélioration. Sur cette base, des mesures spécifiques visant à améliorer la résilience sont définies. Dans la deuxième étape, les mesures identifiées sont évaluées en fonction de leur impact sur la résilience du système. Enfin, dans la troisième étape, l'effort requis pour la mise en œuvre des mesures (par exemple, les coûts) est déterminé et mis en relation avec leur efficacité (résilience). Sur la base du rapport coût-efficacité, les mesures peuvent être classées par ordre de priorité.

Ce travail est réalisé dans le cadre du réseau d'experts BMDV "Connaissance - Capacité - Action" (https://www.bmdv-expertennetzwerk.de) du ministère fédéral allemand des transports et de l'infrastructure numérique.

1. INTRODUCTION

A reliable transport infrastructure makes a significant contribution to social prosperity by ensuring security of supply and meeting the mobility needs of the population and the economy.

Failures of the transport infrastructure caused, for example, by natural events, human intervention or technical failure can lead to high economic costs if they result in prolonged interruptions of critical route elements. A growing need for mobility, aging infrastructures, and the increase in external stress factors such as climate change pose additional challenges for transport infrastructure operators. At the same time, it is important to recognize the opportunities, risks, and challenges of digitization and to integrate them into infrastructure management. Comprehensive infrastructure management is therefore indispensable for high availability and maintaining functionality in the event of an incident. Today, infrastructure managers use a wide variety of management systems for this purpose, such as building management, maintenance management or incident management. What is still lacking today is a holistic, systematic management system that assesses the overall system resilience and enables the evaluation of measures with regard to their contribution to maintaining the functionality of the transport infrastructure. In this way, existing approaches could be linked, which would facilitate the management of an increasing number of external stress factors and make it possible to keep the economic costs low.

This research project builds on the methodological approach and considerations from Deublein et al. (2021) by optimizing and further developing the existing approach to assessing the resilience of road infrastructures in terms of methodology and content. Another focus is on the transfer into practice. For this purpose, a web-based IT tool is being developed that can be used to assess the resilience of road infrastructure and the resilience effect of measures. To facilitate the use of the IT tool, a user guide is developed. An implementation concept shows how the methodology and IT tool are to be applied in Practice.

This way, an important milestone for the integration of resilience assessment as an integral part of transport infrastructure management will be reached and the basis for a transfer of theoretical concepts from research to practice, so that decisions in infrastructure management to maintain the functionality of roads can be better prepared and measures or investments better justified in the future.

2. METHODOLOGY

A technical concept was developed in which the concrete, overriding requirements for the methodology, the web-based IT tool, the user guide and the implementation concept are defined and documented in the form of a specification sheet. The technical concept represents the starting point for the optimization and further development of the content of the methodology and the implementation. The technical concept ensures that the development and implementation of the methodology can be carried out in a targeted manner.

3. RESULTS

3.1. Methodological concept for resilience assessment

Fig. 1 below schematically shows the resilience assessment process as it presents itself to the user.

The user works out the regular planning of measures in his field of expertise (e.g., construction management, maintenance management or traffic management) for a network element or a road section and/or for specific infrastructure elements of such. Thus, the goal is that no separate investigation is required for the resilience assessment, but that it is embedded in existing management systems and their processes.

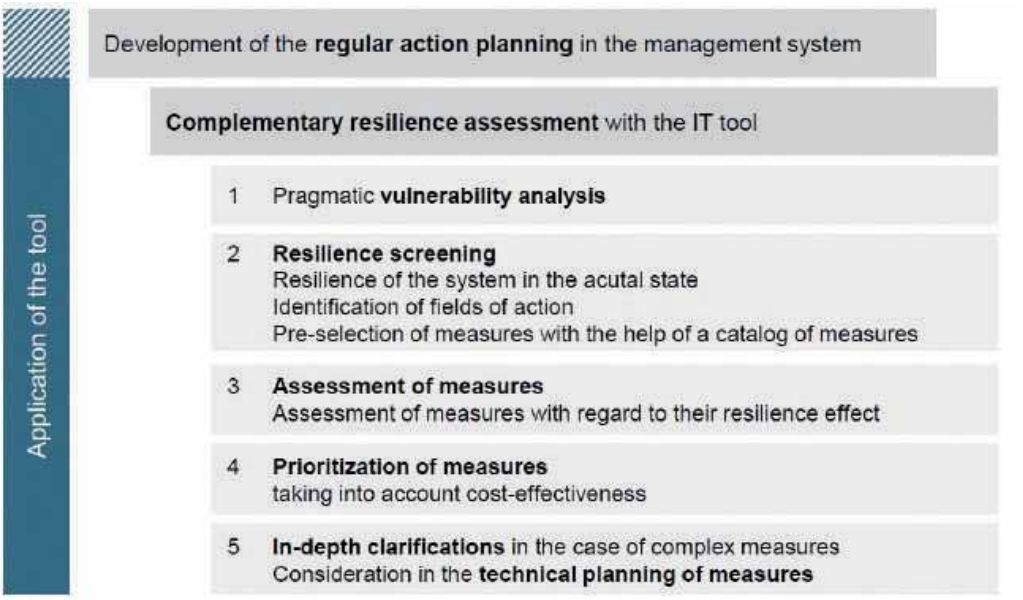


Fig. 1. Schematic representation of the resilience assessment process.

If a network element or a road section is assessed from the perspective of the department, a supplementary resilience assessment is carried out with the help of the tool:

1. Vulnerability analysis: The first step is to make a pragmatic assessment of the vulnerability of the road section and/or for specific infrastructure elements. This is based on an assessment of route-specific characteristics (e.g., traffic volume, capacity utilization, alternative access options, etc.) and an assessment of the exposure to hazards with regard to the guarantee of functionality (e.g., natural hazards, technical hazards, etc.).

2. Resilience screening: The aim of the second step is the overall examination of the resilience of a system in its current state, considering any measures already planned, as well as the identification of potential fields of action in which the system performance should be improved with regard to its resilience.

3. Assessment of measures: The identified potential measures are then assessed in terms of their resilience effect. The resilience effect of a measure can be determined by its influence on the course of the resilience curve (Fig. 2.). Measures change either the frequency of occurrence of disruptive events or the course of the functionality curve after a disruptive event and thus also the resilience of the system by reducing the absolute (vertical) loss of functionality on the one hand and the duration of impact (horizontal) on the other.

4. Resilience optimization: Based on the determined resilience effect and considering a cost-effectiveness analysis of the individual measures, a ranking list of prioritized measures or combinations of measures is drawn up that is optimal for the resilience of the system. This prioritized ranking list serves as an aid to the decision maker in selecting the most efficient resilience measures and in implementing consistent resilience management.

As a result, the resilience assessments yield a list of supplemental or adapted departmental measures that could be considered from the perspective of maintaining the function of the roadway segment and/or infrastructure elements and an associated pragmatic rating. Additional measures that are judged to be expedient, which on the one hand are relatively simple to implement and do not entail any significant cost consequences, and on the other hand lie within the area of responsibility of the respective department, are to be included directly in the planning of measures wherever possible. In addition, the analysis results in potentially sui-

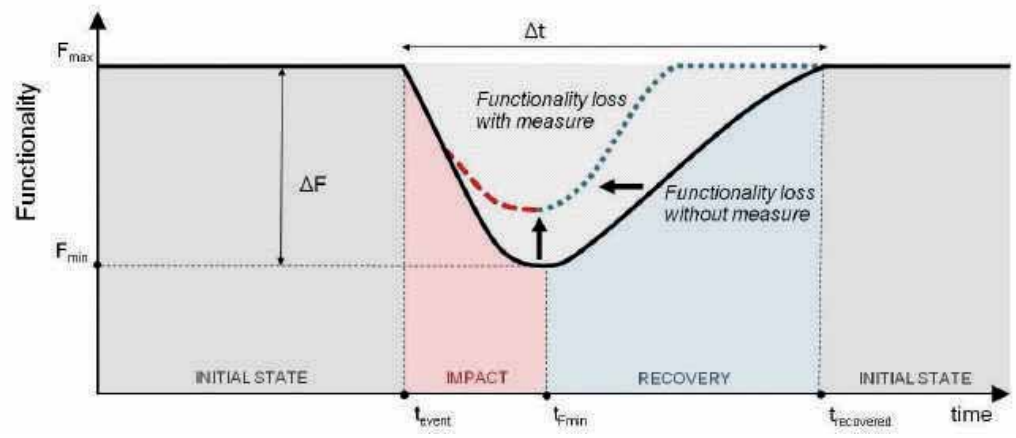


Fig. 2 Effect of the measures on the functionality of the system - represented by black arrows. The impact of a measure on the resilience is characterized by its effect on the total loss of functionality ΔF = Fmax - Fmin and its required time to recover after a disruptive event Δt = trecovered - tevent.

table measures for improving resilience. The appropriateness and proportionality of these measures should be analyzed in greater depth in a further step. These are typically cost-intensive measures or those that are very time-consuming to implement, for example, due to the need for approvals or coordination with different responsible parties.

3.2. IT tool and user guide

The developed methodology concept was implemented in an IT tool. The tool allows users to pragmatically assess additional measures from a resilience perspective. It also allows for an assessment or ranking of their appropriateness in terms of an initial assessment.

By implementing the elaborated methodology in the form of a web-based IT tool, a comprehensive integration of the resilience approach in practice should be facilitated. In addition, the IT tool should enable users to recognize the added value of the resilience assessment for their daily work and to develop an interest in the topic of resilience.

In order to show the user, the functionalities and the handling of the tool, a user guide was created. The user guide explains the most important functionalities of the tool by means of a short description and corresponding screenshots and illustrations and shows step by step how to use the IT tool. The language, scope and level of detail are aimed at these users and should make it easier for them to use the IT tool in practice.

The following technical requirements for the IT tool were defined during interviews with experts and stakeholders:

- Simple and pragmatic use: The methodology should be easy to use (e.g., selecting a route element to calculate the impact of a closure on secondary routes).
- Usability: The tool should be easy to use and self-explanatory. The technical design should be as simple as possible, for example regarding data entry or an automatic check of the completeness of the data required. An assisted application would also be desirable, guiding users step by step and briefly explaining the required entries and selections.
- Compatibility and interfaces: The tool should be compatible with widely used systems/databases and interfaces. Existing data should be easy to import or export (e.g. road traffic data).

Usability as well as performance checks were part of the development process.

3.3. Implementation concept

With the implementation of the methodology in an application-oriented IT tool, the foundations are laid to be able to consider the issue of resilience of road sections or network elements of the road network in existing management systems and action planning in the future. However, this also requires a concept that supports the implementation of the developed resilience approach and the IT tool in practice. Ultimately, the concept and the tool will only add value and increase the resilience of transport systems if they are accepted and applied in practice. The implementation concept is based on the three pillars shown in Fig. 3.

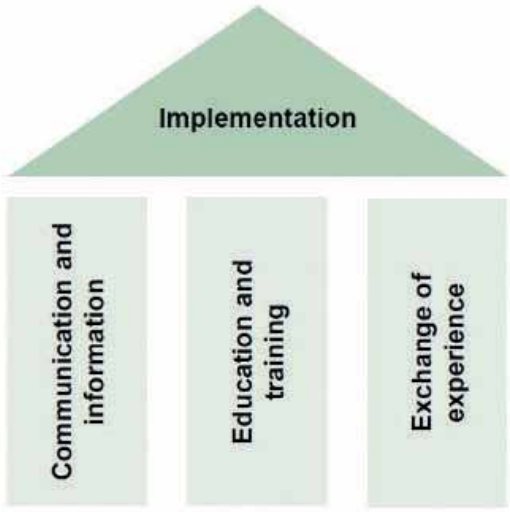


Fig. 3. Three pillars of the implementation concept.

The three pillars include the following activities:

- Communication and information: Information through existing websites, sending newsletters, information through networks, working groups and associations, and information to a wide audience through contributions at professional meetings and conferences. A good coordination of the activities is crucial.
- Education and training: The user should be answered "How is the concept or the IT tool embedded?" and "How do I apply the concept or the IT tool?". For this purpose, it is recommended to provide offers (tutorials, webinars, day courses, etc.). Individualized on-site trainings complement the training of the users. It is recommended to choose a pragmatic and easy-to-implement approach and to build on experience.
- Exchange of experience: Short term, the aim should be to increase awareness of the concept and the IT tool, to demonstrate its benefits and to provide assistance to interested users. Medium term, the experience gained should be compiled and the findings incorporated into further development.

CONCLUSION

With this research, an important milestone for the integration of resilience assessment as a component of transport infrastructure management has been achieved and the foundation laid for transferring theoretical concepts from research to practice, so that decisions in infrastructure management to maintain the functionality of roads can be better prepared and measures or investments better justified in the future.

In addition to the further development of the methodology, a web-based IT tool was developed. The IT tool is intended to help managers and owners of transport infrastructure to assess the resilience of their infrastructure. The definition of the system to be assessed, the netscreening and the hazard analysis serve as essential fundament for the resilience screening, the evaluation of resilience improving measures and the resilience optimization. Different infrastructure elements can be assessed on object level (e.g. bridges, tunnels). As s result an overview of possible resilience measures and their impact on the system's resilience is given (Anastassiadou et al., 2020).

To facilitate the use of the IT tool, a user guide as well as an implementation concept were developed showing how the methodology and IT tool are to be applied in practice.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is carried out within the framework of the BMVI Network of Experts "Knowledge – Ability – Action" (https://www.bmvi-expertennetzwerk.de) of the German Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure as part of Topic 3 "Reliable transport infrastructure".

REFERENCES

Anastassiadou, Kalliopi; Bergerhausen, Ulrich; Roth, Franziska; Deublein, Markus (2020): Identification and prioritization of resilience measures for road infrastructures. In: Toni Lusikka (Hg.): Rethinking transport - towards clean and inclusive mobility. Proceedings of TRA2020, the 8th Transport Research Arena. Finnland: Finnish Transport and Communications Agency Traficom (Traficom research reports, 7 (2020)).

Anastassiadou, Kalliopi; Lindström, Franziska; Zulauf, Christoph (2022): A practice-oriented approach for increasing road infrastructure resilience. In: o.A. (Hg.). Proceedings of 3rd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure. International Conference on Natural Hazards & Infrastructure. Athens, Greece.

Deublein, Markus; Roth, Franziska; Bruns, Frank; Zulauf, Christoph (Hg.) (2021): Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen. = Response and recovery process for the road infrastructure after disruptive events. EBP Schweiz; Bundesanstalt für Straßenwesen; Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für Neue Wissenschaft. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau, Heft 165).

Deublein, Markus; Roth, Franziska; Bruns, Frank; Zulauf, Christoph (Hg.) (2020): Stand der Technik hinsichtlich der Bewertung von Resilienzmaßnahmen = State of the art regarding the evaluation of resilience measures. EBP Schweiz; Bundesanstalt für Straßenwesen (Report in the context of the BASt road infrastructure research program FE 89.0320/2016).

Lindström, Franziska; Zulauf, Christoph et al (Hg.) (2022): Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur = Optimization and further development of action tools for resilience assessment of transport infrastructure. EBP Schweiz; Bundesanstalt für Straßenwesen; Entwurf Schlussbericht (unveröffenlticht)

IMPROVING ROAD TUNNEL RESILIENCE BY DYNAMIC RISK ANALYSIS

Alessandro Focaracci
Prometeoengineering.it.Srl

The Smart Tunnel allows a new approach to safety in tunnels that uses innovative technologies to have accurate information about the security system, traffic and environmental conditions in order to manage operational or additional measures and achieve high levels of safety.

In this context, the SCADRA system (configured as a new SCADA system layout) is a powerful prevention tool capable of performing a Dynamic Risk Analysis. This analysis allows to obtain immediate and effective benefits through the implementation of operational measures in road tunnels where advanced systems and sensors are installed, allowing to identify the operational measures from time to time more adequate to maintain the levels of safety within the values accepted by the Administrative Authority and set within the limits provided by the Regulation.

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, both under normal operating conditions and in the event of sudden changes in traffic conditions, environmental conditions or the level of systems functioning for an immediate re-evaluation of security conditions.

In order to ensure a sufficient minimum level of safety for road users, road tunnels must provide for the adoption of preventive measures to reduce critical situations which may endanger human life, the environment and tunnel installations, as well as protection measures in the event of an accident.

By means of a dynamic risk analysis and on the basis of the expected level of risk, preventive measures such as the reduction of speed limits, the minimum distance between vehicles and the prohibition of overtaking for heavy goods vehicles may be envisaged, but can also be activated protection measures such as user communications, fire alarm, system power saving mode interruption.

The concept perfectly fits within improving road tunnel resilience: it is possible to know real time what happens inside the tunnel, the environmental conditions, traffic data and system status to apply operational measures in order to ensure the safety required.

The application of the SCADRA system is also suitable for existing tunnels using innovative low-cost technologies that also allow to improve safety in old tunnels, through operational measures that integrate the systems and, if necessary, replace the lack of requirements.

This paper will present how SCADRA system can improve road tunnel resilience. The result of the first installations of the SCADRA System in Road Tunnels will also present.

MEJORA DE LA RESISTENCIA DE LOS TÚNELES DE CARRETERA MEDIANTE EL ANÁLISIS DINÁMICO DE RIESGOS

El Túnel Inteligente permite un nuevo enfoque de la seguridad en los túneles que utiliza tecnologías innovadoras para disponer de información precisa sobre el sistema de seguridad, el tráfico y las condiciones ambientales con el fin de gestionar las medidas operativas o adicionales y lograr altos niveles de seguridad.

En este contexto, el sistema SCADRA (configurado como una nueva disposición del sistema SCADA) es una potente herramienta de prevención capaz de realizar un Análisis Dinámico de Riesgos. Este análisis permite obtener beneficios inmediatos y efectivos a través de la aplicación de medidas operativas en los túneles de carretera donde se instalan sistemas y sensores avanzados, permitiendo identificar las medidas operativas cada vez más adecuadas para mantener los niveles de seguridad dentro de los valores aceptados por la Autoridad Administrativa y fijados dentro de los límites previstos por el Reglamento.

A través de la elaboración y el análisis de todos los parámetros adquiridos de los sensores y del sistema, se lleva a cabo una supervisión continua del nivel de seguridad del túnel, realizando el Análisis Dinámico del Riesgo a intervalos regulares preestablecidos, tanto en condiciones normales de funcionamiento como en caso de cambios repentinos en las condiciones de tráfico, las condiciones ambientales o el nivel de funcionamiento de los sistemas para una reevaluación inmediata de las condiciones de seguridad.

Para garantizar un nivel mínimo de seguridad suficiente para los usuarios de la carretera, los túneles de carretera deben prever la adopción de medidas preventivas para reducir las situaciones críticas que puedan poner en peligro la vida humana, el medio ambiente y las instalaciones del túnel, así como medidas de protección en caso de accidente.

AMÉLIORATION DE LA RÉSILIENCE DES TUNNELS ROUTIERS PAR L'ANALYSE DYNAMIQUE DES RISQUES

Le Smart Tunnel permet une nouvelle approche de la sécurité dans les tunnels qui utilise des technologies innovantes pour disposer d'informations précises sur le système de sécurité, le trafic et les conditions environnementales afin de gérer des mesures opérationnelles ou supplémentaires et d'atteindre des niveaux de sécurité élevés.

Dans ce contexte, le système SCADRA (configuré comme une nouvelle configuration du système SCADA) est un puissant outil de prévention capable d'effectuer une analyse dynamique des risques. Cette analyse permet d'obtenir des bénéfices immédiats et efficaces par la mise en œuvre de mesures opérationnelles dans les tunnels routiers où sont installés des systèmes et des capteurs avancés, permettant d'identifier les mesures opérationnelles de temps en temps plus adéquates pour maintenir les niveaux de sécurité dans les valeurs acceptées par l'Autorité administrative et fixées dans les limites prévues par le règlement.

Grâce à l'élaboration et à l'analyse de tous les paramètres acquis à partir des capteurs et du système, une surveillance continue du niveau de sécurité du tunnel est effectuée, en réalisant l'analyse dynamique du risque à intervalles réguliers préétablis, aussi bien dans des conditions normales d'exploitation qu'en cas de changements soudains des conditions de trafic, des conditions environnementales ou du niveau de fonctionnement des systèmes pour une réévaluation immédiate des conditions de sécurité.

Afin d'assurer un niveau minimal de sécurité suffisant pour les usagers de la route, les tunnels routiers doivent prévoir l'adoption de mesures préventives pour réduire les situations critiques qui peuvent mettre en danger la vie humaine, l'environnement et les installations du tunnel, ainsi que des mesures de protection en cas d'accident.

Figure 1 – SCADRA system logo

INTRODUCTION

The resilience of a tunnel has been defined, by the PIARC Technical Committee 4.4 "Tunnel", as "The ability to prepare and plan, resist / absorb, recover or adapt more successfully (promptly and efficiently) to the actual or potential negative effects of events or developments affecting the use of a tunnel. In this context, an acceptable level of safety is an essential constraint for the availability of the tunnel".

From the results of the first installations, the Supervisory Control Acquisition Dynamic Risk Analysis (SCADRA system) is proving to be a powerful prevention tool that significantly increases the resilience of road tunnels. Since 2019, the system is installed in tunnels with different structural and technological characteristics and with different environmental and traffic characteristics, and the results are clear and consistent with each other, as shown by the analysis of the data of the first plants.

1. THE SCADRA SYSTEM

The SCADRA configuration sets alongside the traditional SCADA, a system of acquisition of all the parameters, that can have influence in the tunnel management (not acquisitioning only fault and malfunctions of the systems, but also type and traffic intensity, dangerous goods and vehicles presence, air quality, visibility, wind speed, etc.) in order to acquire 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 2 - Smart Tunnel with SCADRA

The equipment installed elaborates an analysis on a series of external input data. These external input data have been 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 changes;
- Variable inputs are the input data that may vary over time, such as the weather situation, the vehicular flow data 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 tunnel.

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.

In the following figure, the SCADRA Flow Diagram is shown.

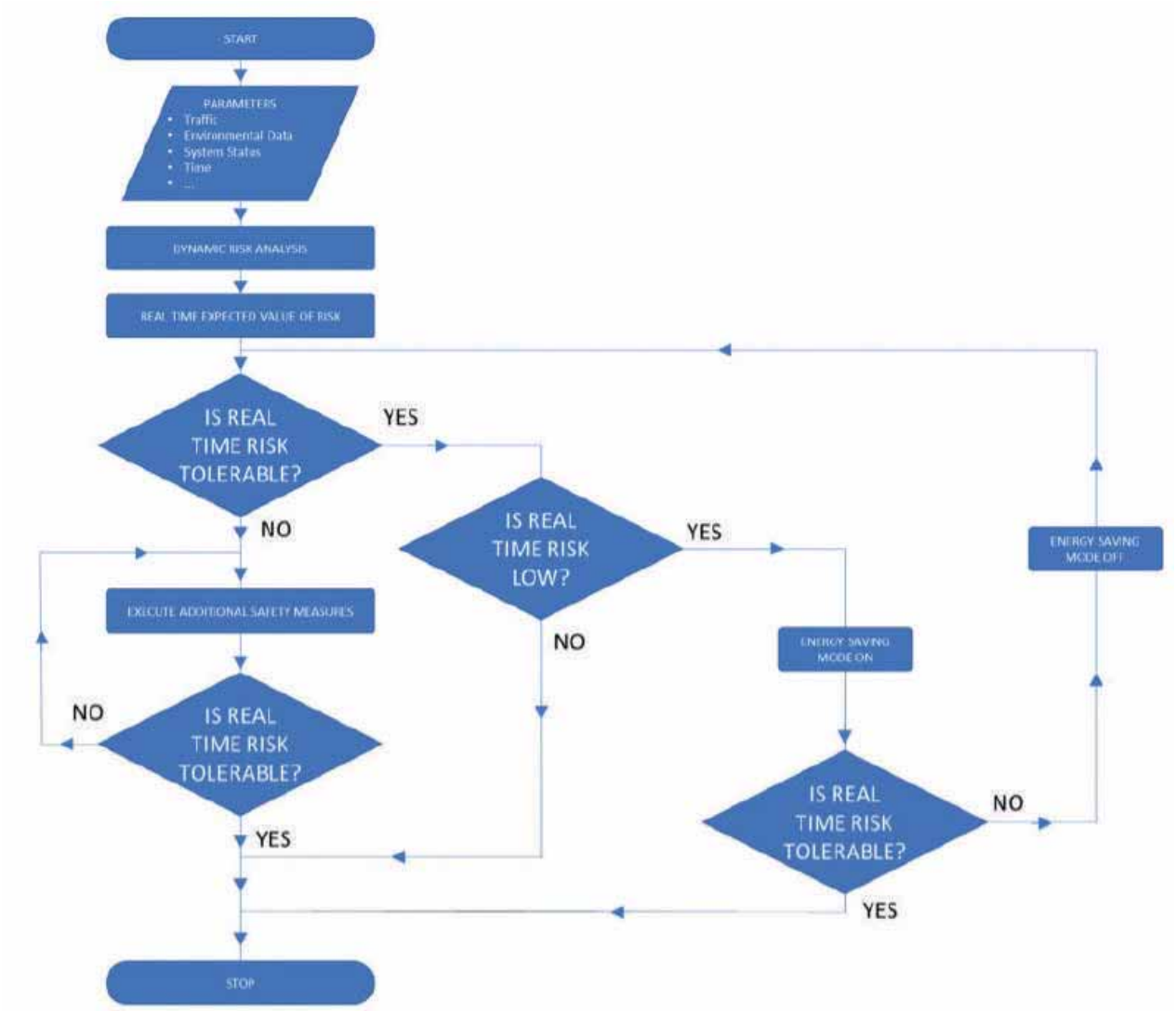


Figure 3 – SCADRA Flow Diagram

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, like reducing speed limits, minimum distance among vehicles and prohibition of overtaking for HGV;
- Executing protective measures, such as send communications to users, fire brigade alert, interruption of the systems energy saving mode.

The following figure shows the SCADRA system layout.

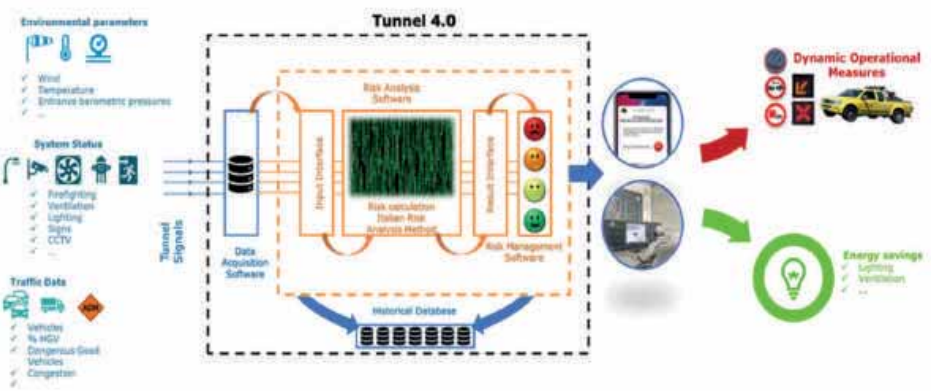


Figure 4 – SCADRA System Layout

2. THE DYNAMIC RISK ANALYSIS (DRA)

SCADRA is based on the Dynamic Risk Analysis (DRA): 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.

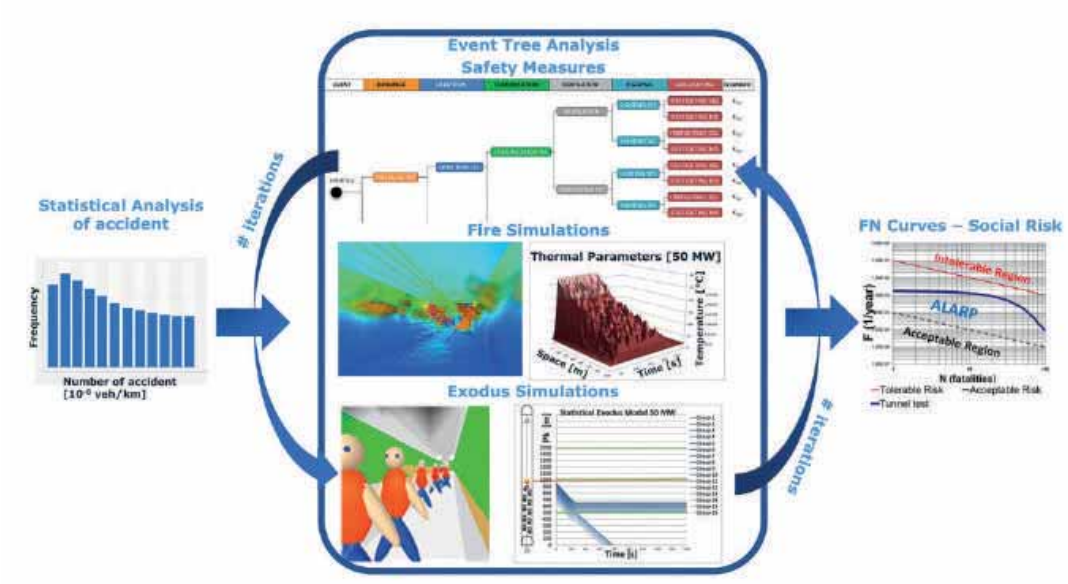


Figure 5 – Dynamic Risk Analysis (DRA) Method

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 Live Expected Value of Damage (LEVD) 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.

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.

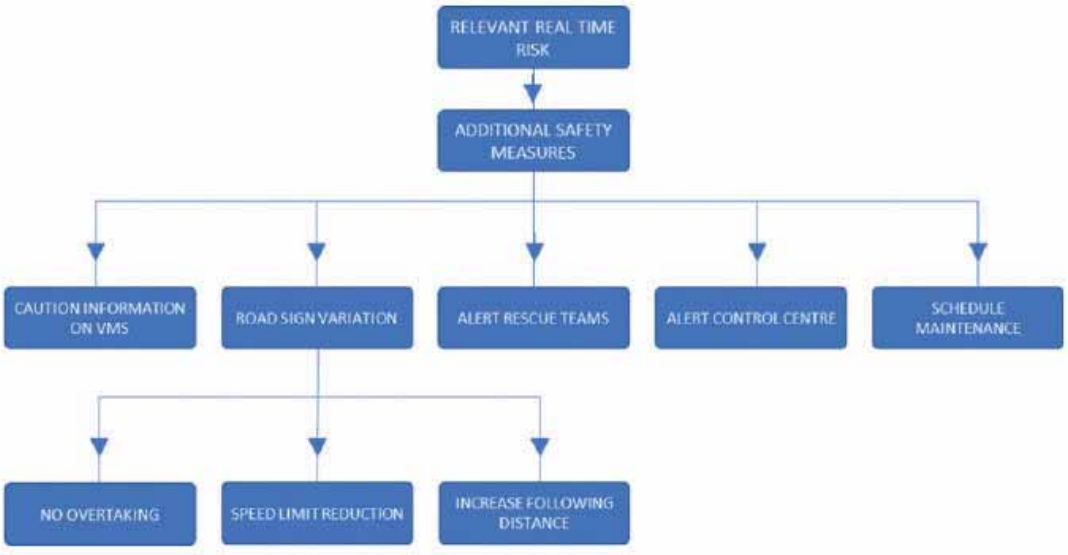


Figure 6 - Relevant Real Time Risk

The risk level, calculated as Live Expected Value of Damage (LEVD), has been classified according to 4 categories of instantaneous risk:

- Level 1: Low risk level (LEVD 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 (LEVD close to reference value), which corresponds to standard safety conditions;
- Level 3: Pre - alert level (LEVD is equal to the reference value);
- Level 4: Alert level (LEVD 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.

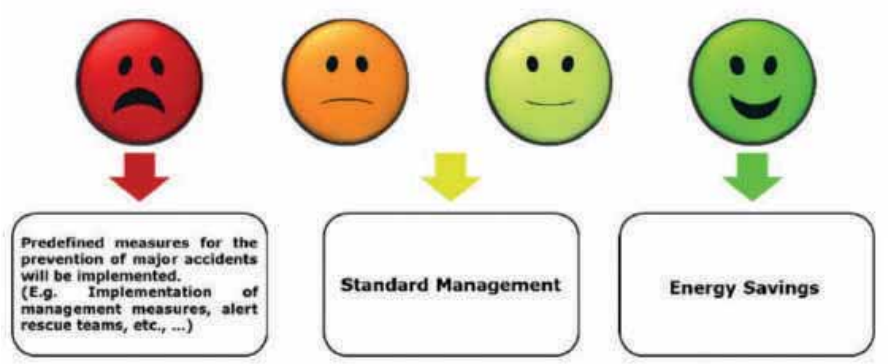


Figure 7 - Dynamic Risk Analysis results

The graphical interface shows the LEVD trend related to the surveys taken in the last 24 hours and it highlights the significant deviations of the input parameters.

A browser-based graphical user interface was developed in order to be user-friendly to facilitate the control centre operator in the real time risk level monitoring and to easily understand the causes behind the risk level increase and to quickly decide on the necessary safety interventions.

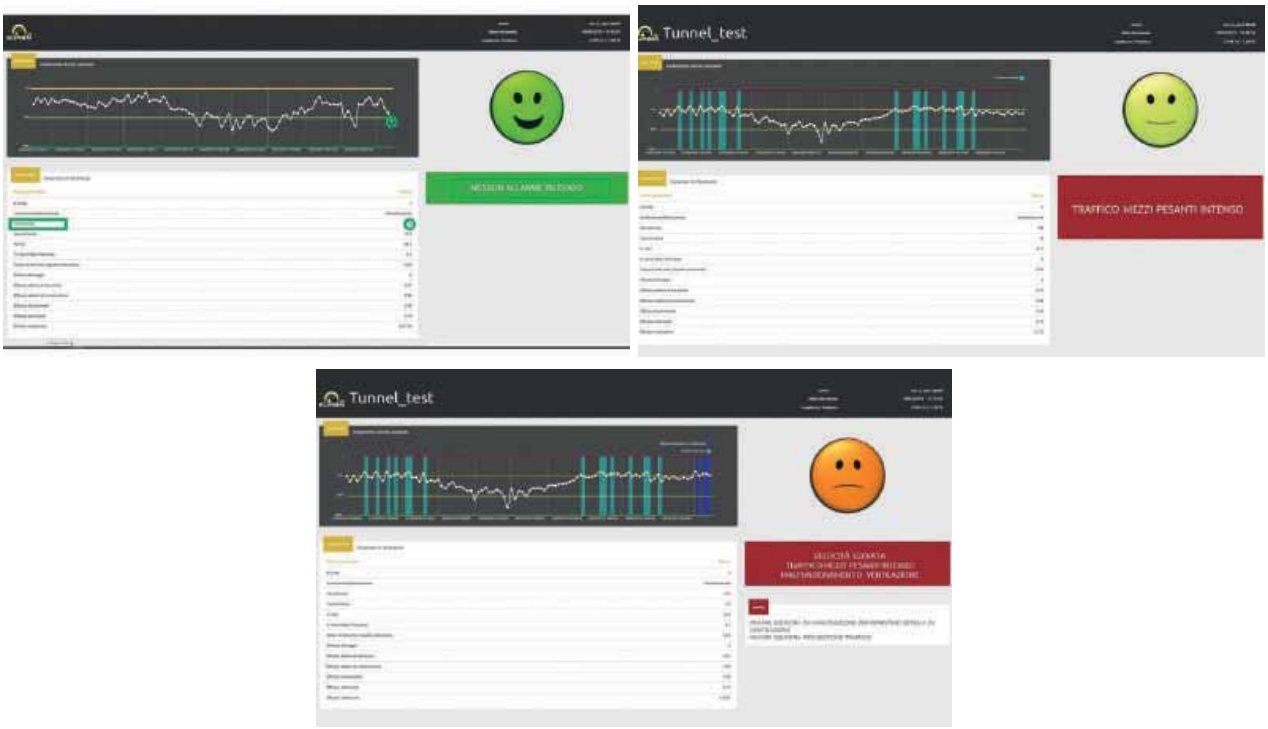


Figure 8 - Graphical interfaces

3. THE SCADRA SYSTEM AND ROAD TUNNELS RESILIENCE

The SCADRA system installation perfectly fits within improving road tunnel resilience, since it is always possible to know in real time what happens inside the tunnel, the environmental conditions, the traffic data and the system status. Therefore, SCADRA allows to monitor continuously the tunnel risk level and, if needed, to apply operational measures with the purpose of ensuring the required safety.

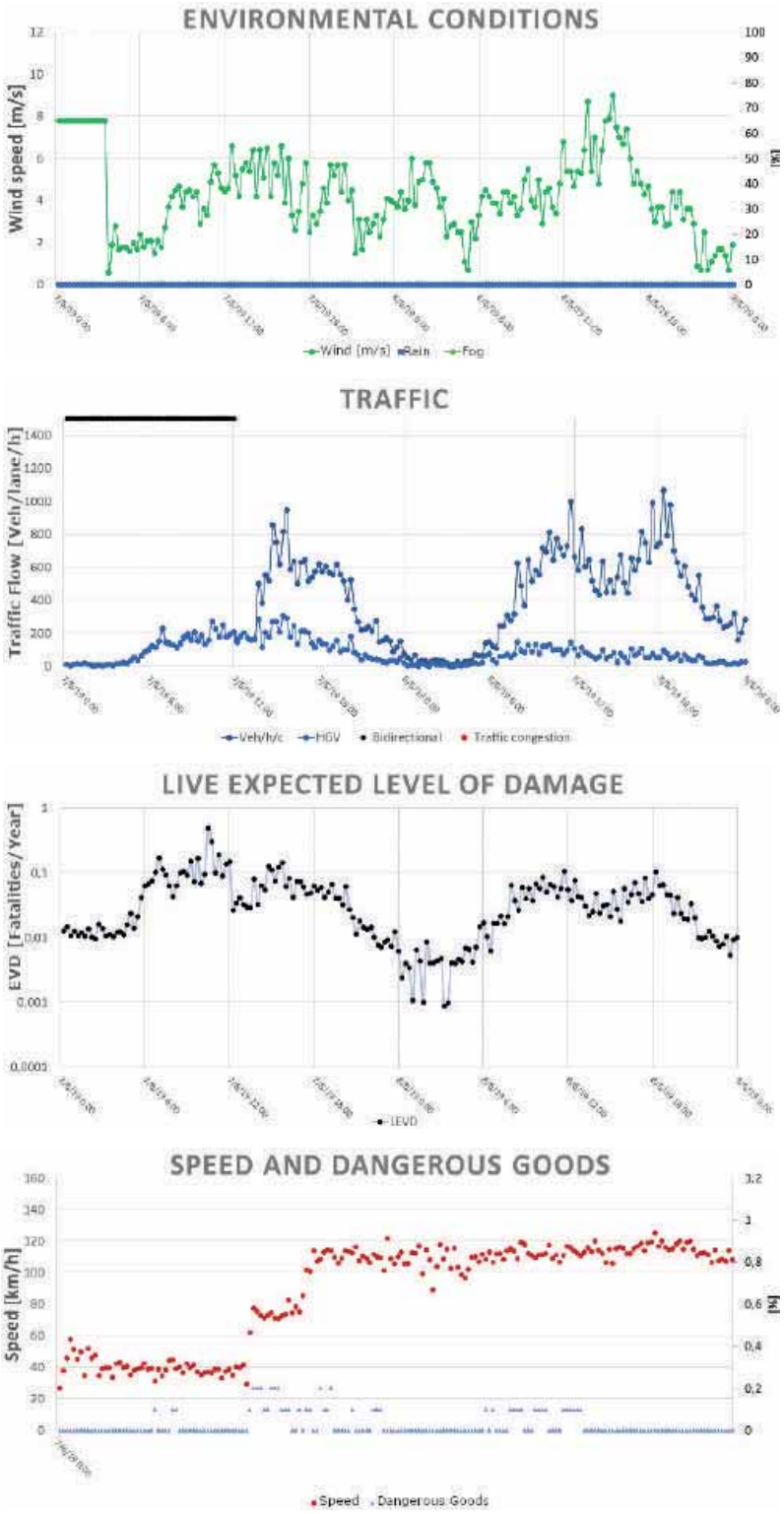


Figure 9 – Data from SCADRA installation

Consequently, the system supports the increasing of the road tunnel resilience by preventing and planning safety measure according to every critical situation that might occur.

Among all possible applications, it is possible to:

- Pre-alarm the entities involved in the emergency;
- Interrupt of the energy saving mode;
- Identify critical solutions in real time;
- Alert users in critical situations;
- Reduce the evacuation and rescue time;
- Restore the acceptable risk level by intervening on the technical systems or through management operations;
- Plan optimal maintenance, focusing on users' safety;
- Reduce maintenance operating costs and interventions time.

The SCADRA system can also represent an effective optimization for the firefighters' management, in order to reduce the instantaneous residual risk in critical conditions, such as congested traffic in a tunnel with longitudinal ventilation.

Furthermore, through the continuous acquisition and processing of data, it is also possible to have preventive maintenance focused on user safety, with the aim of reducing interventions, operating costs, intervention times, MTTR (Mean Time To Repair), and system(s) unavailability.

Therefore, SCADRA system allows to operate and manage technical systems improving the effectiveness of operational and integrative measures, by enhancing the maintenance design and planning and considering the users' safety.

4. THE INSTALLATIONS RESULT

The implementation of the SCADRA system is quite simple: an industrial PC is installed in the main technical room and connected with the SCADA system and all the necessary sensors. The software installed in the SCADRA allows the DRA execution.

The SCADRA cost is compatible with a SCADA system cost, but the obtainable benefits from SCADRA are remarkable as described in the previous paragraphs. In fact, SCADRA has already been successfully installed in unidirectional road tunnels in operation.

Figure 10 - An example of SCADRA installation

The system has been installed in tunnels with different structural and technological characteristics and diverse environmental and traffic characteristics.

The main significant data obtained from the tunnels analysis are reported below and the main characteristics are summarized in the following table.

Table 1 – Tunnels characteristics

	Tunnel 1	Tunnel 2	Tunnel 3
Tunnel type [-]	Highway	Highway	Highway
Number of tubes [-]	2	2	1
Directionality [-]	Unidirectional	Unidirectional	Unidirectional
Lanes [-]	2	2	3
Lenght [m]	~ 920 m	~ 2000 m	~ 1100 m
Slope [%]	± 0,78 %	± 0,71 %	2,7 % / -2,92%
Ventilation system presence [-]	No	Yes	Yes
AADT [v/d] (Annual Average Daily Traffic)	~ 20.000 v/d	~ 20.000 v/d	~ 45.000 v/d
Percentage of Heavy Goods Vehicles (HGV %) [%]	~ 18%	~ 25%	~ 24%
Number of emergency exits [-]	1	4	3
Emergency exits inter distance [m]	460 m	400 m	300 m

The following figures show the trend of the LEVD calculated by the SCADRA system in real time for the three tunnels for a period of four days. (Figure 11)

5. FUTURE CHALLENGES

The increase in tunnel resilience is mainly achieved through the search for a continuous improvement in the safety in operation of the tunnel (applying the dynamic monitoring of the risk conditions in the tunnel through SCADRA) and targeted maintenance that takes into account the ageing of construction materials and the interaction of the work with the environment, which can endanger the stability and functionality of the infrastructure, as well as the safety of users.

The current technical and technological progress in the field of operational safety and maintenance of existing tunnels has enabled the achievement of safety and quality objectives for works never seen in the past, for this reason the SCADRA system can be considered a powerful prevention tool that should be integrated in all types of tunnels to increase their resilience.

From the applications examined, it has been seen that this system is also suitable for existing tunnels by exploiting innovative low-cost technologies and improving safety in old tunnels thanks to operational measures integrating the systems and, if necessary, replace the lack of requirements.

Italy is the European country with the largest number of tunnels with about 650 km of tunnels in operation on the TERN network alone (Trans European Road Network) and worldwide is second only to Japan for tunnel

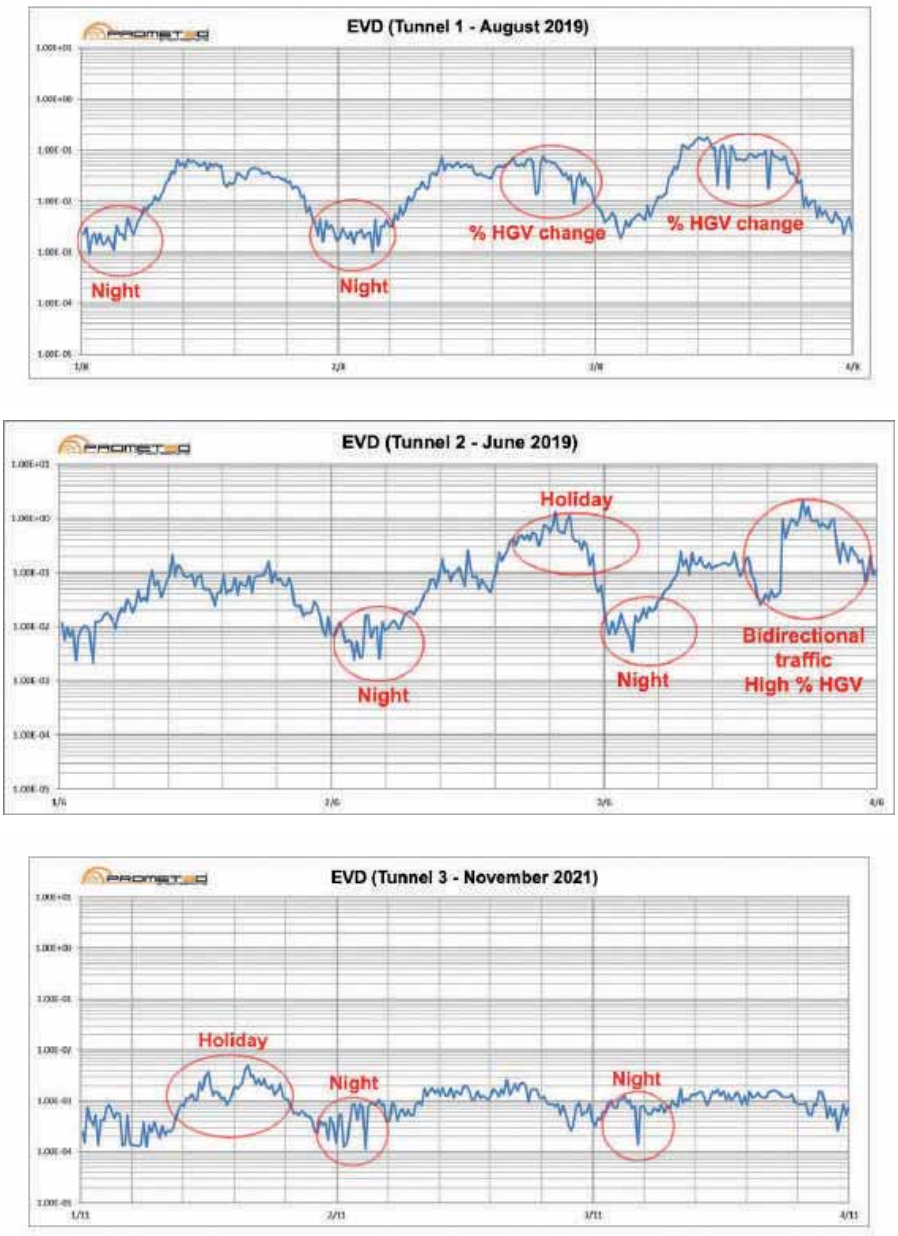


Figure 11 - LEVD calculated by SCADRA system

equipment. Over six hundred tunnels many of which were built before the 90s and immersed in often very poor soils. This particular feature requires special attention to the theme of resilience of underground works.

Therefore, the themes of safety in operation, of a correct structural and plant maintenance and the monitoring of a tunnel play a fundamental role to increase its ability to react or adapt more successfully to the negative effects of events, actual or potential, which affect the use of the tunnel.

Future developments foresee that the SCADRA will also be able to monitor the structural state of the tunnels and any other structures, such as bridges, viaducts, as well as the presence of any landslides in the surrounding environments as shown in the following figure.

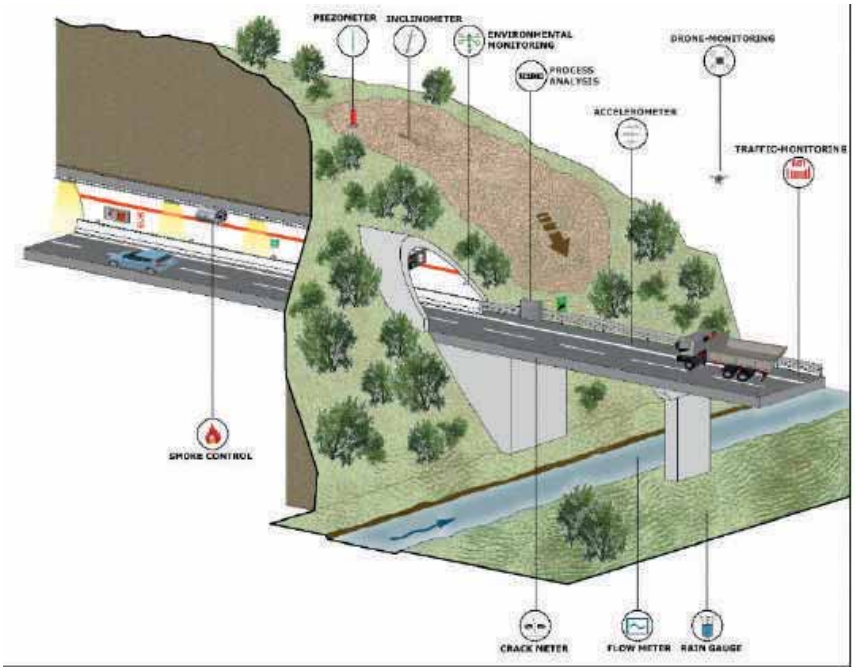


Figure 12 – Structures and environment monitoring sensors

REFERENCES

[1] A. FOCARACCI – "Analisi di rischio nel progetto della sicurezza in galleria (IRAM – Italian Risk Analysis Method)", Atti del Seminario "Sicurezza in galleria: normativa, progetti, nuove tecnologie", Genova, 27-28 Marzo 2007

[2] A. FOCARACCI – "The Italian Risk Analysis Method (IRAM)", The First Arabian Tunnelling Conference & Exhibition, Dubai, 10-11 December 2013

[3] A. FOCARACCI – "Le misure gestionali nel progetto della sicurezza: criteri di scelta e metodi di verifica", Conferenza Internazionale "La sicurezza nelle gallerie stradali. Le misure gestionali della Direttiva Europea", Roma, 16 Febbraio 2016

[4] 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, Napoli, Maggio 2019

[5] A. Focaracci - "Smart Tunnel and Dynamic Risk Analysis", XXVIth World Road Congress Abu Dhabi, 6-10 October 2019

[6] A. FOCARACCI – "SCADRA: Innovation for Tunnel", IRF Global R2T Conference Las Vegas, NV, 19-22 Novembre 2019

RESILIENT TUNNELS TO CLIMATE CHANGE THROUGH FLOOD GATES

Bijan Khaleghi
Saint Martin's University

The environmental conditions need to be considered for material selection and component manufacturing, installation practices and operation to provide long-term resistance to environmental degradation. Tunnels in coastal cities subjected to hurricanes are protected against flooding by heavy flood gates at each end. Activated through hurricane preparation procedures, the gates help to make this modern infrastructure asset highly resilient to the risk of flooding. Each year during hurricane season, between the beginning of June and the end of November, the coastal regions will be hit by anything from 10 to 20 hurricanes, particularly vulnerable to damaging floods as well as high winds during hurricane season. Severe storm surges, like that experienced from Hurricane Irma, can cause water levels to rise several meters, breaching the city's existing defenses; and scientific analysis shows the risk of flooding is likely to get worse. However, the Tunnels have distinctively iconic yet practical features at each end: concrete portal structures which house a pair of solid steel flood gates.

Flood gates on the tunnel portals were a necessary solution to a serious predicament for the project. For road freight and other port traffic, this would provide a highly valuable direct link with the mainland Interstate highway network, bypassing downtown. Flood gates have provided resiliency for hurricanes and most devastating storm on record to hit the hurricane stated of USA.

TÚNELES RESISTENTES AL CAMBIO CLIMÁTICO MEDIANTE COMPUERTAS DE INUNDACIÓN

Es necesario tener en cuenta las condiciones ambientales para la selección de materiales y la fabricación de componentes, las prácticas de instalación y el funcionamiento para ofrecer una resistencia a largo plazo a la degradación ambiental. Los túneles de las ciudades costeras sometidas a huracanes están protegidos contra las inundaciones mediante pesadas compuertas en cada extremo. Activadas mediante procedimientos de preparación para huracanes, las compuertas contribuyen a que este moderno activo de infraestructura sea altamente resistente al riesgo de inundación. Cada año, durante la temporada de huracanes, entre principios de junio y finales de noviembre, las regiones costeras se verán afectadas por entre 10 y 20 huracanes, especialmente vulnerables a las inundaciones dañinas, así como a los fuertes vientos de la temporada de huracanes. Las marejadas severas, como la experimentada por el huracán Irma, pueden hacer que el nivel del agua suba varios metros, rompiendo las defensas existentes en la ciudad; y los análisis científicos muestran que el riesgo de inundación probablemente empeore. Sin embargo, los túneles tienen características distintivas icónicas pero prácticas en cada extremo: estructuras de pórtico de hormigón que albergan un par de sólidas compuertas de acero.

Las compuertas de los portales del túnel eran una solución necesaria para un grave problema del proyecto. Para el transporte de mercancías por carretera y otro tipo de tráfico portuario, esto proporcionaría un enlace directo muy valioso con la red de carreteras interestatales del continente, evitando el centro de la ciudad. Las compuertas han proporcionado resistencia a los huracanes y a la tormenta más devastadora de la que se tiene constancia en el estado de huracanes de EE.UU.

TUNNELS RÉSILIENTS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE À TRAVERS LES VANNES ANTI-INONDATION

Les conditions environnementales doivent être prises en compte pour la sélection des matériaux et la fabrication des composants, les pratiques d'installation et le fonctionnement afin de fournir une résistance à long terme à la dégradation de l'environnement. Les tunnels des villes côtières soumises aux ouragans sont protégés contre les inondations par de lourdes vannes anti-inondation à chaque extrémité. Activées par des procédures de préparation aux ouragans, les vannes contribuent à rendre cet actif d'infrastructure moderne hautement résistant au risque d'inondation. Chaque année pendant la saison des ouragans, entre début juin et fin novembre, les régions côtières seront frappées par 10 à 20 ouragans, particulièrement vulnérables aux inondations destructrices ainsi qu'aux vents violents pendant la saison des ouragans. De violentes ondes de tempête, comme celle provoquée par l'ouragan Irma, peuvent faire monter le niveau de l'eau de plusieurs mètres, brisant les défenses existantes de la ville ; et l'analyse scientifique montre que le risque d'inondation est susceptible de s'aggraver. Cependant, les tunnels ont des caractéristiques emblématiques mais pratiques à chaque extrémité : des structures de portail en béton qui abritent une paire de vannes anti-inondation en acier massif.

Les vannes anti-inondation sur les portails du tunnel étaient une solution nécessaire à une grave situation difficile pour le projet. Pour le fret routier et les autres trafics portuaires, cela fournirait un lien direct très précieux avec le réseau d'autoroutes Interstate du continent, contournant le centre-ville. Les vannes anti-inondation ont fourni une résistance aux ouragans et à la tempête la plus dévastatrice jamais enregistrée pour frapper l'ouragan déclaré aux États-Unis.

INTRODUCTION

Tunnels are subjected to fluctuations in ambient temperature, high humidity, and copious quantities of dust from wear on the brakes and wheels of the vehicles, pressure and suction pulses generated by the passage of vehicles, stray electrical currents around the high-power third-rail train systems, vermin, and possible saline conditions. Structurally, and regardless of the fluid used for pressurization of the inflatable, the inflation pressure is transferred, at the contact area, to the primary liner system of the tunnel. The integrity of the liner will require verification of its pressure-bearing capacity. Mid-size rail tunnels, with circular or near-to-circular cross-sections, with diameters in the range of 5 to 7 m, running under bodies of water such as channels, rivers, and bays, can have different types of liners depending on the kind of ground that surrounds the tunnel. Materials typically used for the primary liner system include fabricated steel, cast iron, cast-in-place concrete, and precast concrete segmental liners. The liner is typically comprised of circular segments assembled to form rings. The stability of the rings created by the segments derives from the contact and the support provided by the surrounding ground.

EXTREME WEATHER CONDITIONS AND CLIMATE CHANGE

Extreme weather conditions may have a disruptive impact on road tunnel operation. During the initial meetings of the working group, various weather events were discussed that are presumed to represent a significant risk to tunnel operation, such as:

- High temperature, reducing the availability of electronic equipment
- Low temperature, by freezing the tunnel's fire-fighting main
- Flooding from heavy rainfall, storm water surge or rising sea level
- Snow and ice, by causing collisions
- Heavy winds and meteorological pressure by overpowering the capacity of a longitudinal ventilation system
- Heavy winds, by interrupting the tunnel's power supply
- Fog, such as by being detected as smoke or by causing collisions
- Wind screen fogging, by causing collisions
- Draughts, by interrupting the supply of water for fire fighting
- Sandstorms, by blocking the tunnel entrance with sediment of by damaging ventilation equipment

CLIMATE RESILIENCE CONSIDERATION

Climate resilience plan that will highlight actions can take to ensure we are prepared for the climate-related changes we are experiencing and able to adapt to changes as they occur.

The plan will identify how will promote conversations, development of policy, and operational responses that advance climate resilience within the agency and across the natural resources the agency manages. The plan will strive for long-term benefit to public lands that manages and to 's partners such as trust beneficiaries, local communities, tribes, municipalities, stakeholders, and other state agencies.

The actions that will be developing and advancing consist of program-specific, cross-program and agency-wide responses to ensure that will continue to fulfill its mission and responsibilities – and take advantage of opportunities – under changing climate conditions.

The plan will also identify high-priority opportunities related to 's authorities and responsibilities to support preparation, coordination, investment, and implementation among its partners.

The purpose of 's plan is to advance climate resilience within the agency and with our partners, and to support collaboration in preparing for and adapting to the impacts of climate change. Washington State is already facing the effects of climate change, and these impacts are projected to increase. Other responses call for legislative support or coordination with external partners. This plan addresses the pressing need to engage across the agency and with external partners in articulating this full range of opportunities.

Figure 1: Mount Baker Tunnel Seattle, Washington

In addition to advisory committees, the University of Washington Climate Impacts Group is providing research expertise and Cascadia Consulting is providing outreach support. The project will solicit expert input from state agencies, non-governmental organizations, businesses, tribal sovereigns, local governments, academia, and other sectors.

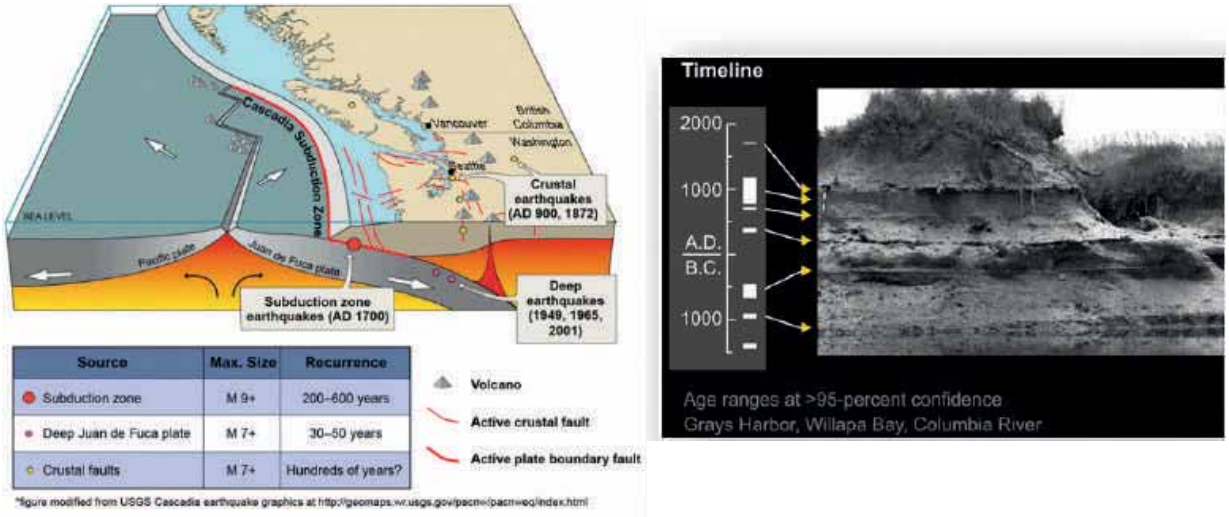


Figure 2: Cascadia Subduction Zone and Tsunami

Work to assess risks and develop response options has been ongoing within the agency. The process is broadening to include meetings with topic experts and partners. A final agency-wide plan will be released. Following release, as 's work to advance resilience continues, the agency will conduct implementation outreach, including meetings with communities.

Advancing climate resilience is an opportunity to envision and plan for the future we want for our communities, our economy, and our children. Many of the same strategies that are important for resilience –such as building capacity to avoid or respond to risks –are also opportunities to enhance economic, social, and environmental well-being for our state.

Climate change is an urgent challenge. The timeline for this project is designed to accelerate progress on climate resilience as well as build a model for iterative resilience planning that is nimble, flexible, and designed to match the pace and scale of the changes occurring statewide.

TUNNEL RESILIENCY WITH PLUGS

The protection of underground civil infrastructure continues to be a high priority for transportation and roadway security agencies. In particular, rail roadway tunnels running under bodies of water are susceptible to disruptions due to flooding caused by extraordinary climatic events such as hurricanes or other events resulting from human activities. Several events have taken place in the past decades that have demonstrated the need to mitigate vulnerabilities or, at least, minimize the consequences of catastrophic events. Although it is impossible to prevent all situations that can lead to flooding, damage can be substantially decreased by reducing the area affected by the event.

To minimize the effects of an event, a possible approach is to compartmentalize the tunnel system by creating temporary barriers that can contain the propagation of flooding until a more permanent solution can be implemented. One way to create a temporary barrier is by the deployment of a large-scale inflatable structure, also known as an inflatable plug. In such an application, the inflatable structure is prepared for placement, either permanently or temporally, and maintained ready for deployment, inflation, and pressurization when needed.

The internal plug pressure imparts a normal force against the tunnel wall surface with the friction between the plug and tunnel surfaces opposing axial movement of the plug. The sealing effectiveness depends on the ability of the inflatable structure to self-deploy and fit, without human intervention, to the intricacies of the perimeter of the conduit being sealed. Primary design constraints include having the plug stowed away from the dynamic envelope of the trains and being able to withhold the pressure of the flooding water. This work presents a compilation of the main aspects of the activities completed for the development of large-scale inflatable structures as part of the Resilient Tunnel Plug Project.

The main test results and lessons learned are presented to demonstrate the viability of implementing large-scale inflatable plugs for the containment of flooding in rail tunnels systems. The culmination of the work was 12 large-scale flooding demonstrations where the inflatable tunnel plug was shown able to be deployed remotely and withstand a simulated flooding event.

The protection of underground civil infrastructure continues to be a high priority for transportation and security agencies. In particular, rail roadway tunnels running under bodies of water or large-diameter pipes are susceptible to disruptions due to flooding originated by extraordinary climatic events such as hurricanes or human-made events. Some examples of such incidents in the United States include the 1992 Chicago freight tunnel flood, which forced the shutdown of the subway system, caused damage to numerous businesses, and required the evacuation of about 250,000 people from the area. In 2003, Hurricane Isabel caused flooding of the Midtown Tunnel in Virginia. During this event, more than 167,000 m3 of water from the Elizabeth River flooded the tunnel system in just 40 min. The flooding left the tunnel damaged and closed for nearly a month.

In 2012, in New York City, seven subway tunnels under the East River, as well as three road tunnels, flooded during Hurricane Sandy and remained inoperable for several days. These relatively new incidents and others that occurred in the past decades, such as fires that occurred in different tunnels across the world have demonstrated the need for planning and researching ways to mitigate vulnerabilities or, at least, minimize the consequences of catastrophic events.

Although it is impossible to prevent all situations that can lead to flooding, damage can be substantially minimized by reducing the area affected by the event. To mitigate the effects of any eventual threat, a possible approach is to compartmentalize the tunnel system. However, it can be difficult, if not impossible, to install or repair in an existing tunnel all the elements required for compartmentalization. Typically, space constraints inhibit the installation of new protective devices such as automatic or manually operated mechanical gates. The elevated cost of interrupting the tunnel operations or making major infrastructure modifications have also discouraged attempts to improve the tunnel resilience by these means.

The concept of compartmentalization of the tunnel led to the development of different solutions to seal tunnel segments susceptible to an extreme event such as a fire. Inflatable plugs have been used in underground coal mine firefighting as well as in mine rescue operations. In these applications, an inflatable feed-tube partition was used to rapidly block large openings, such as underground passageways, and simultaneously provide a feed-tube for high-expansion foam generators.

Flooding of mines is not unusual during or after the end of mining activities. For example, a large scale inflatable was used for flood containment in an undeveloped uranium mine in Canada in 2009. Large-scale inflatable dams for flooding control have also been proposed and implemented in the past years, but these inflatable structures are built with thick rubber materials, are not flexible, cannot be moved quickly, and are not particularly suitable for confined spaces such as tunnels and large-diameter pipes.

Large inflatable sluice gates for firefighting in transportation tunnels were proposed in 2002. The idea was that "by dividing the tunnel into compartments and providing each compartment with sluice gates, the fire can be isolated, and by lack of oxygen, the fire will not stir up or even extinguish itself". Based on this concept, in 2008, a fire extinguishing system for tunnel fires was successfully tested in the new Hubertus Tunnel in The Hague, Netherlands. Flooding of transportation tunnel systems is a problem in Asia too. Several studies were recently conducted in China and South Korea to assess flooding risk and to develop small-scale inflatable systems. Other similar and more recent efforts in Europe include the INFLATER project, also the inflatables developed in Spain and Germany for creating flood barriers of virtually any length along a body of water or other surface-related flood hazards, but not for flooding events in confined environments such as tunnels.

All the examples listed previously demonstrated the potential of using mid- to large-scale inflatable structures for different containment purposes and isolated events. However, there are no reports in the literature of systematic efforts to develop and implement large-scale inflatables as a protection system in transportation tunnels, either railway or vehicular tunnels, that may be subject to emergencies involving containment of floodwaters. The objective of this work is to provide a review of the development of large-scale inflatables for the protection of transportation railway tunnels against flooding.

VULNERABILITY OF INFRASTRUCTURE IN COASTAL AREAS TO EXTREME WEATHER EVENTS

Infrastructure in coastal areas is vulnerable to extreme weather events such as storms, high tides, flooding and severe precipitation. These could drastically affect transportation infrastructure, including underground structures, which would result in greater construction, maintenance, and rehabilitation costs.

Global climate change, especially increased precipitation, increased temperature, and sea level rise will further exacerbate the problem. Of these risks, sea level rise is the most important for coastal regions in the long-term. The projections of sea level rise for the next eighty years show a range of 0.8 ft. to 6.5 ft. Further-

more, the risk of sea level rise coupled with storm surge will increase the vulnerability of coastal transportation infrastructure including bridges, roads, tunnels, ports, and harbors.

The Port of Miami Tunnel, connecting the city with its port on Dodge Island, is protected against flooding by a pair of heavy flood gates at each end. Activated through hurricane preparation procedures, the gates help to make this modern infrastructure asset highly resilient to the risk of flooding. Each year during hurricane season, between the beginning of June and the end of November, Florida will be hit by anything from 10 to 20 hurricanes. On occasion, it suffers the brunt of a powerful category four or five storm, like Hurricane Irma which struck the peninsula in September 2017 with wind speeds exceeding 150mph (241kph). Greater Miami is particularly vulnerable to damaging floods as well as high winds during hurricane season. Florida is mostly a low-lying state and Miami is one of its most heavily built-up areas, on the state's eastern coast.

Severe storm surges, like that experienced from Hurricane Irma, can cause water levels to rise several meters, breaching the city's existing defenses; and scientific analysis shows the risk of flooding is likely to get worse. In this context, a road tunnel beneath Miami's port waterway is susceptible to extreme risk of flooding. However, the Miami Tunnel has distinctively iconic yet practical features at each end: concrete portal structures which house a pair of solid steel flood gates. Each gate – there are two at both portals, one for each tunnel bore – is a steel box section just over 31 ft. (10m) wide by 36 ft. (9m) high and weighing around 55 tons. They are housed in commanding structures, which rise up from the bottom of the tunnel's approach ramps, providing essential protection against flood risk.

The proposal was for a twin-bore road tunnel to connect the Port of Miami on Dodge Island with the MacArthur Causeway on Watson Island. For road freight and other port traffic, this would provide a highly valuable direct link with the mainland Interstate highway network, bypassing downtown Miami. But risk of flooding was high at the tunnel portals on the two low-lying islands. "The flooding risk made the project infeasible to begin with. We would not have been able to obtain insurance for the tunnel. But with the addition of the flood gates, insurance became not only possible, but it has subsequently become considerably less expensive than policies for other comparable

According to the Intergovernmental Panel on Climate Change, vulnerability is defined as the level at which the system or infrastructure component is exposed to the adverse effects of climate change and extreme weather events. Based on the definition of the system, other factors including environmental conditions, exposure to the weather stressors and distribution of the infrastructure components in the network, may also contribute to the vulnerability of the system. In the context of transportation infrastructure, vulnerability is defined as the 2 susceptibilities to damage and loss of structural integrity during or after the weather events. The factors affecting the vulnerability of the infrastructure systems include age, design criteria, exposure level, service conditions, and structural integrity.

A disruption in one component of the infrastructure at a local scale may affect the regional network based on the proximity of the connected assets and level of service. These factors are prominent for underground transportation infrastructure the roadway and transportation network. Exposure of these assets to extreme weather events in coastal areas, such as flash floods, storms, and hurricanes, may disrupt the local and regional transportation network. Although the effects of extreme weather events on transportation infrastructure are well understood, few studies have been dedicated to evaluating and investigating these effects. Furthermore, the evaluation of post-event condition of roadways and flooded infrastructure have been limited to few recent studies such as hurricane Katrina in Louisiana and Hurricane Sandy in New York and New Jersey.

The Federal Highway Administration published the "Climate Change & Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework" as a guideline for transportation agencies to assess the vulnerability of their transportation infrastructure to extreme weather events and climate change. The framework helps the state highway agencies and departments of transportation define their objectives and scopes, assess their transportation infrastructure vulnerability, and implement the results into a decision-making process. In the context of the framework, the resilience of transportation infrastructure is the function of exposure, adaptability, and sensitivity.

There are three steps to developing a vulnerability assessment framework. The first component of this framework evaluates the vulnerability of the infrastructure to current stressors. The response of the system to the existing stressors may be extracted from the historical databases. The second step involves predicting the future impacts and weather events in the context of climate change, storm return periods, and extreme events with less predictability potential such as earthquakes. In evaluating the second step, a period of study, as well as dependability of prediction models based on the climate change trends influence the estimation of the future conditions. The network are provided with resources necessary to develop a roadmap to resilience along four main 'pathways:

1. Financial and logistical guidance for appointing a Chief Resilience Officer, who will lead the city's resilience efforts
2. Expert support for development of a robust Resilience Strategy
3. Access to solutions, service providers and delivery partners from public, private sectors for developing and implementing resilience strategies
4. Membership of a global network of member cities for learning and helping each other.

In accordance with the operation's hurricane response plans shall close the gates yearly to test them prior to hurricane season, to ensure everything is working properly. It then becomes a matter of observing storm warnings and acting accordingly. We start planning meetings five days before any major storm is due to make landfall. Ultimately, the gates are closed when the warnings reach a certain critical level, by order of the Port.

Hurricane Sandy caused a reported $70bn of damage across the State of New York that year. Many of the City of New York Road tunnels were flooded and have since had heavy flood gates fitted. As the evidence of rising sea levels and climate change mounts, it really does make economic sense to ensure infrastructure is designed to be resilient. This is what Miami now has: so far, the only transformational project across the Eastern United States built to endure projected rises in sea level."

New York's Metropolitan Transportation Authority has completed a fitting flood gate to critical road and metro subway tunnels. Steel doors, each weighing 25 tons, are now protecting both ends of road tunnels connecting Manhattan Island with the Queens and Brooklyn, as well as the Holland and Lincoln Tunnels between New York and New Jersey.

The additional flood protection has been carried out after Hurricane Sandy caused of damage across New York State in 2012. Many of New York City's metro subways and road tunnels were flooded due to hurricane storm surges, putting large parts of the city's transport network out of action for several weeks while a recovery operation was set in action. Street-level subway entrances now have retractable heavy-duty fabric flood covers (see picture) and hinged steel doors have been fitted to pedestrian subway tunnels. Other openings in the subway metro system vulnerable to flooding, including train tunnels and lift shafts, have systems of steel 'logs', which operatives will buildup to form barriers for guarding against flooding when hurricane warnings reach critical levels.

The Hugh L. Carey Tunnel flooded with approximately 60 million gallons of saltwater during Superstorm Sandy. Short-term adaptations for this high-trafficked, Manhattan-Brooklyn connection included flood-proofing and relocating the data center above FEMA 500-year flood level. Long-term adaptations included the installation of deployable and permanent barriers at each tunnel plaza to form a protected perimeter, installation of hinged steel flood gates at tunnel portals, installation of emergency generator, installation of seawall at Governors Island Ventilation Building, replacement of drainage pumps, and other flood mitigation measures.

RESILIENT TUNNEL PLUG PROJECT

The Resilient tunnel plug Project started in 2007 to assess the feasibility of developing a rapidly inflatable plug system for plugging tunnels (particularly roadway and rail tunnels) in the event of emergency conditions. The overall objective of the Project was to develop and transition an innovative and effective new technology for a rapidly inflatable tunnel plug that can be installed as an alternative means to seal underground tunnels to prevent flooding originated by massive storm surges, hurricanes or extraordinary human-made events. Such technology could provide a more flexible solution than traditional floodgates in certain instances, particularly for application in existing tunnels with ongoing operations that limit and complicate construction and installation activities.

By working with potential end-user organizations, the project focused on developing a system that could meet the full range of real-world requirements to be installed in working railway tunnels in operational rail systems. The interaction with end-user organizations also facilitated the effective transition of the technology for implementation in their systems. The project evolved in phases, as follows:

Phase 1 – Proof of Concept.

Phase 2 – Single-Layer Plug Multi-Layer Plug.

Phase 3 – Prototype Integrated System.

Conceptually, the system consists of an inflatable plug comprised of a cylindrical portion with two hemispherical endcaps which can be stored until needed inside a tunnel in a suitable container to protect it from the tunnel environment. On command, a control system deploys the plug from its storage container, inflates the plug and maintains it at a suitable inflation pressure for the required time. The plug can be pressurized with either air or water, depending on the specific application, to a demand that exceeds the anticipated pressure of floodwaters by an appropriate safety factor. A schematic representation of the system is shown in Figure 3.

Figure 3: A conceptual overview of the Inflatable plug

KEY RESILIENT TUNNEL PLUG TECHNICAL CHALLENGES

During the development of the different phases of the Project, several key technical challenges had to be met before the completion of the project to provide a successful inflatable plug system for rapid response in tunnels. Each of the technical challenges required the definition of an approach adopted to meet them. The approaches selected for addressing the different challenges contributed to defining the basic logic underlying the system requirements, which ultimately drove the technology development and also helped to shape the

testing that was required to move from one phase of the project to the next. The most significant technical challenges faced by the Project included:

a) Strength: The inflatable plug, and by extension the support systems, must have sufficient strength to withstand the forces involved, of which the most challenging is potential tunnel flooding. To be able to establish and maintain an effective seal, the inflated plug must have sufficient strength to withstand stresses associated both with internal pressures needed to inflate the plug and anchor it in place against the tunnel walls, and with external forces acting against the plug such as the pressures of floodwaters.

b) Storage Space: The plug and the associated support systems must be capable of being stored in a compact limited area in an actively used tunnel until needed, without impeding regular traffic. Many of these supporting systems were installed after the tunnels were designed and built, and their subsequent installation has contributed to the lack of space in the tunnels.

c) Sealing Capability: Once deployed and inflated, the plug must be capable of providing a sufficient seal within the working tunnel environment, which includes other systems and utilities that could interfere with sealing, to reduce leakage to an allowable amount. The sufficiency of the sealing ability depends on the specific condition being considered and the ability of the existing tunnel infrastructure to handle potential leakage. For example, in an emergency event involving a gas release, the sealing ability must sufficiently contain the release to allow the tunnel ventilation system to remove the released gases and keep them from spreading within the tunnel system.

d) The ability to obtain a sufficient seal against the tunnel surfaces can be reduced by factors such as the basic geometry of the tunnel and irregularities in the tunnel surface, utilities and other equipment installed in that portion of the tunnel, and the positioning of the plug during deployment.

e) Integration: The inflatable plug and associated support systems must effectively interface with normal tunnel operations and operational constraints, as well as regulatory restrictions without requiring significant exceptions to standard operational protocols and procedures.

f) Tunnel Environment: The plug and the associated support systems must remain unaffected by the tunnel environment to ensure operability when needed. By its very nature, a system such as the system, once installed, will remain in storage within the tunnel in a ready state until it needs to be deployed and inflated in response to an incident.

g) Long-Term Reliability: Ultimately, the inflatable tunnel plug system must provide a very high degree of reliability to ensure effective operation even after a long period of storage, without complicated maintenance requirements. Responding to this challenge requires attention in all areas of the project, including materials selection and testing; equipment selection, design and fabrication; prototype testing and analysis; and system modeling to anticipate unforeseen situations that could be mitigated in advance.

INFLATABLE PLUG DESIGN CONSIDERATIONS

The potential for water flooding was deemed the most demanding on system design and capabilities and was used as the design basis for the inflatable plug. To ensure that the inflatable plug performs adequately and appropriately, three design conditions must be satisfied. Failure of any one of these conditions during operation would result in the overall failure of the system. Furthermore, it is noted that these are not independent factors and need to be balanced as a system to achieve a functional plug design. These conditions are summarized as follows:

1) Inflation Pressure: Sufficient inflation pressure needs to be achieved and maintained on the inflatable plug to keep its shape geometrically stable. The inflation pressure must be higher than the upstream external flooding pressures that could be encountered by the system in the particular location where

the plug is installed. The critical variable that needs to be defined is the maximum water depth for possible floodwaters at the site of interest.

2) Structural Strength of the Inflatable Plug: The membrane of the inflatable plug must have sufficient structural strength to withstand: 1) the inflation pressures under working conditions, and 2) any additional concentrated local stresses caused by bridging of the membrane around or over variations and irregularities in tunnel geometry.

3) Friction Resistance of the Plug against the Tunnel Walls: The surface of the inflatable plug in contact with the inner tunnel surface must provide sufficient frictional resistance against the tunnel walls to remain in place against the maximum potential flooding pressures. Satisfying this condition assures the stability of the plug while being subject to the flooding pressures.

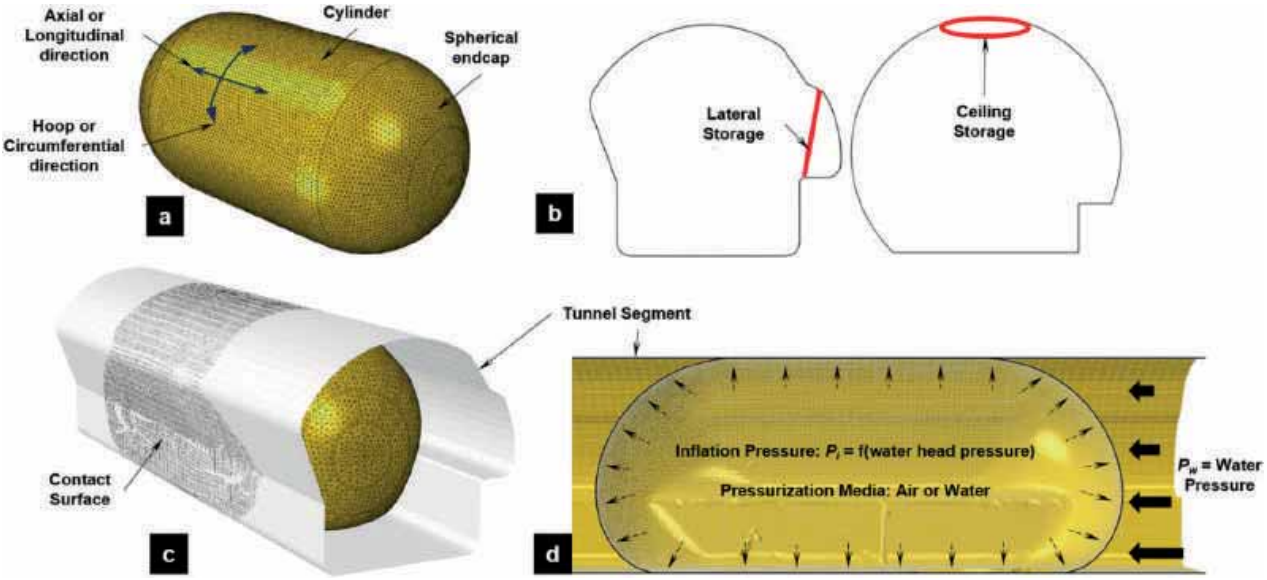


Figure 4: A conceptual overview of the System: a Inflatable plug, unconfined configuration; b Tunnel profiles and folded plug storage areas; c Inflatable plug deployed and inflated in the tunnel (confined configuration); d Longitudinal cross-section, inflation and flooding pressures

Integrate the Phase 2 multi-layer plug with the modular, soft-pack container for improved installation characteristics in working tunnels and assess the performance of the soft-pack container. With these objectives in mind, activities focused on the following areas:

a) Modifications to the Full-Scale Tunnel Mockup: The full-scale tunnel mockup configuration was modified to simplify the integration of the plug and removable container module, which required the development of new handling procedures for packing the plug into the container and mounting the module in the tunnel mockup.

b) Development of Handling Procedures for Integrated Plug/Soft-Pack Container Module: Folding and general handling procedures needed to be developed for packing the plug in the soft-pack container and then mounting the loaded container into the tunnel mockup for testing.

c) Full-Scale Plug Testing: The Extended Testing Phase was conducted at WVU, with occasional support from the plug manufacturer to check the performance of the manufacturing details of the plug and the softcover container.

d) Quarter-Scale Plug Testing: Additional quarter-scale testing was conducted in the quarter-scale tunnel during the Extended Testing Phase to evaluate the effect of the degree of plug oversizing on the performance of the plugging system.

Phase 2 – multiple layer membrane design, initial and extended testing

The adoption of a three-layer fabric system for the membrane increased the plug's strength and resilience. Unlike the single-layer design, in the three-layer, the loads originated at the different stages of the preparation and pressurization of the plug were carried by the different fabric layers of the membrane.

Extended testing with the implementation of a soft-cover portable container enabled the systematization of the testing procedures developed in the previous phases for a full-scale prototype. Extended testing showed that the implementation of inflatable plugs for sealing tunnel segments can be divided into three main stages:

Stage I: Preparation and installation of the inflatable. It requires the definition and implementation of a folding sequence in conjunction with the packing of the folded plug into the portable storage container.

Stage II: Deployment. It begins with the automatic opening of the storage container, which allows the liberation of the inflatable and followed by inflation until it reaches its final shape and position within the tunnel section.

Stage III: Pressurization. It begins immediately after the initial positioning. In this stage, the plug is pressurized up to the reference pressure, so it can withstand, predominantly by friction, the external pressure originated by flooding. The magnitude of the pressurization depends on the level of flooding pressure expected to be contained.

CONCLUSIONS

An overview of different technical aspects, design considerations, developmental phases and main test results corresponding to the Project are summarized in this paper.

The results obtained demonstrated the viability of installing and deploying a low pressure, inflatable plug in an actual tunnel segment within the time and space constraints imposed by the operations of a typical railway tunnel. The results demonstrated that a single layer membrane formed by a cylindrical segment and two hemispherical endcaps could be inflated in 3 to 5 min and could contain smoke reasonably well. Phase 1 results also showed the need for modifications on the tunnel profile to improve the local conformity and more effective sealing.

Test results obtained in Phase 2 demonstrated the limitations of a high strength single layer design in its ability to withstand the pressurization of the plug in tests at full scale. These results prompted the development of a more robust membrane design carried out during Phase 2.

Results demonstrated the ability of a three-layer membrane design to withstand required inflation pressure, as well as flooding pressure while remaining stable. However, the adoption of a more robust membrane increased the weight and the handling difficulties and required the development of new folding, packing and installation procedures to obtain consistent and reliable performance in terms of initial deployment, global and local conformity, and sealing capacity. Moreover, experimental results obtained during Phase 2 demonstrated that achieving acceptable local conformity at the beginning of the process of deployment and inflation with low-pressure air is critical for reducing the flood water leakage. Further improvements in the local conformity can be achieved by a combination of an adequate amount of oversizing the membrane material in contact with the tunnel perimeter, a controlled release of that material during the deployment with the implementation of passive restrainers, and modifications in the transitional zones of the tunnel perimeter in order to further reduce the leakage coming from those particular zones. Furthermore, flooding simulations produced non-negligible but controllable water leakage rates that can be managed with pumping equipment available in existing tunnel infrastructure.

REFERENCES

1) MTA Climate Adaptation Task Force 2019 Resiliency Report, Update on agency-wide climate resiliency projects.

2) Resilience of Underground Transportation Infrastructure in Coastal Regions: A Case Study, Edwin Martinez1, Jose Hernandez2, Tonatiuh Rodriguez-Nikl, Ph.D. and Mehran Mazari, Ph.D.

3) Port Of Miami Tunnel: Resiliency Through Flood Gates – Case Study

4) Large-scale inflatable structures for tunnel protection: a review of the Resilient Tunnel Plug project Eduardo M. Sosa, Gregory J. Thompson, Gregory M. Holter & John M. Fortune

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

SECOND SESSION:

Operation and sustainable management of tunnels (I)

Topic: "Contribution of ITS to the improvement of tunnel operation"

EL RETO DE LA RENOVACIÓN DEL CENTRO DE CONTROL DE LOS TÚNELES DE CALLE30 (MADRID) SIN AFECCIONES A LOS USUARIOS

Javier Berges Redondo
Madrid Calle 30

Calle 30 (M-30) es el primer anillo de circunvalación de la ciudad de Madrid, con 32,5 kilómetros y 1,5 millones de desplazamientos diarios. Una parte de Calle 30 esta soterrada y se conoce como los túneles de Calle30 y equivalen a un túnel de dos carriles 48 Km. Además de su longitud, les hace especialmente singulares su complejidad en el trazado y el número de desplazamientos diarios que se acercan al medio millón.

Los túneles de Calle 30 tiene 21 sistemas que engloban más 18.000 equipos distribuidos por todo su trazado. Estos equipos se gestionan desde un Centro de Control con más de 110.000 señales y está compuesto por tres niveles jerárquicos, cada uno de ellos con equipamiento independiente y específico, que se unen a través de la Red de Transmisión de Datos.

En 2021, Madrid Calle 30 lanzo un proyecto de renovación motivado por fin de vida útil u obsolescencia tecnológica de los equipos que componen de sistema de control actual. El alcance incluye la renovación del equipamiento, instalación, programación y puesta en marcha de la gestión centralizada de esta infraestructura.

El Proyecto se ha diseñado basándose en tres pilares fundamentales:

- Solución de calidad: técnicamente puntera y fiable.
- Proceso de Migración seguro y con mínimas afecciones a los usuarios.
- Asegurar soporte durante su vida útil (soluciones abiertas, basadas en estándares…)

Sin lugar a duda, el punto que supone un mayor reto es el segundo, es decir, reemplazar el sistema de control con la infraestructura en servicio, sin afecciones a los usuarios. Así en esta ponencia se describe el proceso de Migración.

THE CHALLENGE OF RENOVATING THE CONTROL CENTRE OF THE CALLE30 TUNNELS (MADRID) WITHOUT AFFECTING USERS

Calle 30 (M-30) is the first ring road in the city of Madrid, with 32.5 kilometers and 1.5 million daily trips. Part of road is underground, and it is known as the Calle30 tunnels. Calle 30 Tunnels are equivalent to a 48 km two-lane tunnel. In addition to their length, their complexity in the layout and the number of daily trips, around half million, that approach the tunnel make them especially unique

The Calle 30 tunnels have 21 systems that included more than 18,000 equipment. These units are managed from a Control Center with more than 110,000 signals. The Control System is made up of three hierarchical levels, each with independent and specific equipment, which are linked through the Data Transmission Network.

In 2021, Madrid Calle 30 launched a renovation project motivated by the end life or technological obsolescence of the equipment that makes up the current control system. The scope includes the renovation of the equipment, installation, programming and commissioning of the centralized management of this infrastructure.

The Project has been designed based on three fundamental pillars:

- Quality solution: technically advanced and reliable.
- Secure migration process with minimal effects on users.
- Ensure support during its useful life (open solutions, based on standards...)

The point that represents the greatest challenge is the second, that is, replacing the control system with the infrastructure in service, without affecting users. Thus, in this paper the migration process is described.

LE DÉFI DE RÉNOVER LE CENTRE DE CONTRÔLE DES TUNNELS DE LA CALLE30 (MADRID) SANS AFFECTER LES USAGERS

La Calle 30 (M-30) est le premier périphérique de la ville de Madrid, avec 32,5 kilomètres et 1,5 million de trajets quotidiens. Une partie de la Calle 30 est souterraine et est connue sous le nom de tunnels de la Calle 30 et équivaut à un tunnel à deux voies de 48 km. Outre leur longueur, ils sont particulièrement uniques en raison de la complexité de leur tracé et du nombre de trajets quotidiens, qui avoisine le demi-million.

Les tunnels de la Calle 30 comptent 21 systèmes comprenant plus de 18 000 équipements répartis sur l'ensemble du tracé. Ces équipements sont gérés à partir d'un centre de contrôle de plus de 110 000 signaux et sont constitués de trois niveaux hiérarchiques, chacun doté d'équipements indépendants et spécifiques, qui sont reliés par le réseau de transmission de données.

En 2021, Madrid Calle 30 a lancé un projet de rénovation en raison de la fin de vie utile ou de l'obsolescence technologique des équipements qui composent le système de contrôle actuel. Le périmètre comprend le renouvellement des équipements, l'installation, la programmation et la mise en service de la gestion centralisée de cette infrastructure.

Le projet a été conçu sur la base de trois piliers fondamentaux :

- Solution de qualité : techniquement à la pointe et fiable.
- Processus de migration sécurisé avec un minimum de perturbations pour les utilisateurs.
- Garantir un support à vie (solutions ouvertes, basées sur des normes...)

Sans aucun doute, le point le plus difficile est le deuxième, c'est-à-dire remplacer le système de contrôle par l'infrastructure en service, sans affecter les utilisateurs. Ce document décrit donc le processus de migration.

1. OBJETO

El objeto de este documento se enmarca en las presentaciones de la 2ª CONFERENCIA INTERNACIONAL DE PIARC SOBRE LA EXPLOTACIÓN Y LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES DE CARRETERA, siendo el mismo una descripción del reto que supone la renovación del Centro de Control de unos túneles con medio millón de desplazamientos por día, sin afectar al tráfico, ni mermar la seguridad de los usuarios.

2. CALLE 30

Calle 30 (M-30) es el primer anillo de circunvalación de la ciudad de Madrid con una longitud de 32 km.

El trazado rodea los distritos centrales, y en su recorrido enlaza con las principales carreteras nacionales radiales, que nacen en Madrid.

2.1. Madrid Calle 30

La M30 data de los años 70 y entre 2004 y 2007 sufrió una gran remodelación, siendo la principal actuación el soterramiento de una parte de su trazado. En estas fechas nace la empresa Madrid Calle 30 como empresa mixta, 80% capital público y 20% capital privado, para dar servicio a la infraestructura.

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 EMESA, esta empresa a su vez es la propietaria del 20 % de la sociedad, por lo que sería más justo denominarla socio. MC30 tiene una función gestión y supervisión, y EMESA una función más ejecutiva.

2.2. Calle 30

Calle 30, conocida popularmente como La M30 es el principal anillo circunvalación de Madrid. Con 32,5 kilómetros y 1,5 millones de desplazamientos diarios.

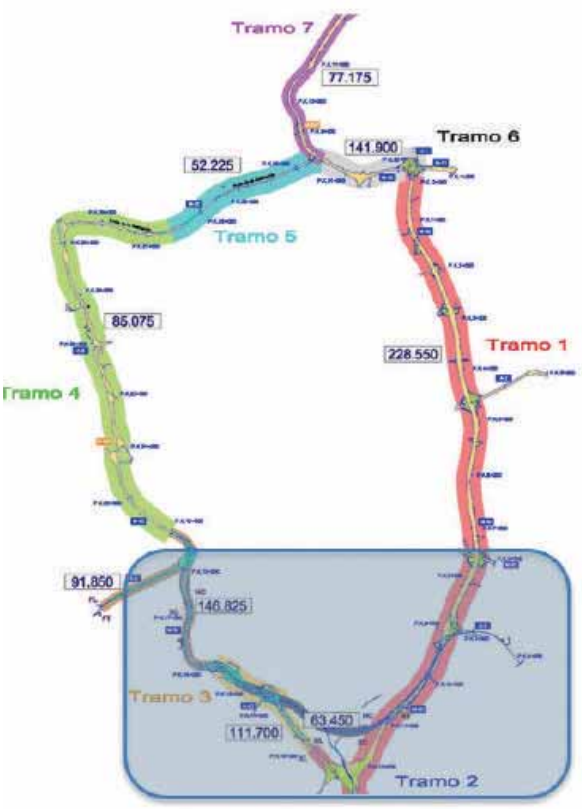
Calle 30 llega a tener en algunos puntos hasta 19 carriles, si la desdoblásemos equivaldría a una carretera de un carril de 500 Km. Algunos datos sobre la actividad son : 14.200 intervenciones al año por incidencias, emergencias, etc. 6.350 ocupaciones de vía al año para tareas de mantenimiento, más de 65.000 Ordenes de Trabajo (la mayoría preventivo).

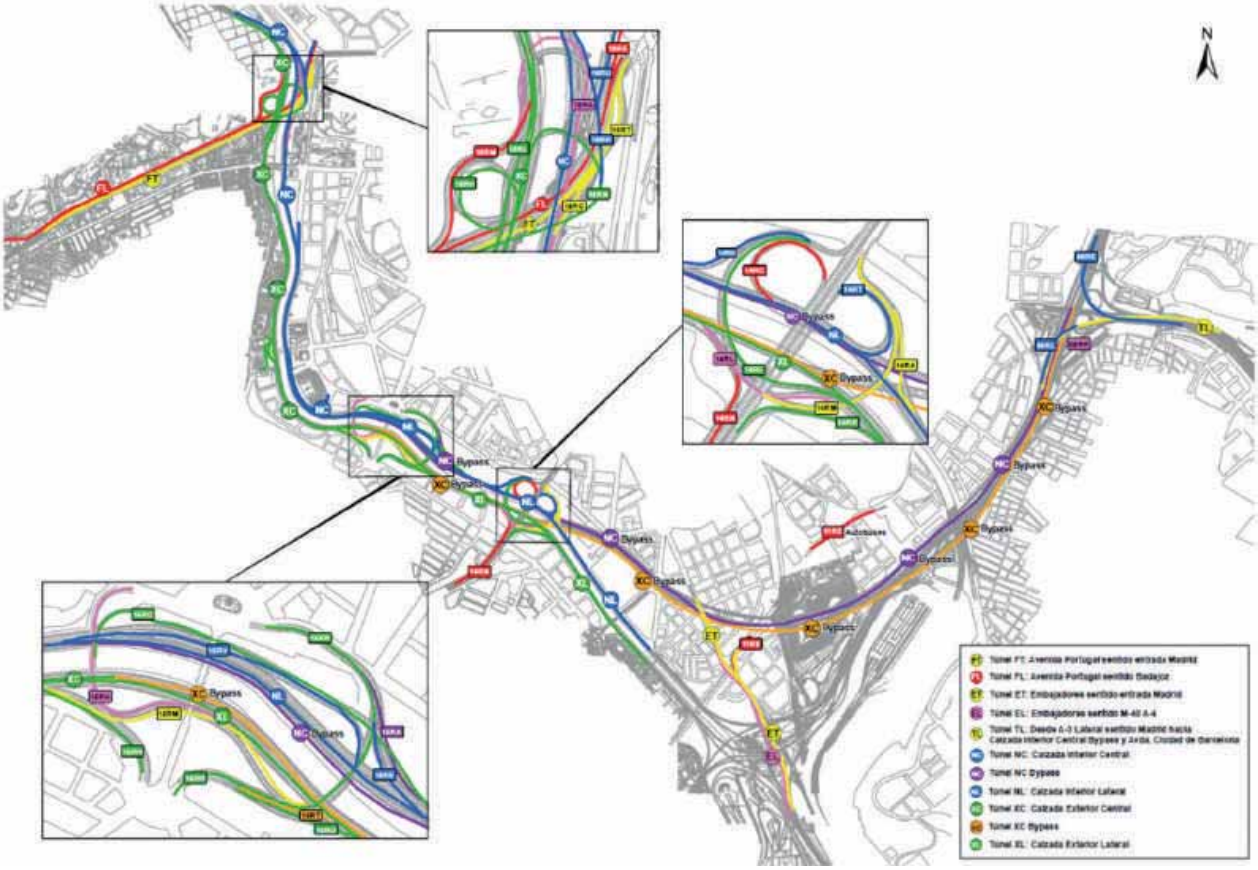
El manejo y control de tanta información hace que se cuente con personal altamente cualificado, que recibe una formación continua y adaptada a su puesto de trabajo, siendo eficientes en el desempeño y dotando a la infraestructura de la máxima seguridad.

2.3. Los Túneles de Calle 30

En solo tres años, 2004 a 2007, se soterró la parte Suroeste de la M30 y supuso el mayor proyecto de transformación urbana de la ciudad de Madrid de los últimas décadas, la remodelación del viario y del territorio por el que discurría la antigua M30 permitió la construcción de una gran zona verde: Madrid Rio.

Los túneles de Calle30 equivalen a un túnel de dos carriles 48 Km. Además de su longitud, les hace especialmente singulares su complejidad en el trazado:


Tramo 7
77.175
Tramo 6
141.900
52.225
Tramo 5
85.075
228.550
Tramo 1
Tramo 4
91.850
146.825
Tramo 3
63.450
111.700
Tramo 2


N
XC Bypass
NC Bypass
Autopista

2.4. Las Instalaciones de los Túneles de Calle30

Para garantizar la operación de los túneles y la seguridad de los usuarios, Calle 30 tiene 21 sistemas que engloban más 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.

- Sistema de Ventilación. 940 ventiladores.
- Sistema de Iluminación: 45.000 puntos de luz.
- Sistema eléctrico en Alta Tensión: 37 centros de Transformación con una potencia total instalada de 8,8 GW.
- Sistema eléctrico de baja tensión: 37 CT, 500 VF, 50 SAIs, 18 Grupos electrógenos, …
- Sistema de protección de incendios: 2.400 BIES, 18 grupos de Bombeo…
- Sistemas de detección y extinción de incendios: 11 tramos de agua nebulizada en túnel y 39 en Cuartos técnicos.
- 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.

2.5. El Centro de Control de Calle 30

El elevado número de sistemas y de elementos, hace imprescindible el uso de un potente Centro de Control

para la gestión de la infraestructura. El Centro de Control de MC30 integra 21 sistemas y más de 110.000 señales.

El sistema global está compuesto por tres niveles jerárquicos, cada uno de ellos con equipamiento independiente y específico, que se unen a través de la Red de Transmisión de Datos.

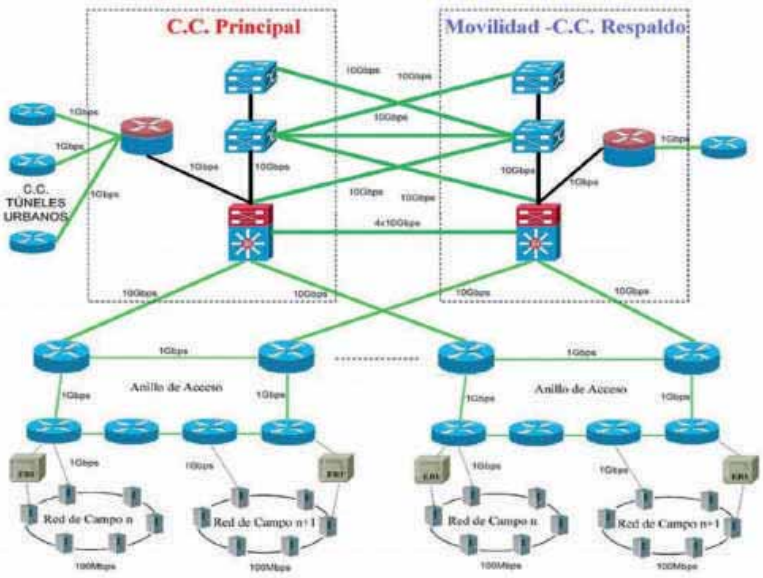
Nivel 1. Unidades de Control Distribuido (UCD). Permiten el control, conexión de alimentación y comunicaciones de los diferentes elementos de campo en un solo elemento, las cabeceras de comunicaciones de En-

tradas y Salidas Digitales, que concentran los equipos en su zona de actuación, tanto en interior de túnel como en exterior, siendo estas señales agrupadas para ser controladas por las ERUs (Estaciones Remotas Universales). Calle 30 tiene más de 500 UCDs

Nivel 2 Estaciones Remotas Universales (ERU). La ERU es el equipo industrial ubicado en los cuartos técnicos de túnel, encargado de recibir y procesar las entradas, para generar salidas tanto a periféricos como al centro de control. En la actualidad hay 144 unidades, distribuidas en su mayoría en los cuartos técnicos de túnel.

Nivel 3. Centro de Control. Todas las señales y alarmas de los equipos instalados en el túnel y accesos al mismo son enviadas desde las cabeceras de control (UCD) y las estaciones remotas universales, a través del anillo de fibra óptica mediante la red de comunicaciones, hasta los servidores de los centros de control. La integración de las señales en el scada del centro de control permite la monitorización, supervisión y gestión centralizada de todos los sistemas de seguridad de tráfico. Existen dos Centros de Control, principal y redundante, ubicados en dos emplazamientos diferentes.

Red de Comunicaciones. Los tres niveles se enlazan a través de una extensa y mallada Red de Comunicaciones.



3. EL PROYECTO DE RENOVACIÓN DEL CENTRO DE CONTROL

3.1. Necesidades y Alcance de la Renovación del Centro de Control de Calle 30

Se enmarca en los Proyectos de Renovación por fin de vida útil u obsolescencia tecnológica. El presupuesto de adjudicación (sin IVA): Lote1 9,4 M€ y Lote2 0,4 M€

En 2021, Madrid Calle 30 lanzo un proyecto de renovación de gran envergadura que incluye todo el sistema de control de Calle30. El objeto, es la renovación del equipamiento, instalación, programación y puesta en marcha de la gestión centralizada de esta infraestructura.

Esta renovación plantea un reto importante en la automatización de procesos y órdenes que permitan operar con herramientas que faciliten la operatividad y toma de decisiones al gestor de la infraestructura.

El proyecto se divide en dos lotes principales, el Lote1, con un presupuesto de 9,1 M€, consiste en el suministro e instalación del sistema de gestión centralizada, mientras que el lote 2, con un presupuesto de 0,4 M€, contempla la revisión de los algoritmos de ventilación sanitaria y en caso de incendio.

El plazo de ejecución está previsto en un plazo de 30 meses, en un entorno único, dónde la vía sigue viva y prima la confianza y seguridad de los ciudadanos, siendo muy potente y estable el plan de Migración establecido junto con el Plan de Contingencia para abordar de manera eficaz aquellas situaciones que puedan poner en riesgo el desempeño diario, para que este gran despliegue sea trasparente, estable y sin riesgos.

El alcance del proyecto afecta a los tres niveles del sistema de control:

- En el nivel1 se reemplazará: Cabeceras (tarjetas) de las UCDs, Tarjetas DALI, Port Server y Fuentes de alimentación
- En el nivel 2: Sustitución de las 72x2 ERUs por 37x2 PLCs de alta disponibilidad.
- En el Nivel 3: sustitución integra de ambos centros de control.

La renovación de la Red de Transmisión de datos se realizo en 2018.

3.2. Objetivos del Proyecto de Renovación del Centro de Control de Calle 30

El Proyecto se ha diseñado basándose en tres pilares fundamentales:

- Solución de calidad: técnicamente puntera y fiable.
- Proceso de Migración seguro y con mínimas afecciones a los usuarios.
- Asegurar soporte durante su vida útil (soluciones abiertas, basadas en estándares…)

Sin lugar a duda, el objetivo que supone un mayor reto es el segundo, es decir, reemplazar el sistema con la infraestructura en servicio, sin afecciones a los usuarios, por ello este será el tema principal de esta ponencia.

3.3. Mejoras Previstas en el Proyecto de Renovación del Centro de Control de Calle 30

El Proyecto va a suponer una gran cantidad de mejoras sobre el sistema existente, se pueden resumir en dos grandes grupos:

Mejoras funcionales:

- Mayor nivel de automatización, especialmente en la ventilación en caso de incendio.
- Herramientas para automatizar (módulo de planes y reglas).

- Plataforma de comunicaciones unificadas IP: telefonía, radio, grabaciones…
- Generador de informes más potente y de fácil uso.
- Integración de nuevos sistemas auxiliares: GMAO, GIS, C-Roads…
- Plataforma para un fácil y seguro intercambio de información con el exterior.
- Módulo de aprendizaje, para operadores, potente y con altas prestaciones.
- Prestaciones de BI (Business Intelligence): gestión alarmas, eventos, cortes…
- Módulos de gestión y evaluación del tráfico.
- Etc.

Mejoras en la arquitectura y diseño:

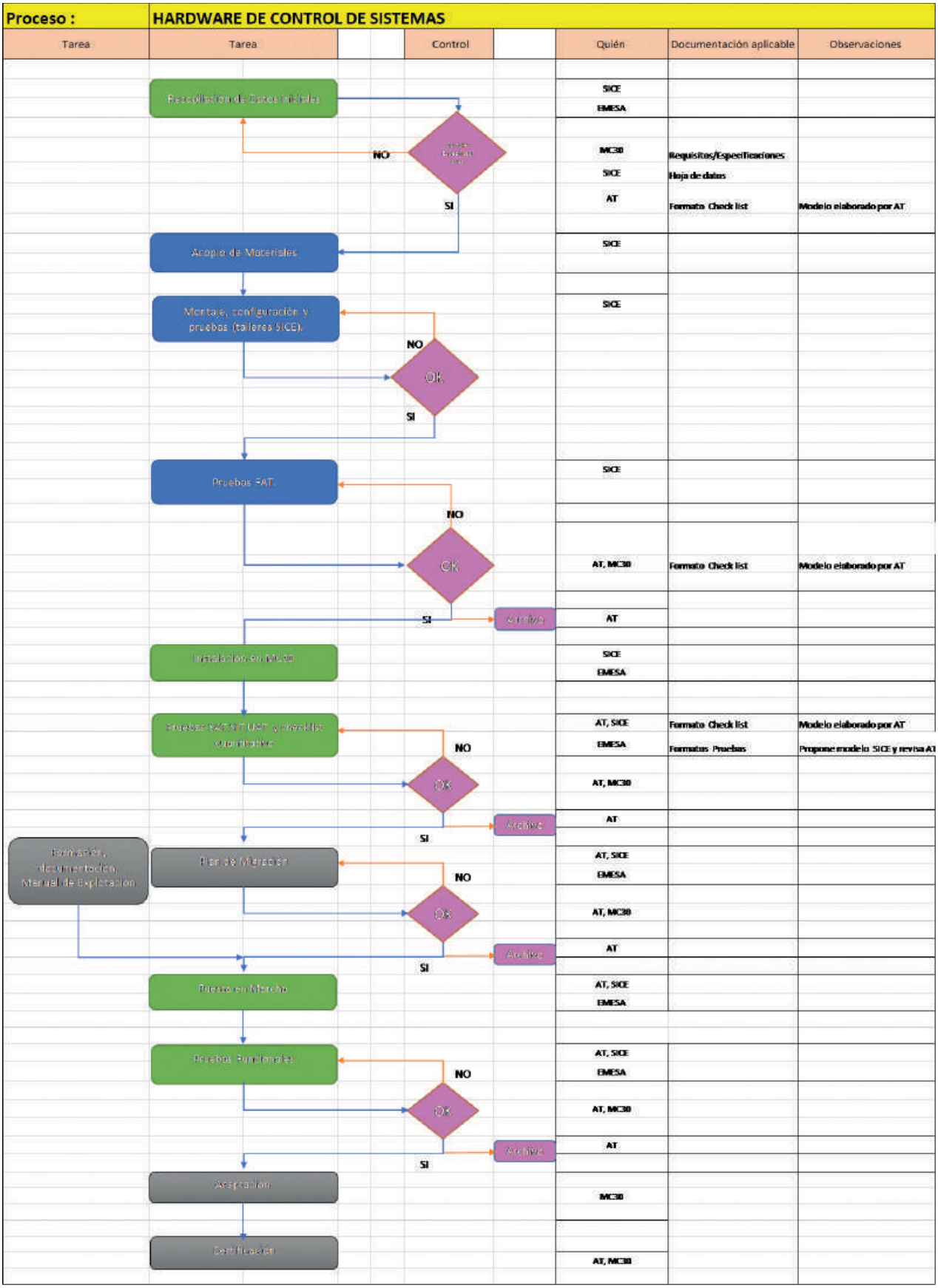
- Sistemas estandarizados, abiertos y fácilmente escalables.
- Uso, en el nivel 2, de PLCs redundantes y de alta disponibilidad en lugar de ERUs. Se trata de una solución más robusta, más abierta. Además, se ha previsto una redundancia en las ubicaciones y en la alimentación.
- En el nivel 3: servidores con arquitectura clúster, máquinas virtuales, mejoras en la conmutación…

4. ACTUACIONES PREVIAS A LA MIGRACIÓN. DISEÑO DE PROCESOS

Una de las medidas tomadas en la ejecución del proyecto es el uso de procesos. Se trata de definir con detalle cada una de las actividades, el orden de ejecución de estas, establecer múltiples puntos de control y de validación, así cuando se llegue a la fase final o migración el nivel de riesgo será muy bajo. Se trata en definitiva de no dejar nada al azar y probar y comprobar todo lo que sea posible antes de realizar el cambio de sistema o migración. En los procesos se definen responsables, documentación aplicable, formatos, caminos de validación, pruebas y protocolos … todo ello se representa de forma grafica de tal forma que sea fácil su seguimiento e implantación.

Cada uno de los pasos o "cajas" del proceso necesita de su propia explicación o documento o incluso de su propio diagrama de flujo. En esta ponencia nos vamos a centrar en la Migración.

En la hoja siguiente se puede ver un ejemplo proceso.


Proceso :
HARDWARE DE CONTROL DE SISTEMAS
Tarea
Tarea
Control
Quién
Documentación aplicable
Observaciones
Recopilación de Datos Iniciales
SICE
EMESA
NO
MC30
SICE
AT
Requisitos/Especificaciones
Hoja de datos
Formato Check list
Modelo elaborado por AT
SI
Acopio de Materiales
SICE
Montaje, configuración y pruebas (talleres SICE).
SICE
NO
OK
SI
Pruebas FAT
SICE
NO
OK
AT, MC30
Formato Check list
Modelo elaborado por AT
SI
Archivo
AT
Instalación en MC30
SICE
EMESA
Pruebas SAT ST UAT y checklist cumplimiento
AT, SICE
EMESA
Formato Check list
Formatos Pruebas
Modelo elaborado por AT
Propone modelo SICE y revisa AT
NO
OK
AT, MC30
SI
Archivo
AT
Formación, documentación, Manual de Explotación
Plan de Mercado
AT, SICE
EMESA
NO
OK
AT, MC30
SI
Archivo
AT
Puesta en Marcha
AT, SICE
EMESA
Pruebas Funcionales
AT, SICE
EMESA
NO
OK
AT, MC30
SI
Archivo
AT
Aceptación
MC30
Certificación
AT, MC30

5. MIGRACIÓN

En términos generales, un Plan de Migración consiste en planificar una estrategia dentro de una organización para mover un conjunto complejo de dispositivos de distinta índole, aplicaciones software y/o sistemas, ajustándose a las prioridades del negocio, con un tiempo de interrupción del servicio mínimo.

A la hora de realizar una planificación detallada y ordenada del plan de trabajo a ejecutar en cada uno de los niveles, hay que tener en cuenta que el servicio debe de estar garantizado en todo momento, independientemente de la fase en la que se encuentre el proyecto, con unas Condiciones Mínimas en la Explotación de la vía que garanticen:

- Completa disponibilidad del Servicio
- Calidad del Servicio
- Reducir al máximo las afecciones al tráfico, trabajando en nocturno si fuera necesario con ocupaciones de calzada que no afecten al usuario
- Mínimo impacto en el ciudadano que transita por la Calle30
- Seguridad, con planes de contingencia rápidos y eficaces

5.1. CONDICIONES MÍNIMAS PARA LA EXPLOTACIÓN (M.O.R Minimal Operational Requirement)

Las Condiciones Mínimas de Explotación tienen por objetivo delimitar el grado necesario de funcionamiento de los diferentes sistemas para poder llevar a cabo la explotación del túnel y van a ser el documento de partida para el diseño del Plan de Migración.

Las Condiciones Mínimas de Explotación pretenden definir protocolos de actuación inmediata por tipo de instalación de tráfico en el cual la indisponibilidad de los equipos que se consideran vitales para la explotación impida mantener un nivel suficiente de seguridad de los usuarios y/o de la calidad de servicio. Rebasar este límite de Condiciones Mínimas para la Explotación puede traducirse en el cierre del túnel hasta que se restablezcan los servicios.

Para definir qué sistemas deben de tenerse en cuenta como vitales en la explotación y determinar estas condiciones de mínimos, se ha tomado como referencia el Real Decreto 635/2006 de 26 de mayo, dónde se recogen los equipos que afectan a la seguridad en los túneles, y en los que es necesario tomar medidas compensatorias en caso de detectarse un fallo, además de aquellos que basados en la explotación de la vía de Calle 30 durante más de 10 años se han considerado que requieren de una atención especial en la gestión diaria (red de comunicaciones por ejemplo).

A continuación, se muestra tabla con los Sistemas, que se contemplan en la definición de protocolos de actuación de servicio degradado:

1. Sistema de Detección Automática de Incidentes
2. Atmosféricos: CO -NO – OP
3. Semáforos Interiores de Túnel
4. Semáforos Exteriores
5. Barreras
6. Estaciones Remotas Universales (ERUS)

7. Detección Lineal de Incendios
8. Sistema de Gestión centralizada, ITS
9. Sistema de Megafonía
10. Circuito de Cámaras (CCTV)
11. Sistema de Ventilación
12. Sistema de Señalización Variable (PMV/PGC)
13. Protección Contra Incendios (PCI)
14. Alumbrado Permanente
15. Rutas de Evacuación
16. Red de Hidrantes
17. Sistema de Alta Tensión
18. Sistema de Alimentación Interrumpida
19. Sistemas de Drenaje
20. Red de Comunicaciones
21. Radiocomunicaciones

Las medidas compensatorias van dirigidas a compensar con medios humanos y/o materiales, efectos irreversibles y significativos, en relación con los cuales no es posible la aplicación de medidas correctoras, hasta que no se solucione la avería.

Cada elemento, se encuentra en cada momento en un estado de servicio, a partir del cual se desencadenan las actuaciones necesarias que garanticen cumplir con unas condiciones mínimas de Servicio y ayuda en la toma de decisiones para el centro de control:

- Estado Nominal. En el que todos o casi todos los elementos del sistema se encuentran prestando la funcionalidad para la que fueron diseñados
- Estado Degradado. Estado de un elemento el cual continúa desarrollando la función para la que fue diseñado en unos límites aceptables, pero inferiores a los valores especificados, o bien continúa desarrollando sólo algunas de sus funciones requeridas

En Calle 30 se han definido los diferentes niveles de servicio, todos ellos asociados a los sistemas de tráfico, o elementos de la infraestructura que puedan versen afectados:

- I-AVE-07(a, b, c). Averías en las instalaciones, estructuras o niveles de instalación que no presenta servicio degradado pudiéndose dar las siguientes situaciones

  a: no es necesario corte para su resolución y se cuenta con repuesto

  b: sí es necesario corte para su resolución y se cuenta con repuesto

  c: no es preciso corte para su resolución y no se cuenta con repuesto
- I-AVE-04. Condiciones de servicio degradado de Nivel 1. Son deficiencias en las instalaciones, estructura o niveles de instalaciones donde existe un sistema redundante y está operativo
- P-AVE-02. Condiciones de servicio degradado Nivel 2. Se produce cuando ocurre un fallo del sistema y no se dispone de redundancia. En este caso se establecen una serie de medidas compensatorias para suplir las carencias derivadas del fallo del sistema

- E-AVE-03. Condiciones de servicio degradado de nivel 3. Se produce cuando tenemos un fallo del sistema, no hay redundancia y las medidas compensatorias o bien no son aplicables o no son suficientes para seguir con la explotación del túnel, en tal caso la Autoridad Administrativa decidirá el cierre al tráfico del tramo afectado o medidas las medidas necesarias para continuar con la explotación normal

Los niveles de servicio siempre están asociados a tiempos de respuesta en la resolución de las averías o correctivos de un sistema, asignándoles prioridades de ejecución de los trabajos para el personal que las resuelve, en base a la afección que provoquen sobre la explotación y si estos afectan o no a la seguridad de la vía.

Hay que tener en cuenta siempre, que las actuaciones que se describen en los protocolos actuación de servicio degradado sobre elementos de la infraestructura y/o instalaciones, se desarrollan en Modo Servicio. Es decir, sin incidencias y/o emergencias de otra índole en la explotación del túnel.

En el caso de que sí ocurrieran situaciones en las que hubiera incidencias de Explotación que supongan un incremento del nivel de riesgo y algún sistema en modo degradado de manera simultánea, siempre se priorizará la seguridad de los usuarios en el túnel y la gestión de la incidencia con los medios disponibles, activando el Plan de Autoprotección, asegurando la evacuación en apoyo con los servicios de emergencia.

El análisis se ha realizado de manera independiente por tipo de instalación, relacionando los correctivos sobre los sistemas, las prioridades establecidas en la resolución de la incidencia en base a la afección sobre la seguridad y el estado de servicio, con diagramas de flujo que facilitan la gestión desde el centro de control y ayuda en la toma de decisiones.

Cada uno de los 21 Sistemas contemplados en el protocolo de actuación y Servicio degradado, disponen de su árbol de decisión particular, diseñado teniendo en cuenta:

- Las características técnicas de cada Sistema
- Las consideraciones particulares previas que se pudieran tener en cuenta de manera independiente por instalación
- Lo dispuesto en el RD 635/2006 para túneles urbanos unidireccionales
- El nivel de Afección a la Seguridad Vial
- Si dispone o no de Sistemas Redundante
- Los mecanismos de alarma, a través de los cuales llega la señal al centro de control para alertar a los operadores
- Las medidas compensatorias a definir dependiendo del tipo de afección

5.2. PLAN DE MIGRACIÓN EN EL PROYECTO DE GESTION CENTRALIZADA DE LOS TÚNELES DE CALLE30

El Plan de Migración para la gestión Centralizada de los túneles de Calle30, debe de estar estrechamente relacionado en cada una de sus fases con las Condiciones Ordinarias de Explotacion del túnel, siendo ésta la prioridad máxima. Para ello se definen diagramas con las medidas compensatorias a aplicar en la fase previa a la migración de un elemento y/o sistema y los planes de acción en caso de que en el desarrollo se produzcan incidencias y/ ó emergencias que comprometan el servicio. Todo ello, en base al protocolo de servicio degradado que aplique del Manual de Explotación de los túneles de Calle 30 y a los planes de contingencia definidos en el plan de trabajo.

En lo que respecta a la arquitectura de control, la solución contempla una migración por niveles, comenzando con el Nivel 1, a continuación, y tras la instalación de arquitectura hardware del centro control y de los PLCs del Nivel 2. Se realizará una migración simultanea de los niveles 2 y 3, por cada uno de los sistemas.

El objetivo es que desde el punto de vista de operación un sistema se controle desde un único centro de control: desde el nuevo o el antiguo.

5.2.1 Estrategia de Migración para Nivel 1

El Nivel 1 comprende la renovación del equipamiento en UCDTs (Unidades de Control Distribuido de Túnel) y UCDEs (Unidades de Control Distribuido de Exterior).

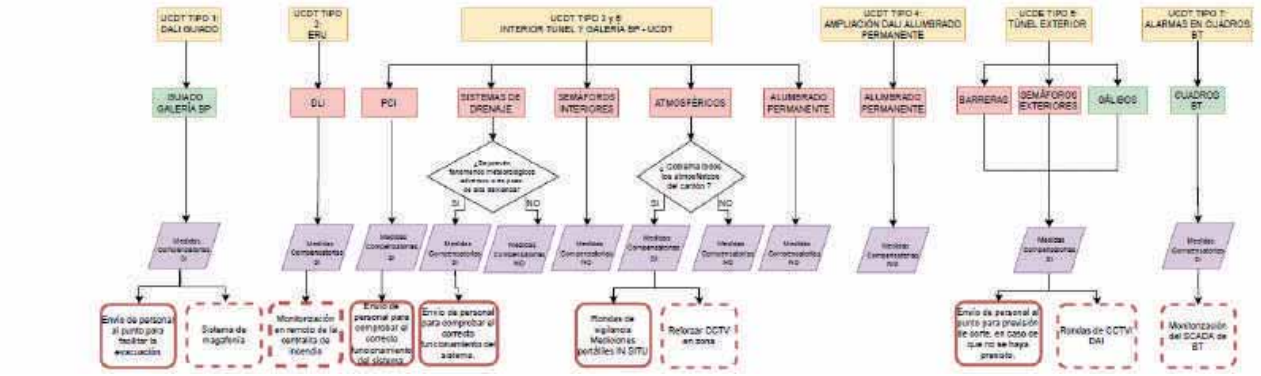
El nivel 1 se migrará en primer lugar y no tendrá ninguna afección a la operación, es decir los operadores verán los equipos de las UCDs migradas igual que antes de migrar.

El objetivo fundamental de la estrategia de migración Nivel 1 es que las UCD estén operativas el mayor tiempo posible.

El diseño detallado del proceso (configuración previa en un entorno fuera de la instalación, el perfecto etiquetado y la correcta coordinación de los pasos a seguir en la sustitución de los componentes) y el estricto seguimiento del mismo, aseguran que el servicio solo se vea interrumpido por el mínimo tiempo necesario para el cambio físico de los componentes en las UCD.

A continuación, se entra en detalle en el proceso de puesta en servicio y migración a nivel 1, siendo la Explotación ordinaria de la vía máxima prioridad:

Fase 0. Planificación. Previo al comienzo de Instalación de cada una de las cabeceras de control, según el plan de trabajo establecido, se debe analizar las medidas compensatorias necesarias para que la calidad de servicio y la seguridad no se vea afectado. Estas medidas a aplicar dependerán de si la cabecera a sustituir contempla o no equipos recogidos en las Condiciones Mínimas de Operación y Servicio Degradado los cuales están recogidos en el Real Decreto 635/2006 de 26 de mayo, y que afectan a la seguridad de los túneles.



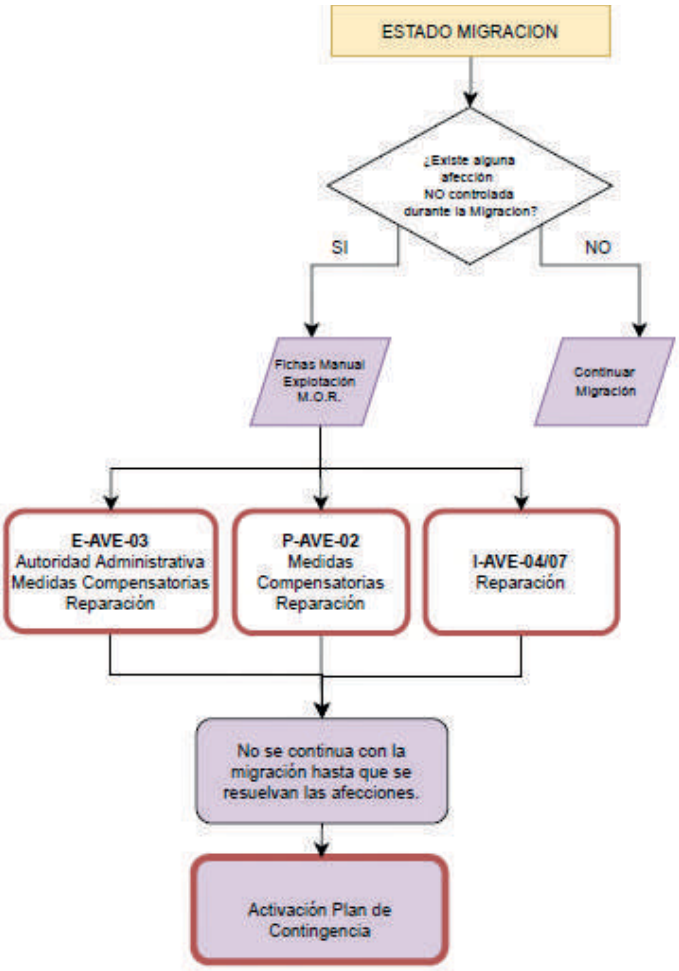
Siendo aquellos que se contemplan en las Condiciones Mínimas de Operación los dispuestos en color rojo.

Fase 1. Inicio. Previo al comienzo en campo de la sustitución de las cabeceras de control, desde el centro de control debe sacarse un informe de estado de la instalación de la zona donde se van a sustituir las cabeceras.

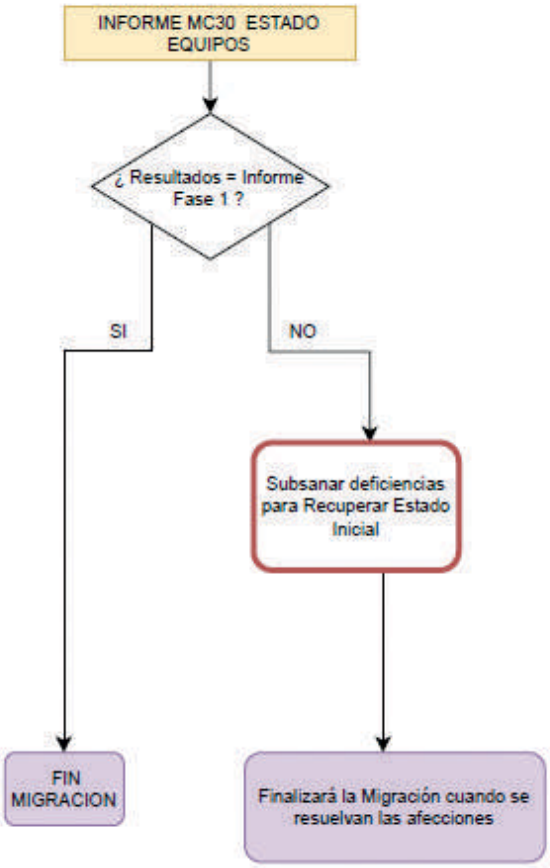
Las fases 2 y 3 se realizarán en horario nocturno, con corte de tráfico del tramo afectado.

Fase 2. Desarrollo. En el caso de que durante la migración ocurrieran situaciones en las que hubiera incidencias o emergencias de Explotación, siempre se priorizará la seguridad de los usuarios en el túnel y la gestión de la incidencia con los medios disponibles, activando el Plan de Autoprotección que corresponda y activando el plan de contingencia definido por el adjudicatario. Suspendiendo la migración hasta que se resuelva la afección.

En el Plan de Autoprotección de Calle 30, se contemplan distintos niveles de servicio, que ya se han descrito anteriormente: I-AVE-04/07 (Servicio Degradado de Nivel 1), P-AVE-02 (Servicio Degradado de Nivel 2), E-AVE-03 (Servicio Degradado de Nivel 3).



Fase 3. Fin. A partir de la fase de instalación, se mantendrá una continua comunicación con la empresa de mantenimiento y los operadores del centro de control, con el fin de confirmar que los componentes sustituidos no presentan ninguna incidencia sobre la explotación y tienen comunicación. Cualquier incidencia ha de detectarse lo antes posible para que se revise y se repare a la mayor brevedad, de manera que no afecte al servicio.



5.2.2 Estrategia de Migración para Niveles 2 y 3

Antes de comenzar la migración se deberán haber ejecutado todos los pasos previos del proceso de cada uno de los sistemas.

La migración no comenzara hasta que se tengan instalados todos los PLCs y todo el Hardware y Software de ambos centros de control, de tal forma que convivan ambos sistemas. El existente será desde donde se opere el túnel y el proceso de migración consistirá en ir pasando el control de un sistema completo, p.e. ventilación, iluminación… al nuevo Centro de Control.

A continuación, se detalla la estrategia de migración para los niveles 2 y 3, al realizarse por sistemas, se podrá ir pasando de manera escalonada el control al sistema renovado, minimizando el impacto sobre la explotación, operando de este modo por conjunto de sistemas sobre una misma plataforma.

Para ello, se ha realizado una división de los sistemas agrupándolos en tres:

A. Sistemas integrados directamente en SCADA. Son equipos integrados directamente a nivel 3, no pasando estos ERU/PLC

B. Sistemas integrados en Scada a través de los PLCs de Siemens por OPC UA y que anteriormente se integraban en ERU por protocolo DGT. Son equipos integrados de nivel 2 a nivel 3

C. Sistemas integrados en ERU/PLC mediante protocolo Modbus, diferenciando para la migración aquellos que son solo de lectura y aquellos los que se pueden además enviar órdenes

Los primeros equipos (tipo A), se pueden migrar de manera independiente al no estar incluidos en el nivel 2, son sistemas externos con scadas propios que minimizan el impacto, al poder ser gestionados individualmente desde una aplicación de terceros.

Los segundos (tipo B) requerirán una intervención especial en las ERUs para interrumpir su acción sobre ellos, e integrarlos directamente en el nivel 3. Estos equipos son los equipos de tráfico de tipo PMV, PGC y ETD.

Los terceros de tipo C, se integrarán con la misma estrategia que se va a presentar en el apartado de migración de nivel 2. Se abordarán simultáneamente en el nivel 2 y en el 3, tanto para las pruebas de estados como para las pruebas de comandos y algoritmos para una mayor agilidad y, sobre todo, para que los equipos que se detecten como críticos (los que requieren de unas condiciones especiales para la explotación) tengan una afección mínima al tráfico.

Estrategia de Migración para Nivel 2

La renovación incluye la sustitución de (36) ERUs por un total de treinta y seis (36) PLCs de Campo en configuración redundante Hot Standby (formados por dos PLCs individuales).

El objetivo fundamental de la estrategia de migración Nivel 2 es que toda la funcionalidad que reside actualmente en las ERUs sea migrada a los nuevos PLCs y que el proceso de reconexión de los equipos de campo desde las ERUs hacia los PLCs se produzca con la menor pérdida de servicio posible.

Para ello se instalarán los nuevos PLCs incluyendo el software, de tal forma que convivirán con las actuales ERUs

Hay que destacar que durante este proceso de migración y validación el túnel sigue operándose desde el antiguo Scada. Durante las pruebas algunos equipos dejarán de estar disponibles en el scada antiguo, pero lo estarán en el scada nuevo. En la organización se prioriza mantener el máximo equipamiento disponible en el sistema de control de explotación (SCA), no quedando ningún elemento fuera de servicio. Si no está disponible en el antiguo scada lo estará sobre el nuevo.

Las fases 2 y 3 se realizarán en horario nocturno, con corte de tráfico del tramo afectado.

La migración a este nivel no se completará hasta que todos los sistemas hayan sido probados en cada una de las áreas funcionales, siendo validadas y pasando a operarse con el nuevo sistema de PLC.

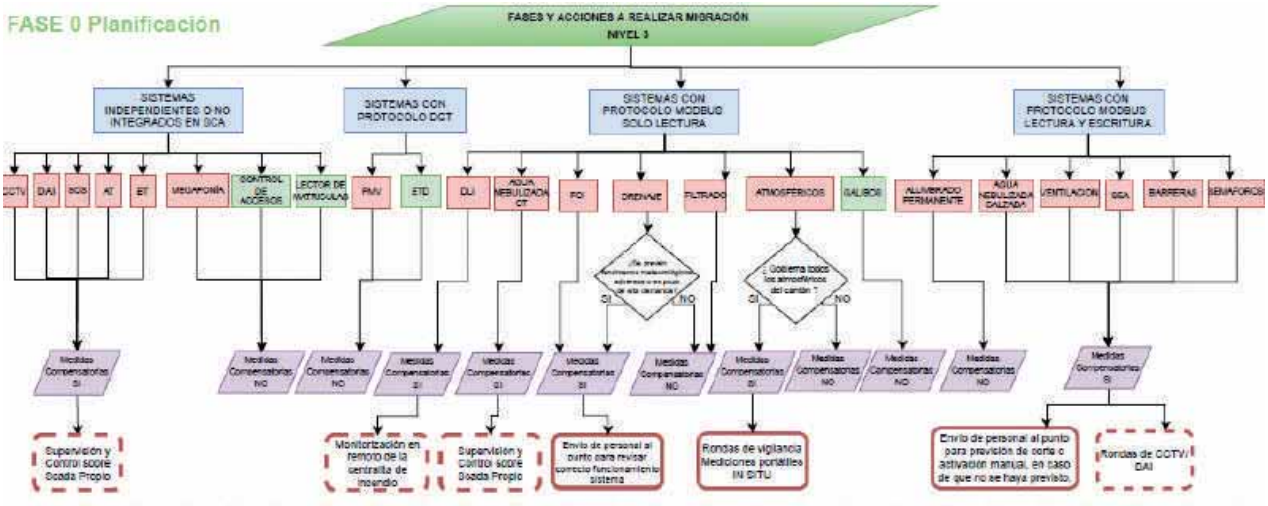
Validación de PLC individualmente

- Pruebas de Comandos. Se realizará comprobación de estados en los que en paralelo ERU y PLC leen estados de los equipos de las UCD. Comparación automática mediante informes generados en ambos scadas de que se reciben los mismos estados.
- Pruebas de Estados/Comandos. En este caso se inhibe la operación entre ERU y antiguo scada, haciendo comprobación de Estados y operativa sobre el sistema de control nuevo de cada uno de los sistemas integrados en PLC y se comprueba que se establecen los estados deseados, devolviendo el control al antiguo Scada una vez finalice la prueba.

- Validación software de PLC individualmente. En este caso se comprueba la lógica de control (algoritmos) de cada uno de los sistemas en PLC.
- Migración Definitiva de ERU a PLC. Se ejecutará una vez se hayan ejecutado satisfactoriamente las validaciones anteriores.

Del mismo modo que en el nivel 1, se han definido distintas fases en el proceso de migración, pudiéndose utilizar el mismo diagrama de fases y acciones a realizar en el Nivel 2 y 3, por compartir procesos en algunas de las validaciones, tanto para las pruebas de estados como para las pruebas de comandos y algoritmos.

Fase 0. Planificación. Antes de comenzar, hay que tener previstas las medidas compensatorias a aplicar dependiendo del sistema al que afecte la migración, si este se considera como crítico o no en las condiciones mínimas de servicio degradado (M.O.R), y teniendo en cuenta si son sistemas externos independientes integrados sólo a nivel 3 o si además pasan previamente por nivel 2 (PLC) diferenciándose los que solo presentan estados y sobre los que se puede operar.



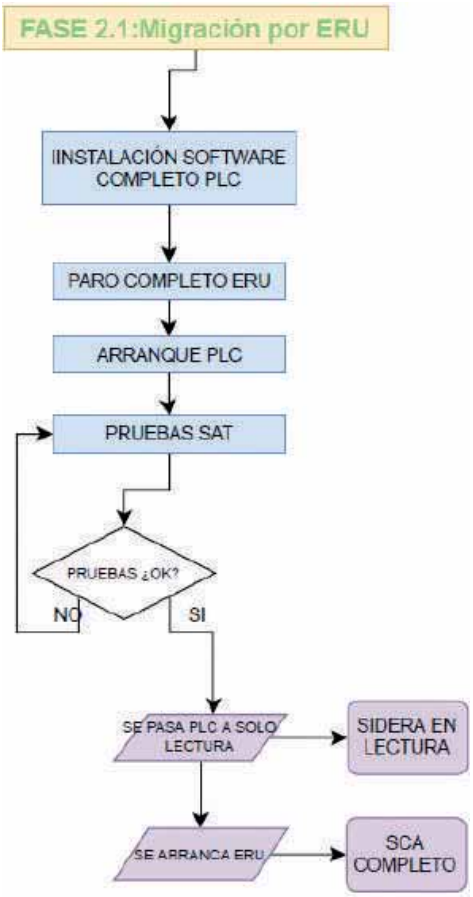
Fase 1. Inicio. Previo al comienzo, desde el centro de control deberá de sacarse un informe de estado de la instalación, para tener controlada la misma tanto al inicio como al final del proceso, priorizando el servicio.

Las fases 2 y 3 se realizarán en horario nocturno, con corte de tráfico del tramo afectado.

Fase 2. Desarrollo. A nivel 2 en esta fase se contempla la migración de ERU por PLC, las pruebas se realizan por sistemas integrados en ERU, parando esta y pasando el control al PLC, mediante la comprobación de estados y lógica de control de cada sistema.

El plan de trabajo contempla pruebas protocolizadas, ordenadas y exhaustivas del funcionamiento de los PLC en fábrica (FAT: Factory Acceptance Test), en entornos de desarrollo antes de ser entregados al cliente.

Desde el entorno de producción, el primer paso contempla la instalación en paralelo de ERU y PLC, para así disponer en todo momento de ambos sistemas conectados, ERU al scada antiguo (llamado SCA en Calle30) y PLC al nuevo (llamado SIDERA en Calle30), para que en el caso de tener que lanzar un plan de contingencia se estableciera de manera rápida y segura, lo que reduce considerablemente el tiempo de indisponibilidad del servicio.



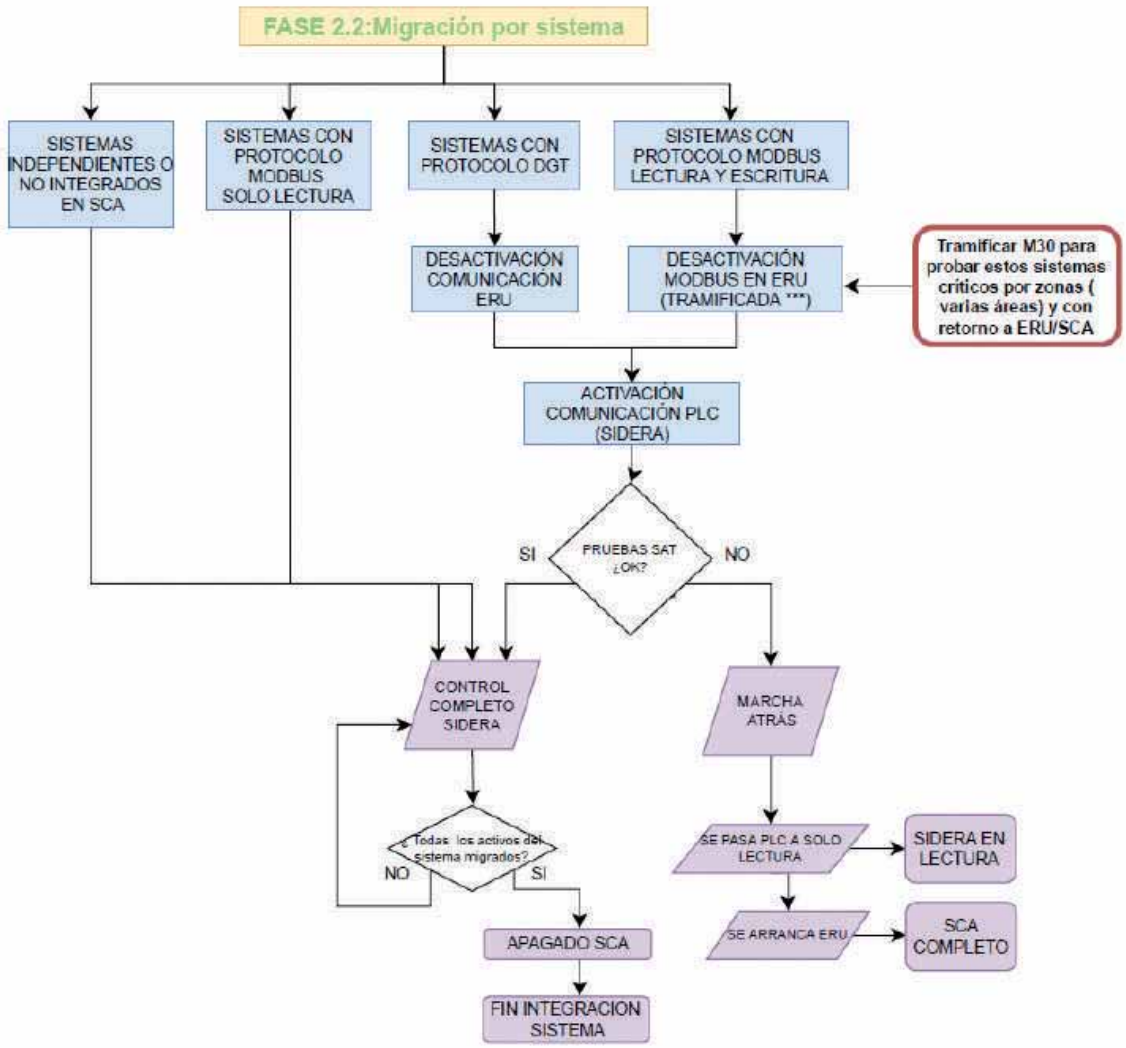
En cuanto a las pruebas SAT, llamadas "Site Acceptance Test" o "Pruebas de aceptación en terreno". Estas pruebas son muy similares a las anteriores, pero al contrario de lo que ocurre con las pruebas FAT, estas pruebas se realizan ya en la ubicación donde se va a implantar el PLC definitivamente, es decir, es decir en los cuartos técnicos.

El objetivo de estas pruebas es asegurar que todo funciona correctamente en el entorno de producción real y que se puede operar sin dificultades, recibiendo estados de cada uno de los sistemas integrados, y verificando que la lógica de control cumple con los requisitos establecidos.

Una vez finalizadas las pruebas SAT, los equipos o sistemas en cuestión quedan instalados y pueden empezar a ser utilizados, con la seguridad de que no contiene a priori ningún error y que cumplirá con todos los requisitos.

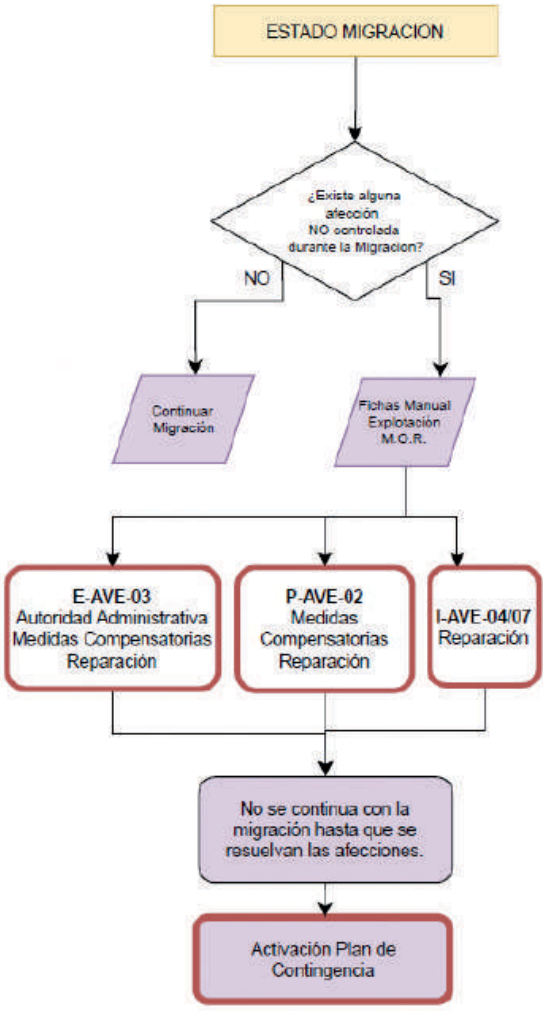
El control definitivo sobre cada PLC de zona será al final cuando se hayan probado todos los sistemas de cada uno de los tramos.

Cuando la migración, se traslada ya al último Nivel donde prima la operatividad desde el centro de control (Nivel 3), los sistemas pasan a ser controlados desde la nueva aplicación de gestión centralizada, con una estrategia de migración por Sistemas completos, para que el operador opere ese sistema en exclusividad sobre una única plataforma, evitando complicar la explotación y reduciendo los fallos a la hora de operar por tener un mismo sistema descentralizado.



Los sistemas son sometidos de nuevo a pruebas estados y lógica de control, previamente ya validadas en nivel 2.

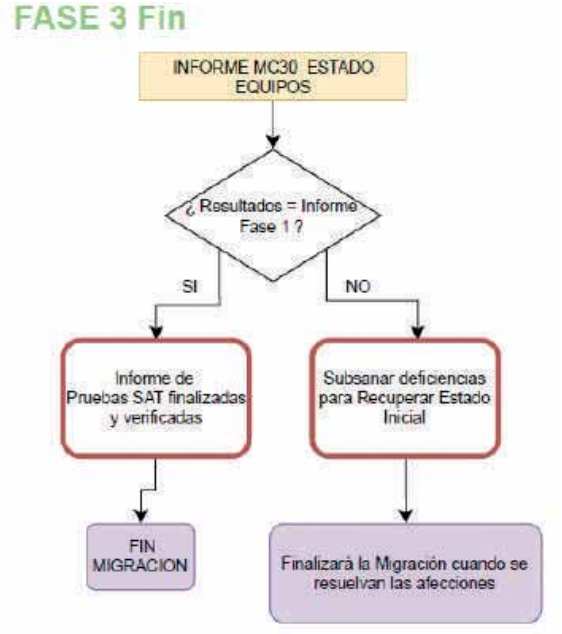
Como durante todo el proyecto siempre es importante asegurar la calidad del servicio y la seguridad del usuario, priorizando las condiciones ordinarias de la explotación y activando los planes de contingencia necesarios según el nivel de afección, si fuera necesario:



Fase 3. Fin. Una vez finalizado el proceso, se debe de comprobar que la instalación mantiene la misma funcionalidad que en momentos previos y no presenta anomalías que impidan la explotación normal del servicio.

Cualquier incidencia ha de detectarse lo antes posible para que se revise y se repare a la mayor brevedad, minimizando los tiempos de indisponibilidad del servicio.

En definitiva, el proyecto de Gestión Centralizada de los túneles de Calle 30, supone sin duda un reto para los que a diario intervenimos en la gestión ordinaria de la circunvalación de una de las vías más importantes de España, la M-30. Para ello, contamos con la profesionalidad y dilatada experiencia del personal que mejor la conoce, así como con unos procedimientos de actuación muy estudiados para que el proyecto pueda realizarse de manera exitosa minimizando la afección a la explotación.


FASE 3 Fin
INFORME MC30 ESTADO EQUIPOS
¿ Resultados = Informe Fase 1 ?
SI
NO
Informe de Pruebas SAT finalizadas y verificadas
Subsanar deficiencias para Recuperar Estado Inicial
FIN MIGRACION
Finalizará la Migración cuando se resuelvan las afecciones

KITT – ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO IMPROVE THE SAFETY OF TUNNELS AND TUNNEL CONTROL CENTRES

Anne Lehan[1], Hendrik Wahl[1], Harald Kammerer[2], Bernhard Klampfer[2]

[1]Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Germany
[2]ILF Consulting Engineers Austria GmbH, Linz, Austria

Developments in the field of digitalisation of the road and its infrastructure are strongly aimed at connected and automated driving. The collection of vehicle mobility data and its use for traffic mon-itoring and control can make a significant contribution to preventive event detection and the early initiation of protective measures for tunnel control centres. In particular, information from Car-to-Infrastructure-Communication (C2I) can be used to improve the reliability of event notifications as well as the response time in case of an emergency. By using real-time risk assessment of safety in tunnels, it is possible to intervene in a controlling manner before the event occurs and thus miti-gate or even completely avert negative effects. The potentials arising from the additional infor-mation from mobility data are faced with major challenges, e.g. how to check the integrity of these large volumes of data, and how to select, merge, analyse and evaluate them systematically. Here, the application of weak artificial intelligence (AI) is considered as a very promising method. With that in mind, the research project KITT – "Artificial Intelligence to Improve the Safety of Tunnels and Tunnel Control Centres" is investigating for the first time the possibility of carrying out a risk assessment of the overall safety situation in tunnels in real time by using weak AI on the basis of sensor-based data from the conventional tunnel operation and traffic engineering equipment. On the other hand, it is being investigated which additional vehicle data from C2X-communication could be available in the future. It is expected that their targeted use will contribute to a significant increase in tunnel safety and to maintain the availability of tunnels.

KITT - INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA MEJORAR LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES Y LOS CENTROS DE CONTROL DE TÚNELES

Los avances en el campo de la digitalización de la carretera y sus infraestructuras están fuertemente orientados a la conducción conectada y automatizada. La recopilación de datos de movilidad y su uso específico para la vigilancia y el control del tráfico pueden contribuir de forma significativa a la detección preventiva de eventos y a la puesta en marcha temprana de medidas de protección para los centros de control de túneles. En particular, la información procedente de la comunicación co-che-infraestructura (C2I) puede utilizarse para mejorar la fiabilidad de los mensajes de eventos, así como el tiempo de respuesta en caso de emergencia. Gracias a la evaluación de riesgos en tiempo real de la seguridad vial en los túneles, es posible intervenir de forma controlada antes de que se produzca el suceso y así mitigar o incluso evitar por completo los efectos. Los potenciales que sur-gen de la información adicional de los datos de movilidad se enfrentan a grandes retos, por ejem-plo, cómo comprobar la integridad de estos grandes volúmenes de datos generados de esta mane-ra, y cómo seleccionarlos, fusionarlos, analizarlos y evaluarlos de forma específica. En este caso, la aplicación de la inteligencia artificial (IA) se considera un método prometedor.

En este contexto, el proyecto de investigación KITT -Inteligencia Artificial para Mejorar la Seguridad de los Túneles y los Centros de Control de Túneles- está investigando por primera vez la posibilidad de realizar una evaluación del riesgo de la situación general de la seguridad en los túneles en tiem-po real utilizando la IA. La base aquí es, por un lado, los datos apoyados por sensores de las instala-ciones convencionales de explotación de túneles y de ingeniería de tráfico. Por otro lado, se está investigando qué datos de los vehículos deberían estar disponibles adicionalmente para el análisis de riesgos en el futuro, ya que su uso específico debería contribuir a aumentar significativamente la seguridad en las instalaciones de los túneles y a mantener la disponibilidad de las mismas.

KITT - L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR AMÉLIORER LA SÉCURITÉ DES TUNNELS ET DES CENTRES DE CONTRÔLE DES TUNNELS

Les développements dans le domaine de la numérisation de la route et de son infrastructure sont fortement axés sur la conduite en réseau et la conduite automatisée. Grâce à la saisie de données de mobilité et à l'utilisation ciblée de ces données afin de surveiller et influencer le trafic, les centres de contrôle des tunnels peuvent contribuer considérablement à la détection préventive d'événements ainsi qu'à l'introduction précoce de mesures de protection. Les informations prove-nant de la communication de véhicule à infrastructure (C2I) peuvent notamment être utilisées pour améliorer la fiabilité des messages d'événements ainsi que le temps de réaction en cas d'urgence. Grâce à une évaluation des risques pour la sécurité routière dans les tunnels en temps réel, il est possible d'intervenir avant que l'événement ne se produise et ainsi d'en atténuer, voire éviter les conséquences. Les potentiels qui découlent des informations supplémentaires issues des données de mobilité sont confrontés à des défis importants, comme par exemple la question de la façon à vérifier l'intégrité des grandes quantités de données fournies, suivie de la question comment les sélectionner, regrouper, analyser et évaluer de manière ciblée. Dans ce but, l'utilisation d'une intel-ligence artificielle (IA) est considérée comme un procédé prometteur.

Dans ce contexte, le projet de recherche KITT - Intelligence artificielle dans l'amélioration de la sé-curité des tunnels et des centres de contrôle des tunnels - étudie pour la première fois la possibilité d'utiliser une IA pour évaluer en temps réel les risques liés à la situation de sécurité globale dans les tunnels. À la base de ceci sont d'une part les données reçues des capteurs de l'équipement con-ventionnel d'exploitation et de l'ingénierie du trafic. D'autre part, il s'agit d'examiner quelles don-nées des véhicules devront être disponibles en supplément à l'avenir pour l'analyse des risques, car leur utilisation ciblée devrait contribuer à augmenter considérablement la sécurité dans les tunnels ainsi que la disponibilité.

1. INTRODUCTION

Digitalisation and the desired networking open up a new possibility: the use of the traffic collective as a fully digitalised mobility, information and communication platform. This technology, known as C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems) and to be regarded as an extension of driving assistance systems, should in future make it possible for additional information to be available for the infrastructure operator and for the road user to assess the current traffic or safety situation in the tunnel. [1]

To date, a distinction has been made between the technologies C2C, C2I and I2C. C2C communica-tion describes the exchange of data between vehicles. C2I refers to the communication from the vehicles to the infrastructure or I2C, the communication from the infrastructure to the vehicle. Here, information is to be exchanged between the road user (or his vehicle) and the traffic infra-structure via corresponding interfaces, so-called Road Side Units (RSU) [2]. The current technical developments of C2X communication for the tunnel sector are described in [3] and [4]. Overall, the exchange between vehicles and with the superordinate infrastructure can have a preventive effect on the avoidance or reducing the extent of incidents through early intervention in the traffic flow. Significant, vehicle-specific information can be made available to an even wider range of users.

The Cooperative Awareness Messages (CAM) and Decentralised Environmental Notification Mes-sages (DENM) formats used to transmit information are considered particularly relevant in the con-text of tunnel safety [5].

CAMs contain static and dynamic information on the status of a vehicle, such as position, direction, speed or vehicle type (car, truck, etc.). CAMs are sent within the mobile ad hoc network by the vehicles included in it at least once per second. This format provides the information that is under-stood as C2I data. A detailed description of the structure and content of a CAM according to ETSI TS 102 637-2 [6] is presented in section 3.3.1.

The DENMs are notifications of road users and infrastructure systems in case of safety-critical events with additional event information. Corresponding messages can be e.g. accident, emergen-cy braking, traffic jam, road works or tunnel closure. In contrast to the CAM, a message is not sent continuously, but on an event basis. The structure and content of a DENM according to ETSI TS 102 637-3 [7] is described in section 3.3.2.

The continuously transmitted CAMs and the event-based DENMs generate a flood of information that cannot be processed meaningfully and in a reasonable time without the support of machine-supported procedures. In the future, this will require procedures that can meaningfully merge the information obtained from the innovative C-ITS technology with the conventional information from the tunnel control centre and check its plausibility. The information generated from this should then be processed and forwarded to operators, emergency services and road users in the event of safety-critical deviations. Artificial intelligence can be a means of quickly generating information relevant to tunnel safety from the large volume of data.

The KITT project (Artificial Intelligence to Improve the Safety of Tunnels and Tunnel Control Cen-tres) was initiated to identify and exploit these potentials of C2X technology and to investigate the application of AI. The main research questions are the improvement of information and data quality within road tunnels (smart data), the optimisation of response times and the increase in the relia-bility of event notifications.

In addition, KITT will for the first time investigate the possibility of carrying out a risk assessment of the overall safety situation in tunnels in real time by using AI. The basis here is formed by sensor-based data from conventional tunnel operation and traffic engineering facilities. On the other hand, it is being investigated which vehicle data from C2X communication should additionally be available for risk analysis in the future. Their targeted use will contribute to a significant increase in safety and to maintaining the availability of tunnels. This paper will present the first findings of the KITT project. Requirement profiles resulting from existing specifications of tunnel safety and C2X-communication as well as potentials and utilisation concepts for the integration of C2I information will be shown.

2. REQUIREMENT ANALYSIS

The essential step in the conception of the KITT approach was first to determine the requirements. For this purpose, a literature research was carried out in a first step, in which the current state of the art as well as current developments with regard to the use of C-ITS were recorded. In this re-gard, the previous application of AI processes in tunnels and the associated potential for adaptation were also examined. Due to the high level of interdisciplinarity, the study was divided into four core areas:

- Tunnel safety
- C2X
- IT-Security
- AI

In addition, practical requirements must also be recorded, which are to be defined in particular by stakeholders in tunnel operation or tunnel safety and which represent the conditions for a practical application. This was done within the framework of the project by means of a user demand analysis in which different experts (for example tunnel operators, tunnel managers) were interviewed. The special focus of the analysis was to identify innovative information that can be generated through C2X communication and that can support tunnel safety management in the future in the course of optimised measures or recommendations for action.

The results of the literature research in the form of fact sheets and the user demand analysis were transferred into corresponding requirement profiles for the topics of tunnel safety, C2X and IT se-curity. The procedure and individual results for the creation of the requirements profiles are pre-sented below.

2.1. Preparation of fact sheets

The aim of the literature research was to first determine the requirements that result from existing principles and that have to be taken into account in the conceptual development of KITT. On the one hand, this includes regulatory requirements that apply to the corresponding core areas, but also methodological approaches that go beyond this, as well as projects that are connected to the project content of KITT.

Figure 1 shows an overview of the objects of investigation in the individual topic areas. Fact sheets were prepared for these, from which the basic principles to be taken into account for the KITT pro-ject emerged for the most part and were taken into account in the derivation of requirement pro-files.

Tunnel Safety	C2X	IT-Security	AI
Detection	On-board subsystems	C2I Security	Tunnel operation
Assessment	Infrastructure subsystems	Public Key Infrastructure (PKI)	Tunnel maintenance
Information	Wireless interfaces	IT Security Standards	Predictive tunnel maintenance
	Communication protocols	OT Security Standards	Tunnel cyber security
	C2X functions	Open Architecture	
	IT security solutions	External interfaces	
		Internet of Things (IoT)	

Figure 1: Outlining the core areas to be taken into account and their focal points

2.2. User demand analysis

In order to take into account practice-based needs and expectations, but also to capture the state of development and knowledge of the stakeholders responsible for tunnel operation and tunnel safety, expert interviews were conducted with various stakeholders.

The aim was to record the status quo with regard to activities that have already taken place or are currently taking place for the use of C-ITS as well as to determine future user needs. This was done in particular in the form of additional information that is considered important, which results from C2I, especially for preventive event management, but also for the processing of measures after an event has occurred. It was also determined whether and how the application of AI procedures could be used for safety assessment in tunnels and in what form a visualisation of the new C2I data could take place in the context of regular tunnel monitoring, also taking into account IT security requirements in particular. Ethical and legal aspects regarding AI applications and vehicle-related information were also addressed. Excerpts of the results for the areas of C-ITS and AI are present-ed below.

2.2.1. Topic area C-ITS

For the topic C-ITS, opportunities and potentials for improving tunnel safety were seen. The use of additional C2I information is expected to lead to earlier detection and faster initiation of targeted measures, but also to a reduction in false alarms through plausibility checks with the additional in-formation sources. In the area of evaluation, the supporting evaluation of the safety level in real time was seen as highly relevant. In particular, the dissemination of information to other actors to be involved, such as emergency and rescue services, but also to road users, was assessed as having great potential. However, risks were also identified, such as concerns about access and manipula-tion of the communication interface at the system level by opening up a previously closed monitor-ing and control system, the lack of standardisation, concerns about the dependence of vehicle manufacturers and the costs for the additional infrastructure to be provided. In addition, with re-gard to the user level, it was pointed out that due to the additional information from the C2I, ex-cessive demands on the operators should be avoided, while at the same time the ability to act should be maintained despite the desired automation.

Table 1 shows the additional information mentioned in the expert interviews that the interviewees would assess as valuable for corresponding risk situations and events.

Table 1: Listing and allocation of potential C2I data to support detection and assessment

Data type	Desired C2I-Data point	Detection and assessment of critical situations and events											
		Broken down vehicle	Collision	Collision with dangerous goods	Wrong-way driver	Slow-driving vehicle	Poor visibility	Congestion/ stop-and-go traffic	Fire	Fire with dangerous goods	Fire risk (overheating vehicle parts)	Danger spot in the tunnel	Emergency call	Insufficient safety distance
General traffic data	Number of vehicles in tunnel		●	●		●		●	●	●		●		
	Position of vehicles in tunnel	●	●	●					●	●		●		
	Number of persons in vehicles		●	●					●	●				
	Collective vehicle speed	●	●	●		●	●	●	●	●		●		●
	Collective speed reduction	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●		
Vehicle-specific data	Type of cargo/ dangerous goods	●	●	●	●				●	●				
	Fire load		●	●					●	●				
	Ratio of braking processes	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●		●
	Tyre pressure decrease	●	●	●								●		
	Airbag deployment		●	●					●	●				
	Overheating of vehicle parts	●							●	●	●	●		
	Type of drive (Energy carrier)	●	●	●					●	●			●	

2.2.2. Topic area artificial intelligence

With regard to the supportive use of AI procedures for safety assessment as well as the potentials and opportunities to be assessed, the experts' assessment largely coincided with those of the use of C-ITS. A major advantage was seen in the matching combination of several detection systems. On the one hand, a qualitative and temporal advantage is expected due to the increased infor-mation density. On the other hand, it is assumed that false alarms can be reduced by plausibility checks from different systems. Overall, this is seen as increasing the efficiency of traffic monitoring and control. Here, too, obstacles and risks lie predominantly in the handling of the AI with the new data from the C-ITS, such as the lack of verification or possible misinterpretation of the data by the AI, the lack of legal framework conditions for the use of AI and the requirement of extensive data bases for training the AI. A particularly important as well as contradictory requirement of the inter-view partners is the presentation of the data in raw form and thus no pre-processing by third par-ties such as the vehicle manufacturers. However, due to a lack of knowledge of the system, this requirement could not be specified further, whether raw data means data supplied directly from the vehicle sensors or from the vehicle systems. However, it is made clear that the aggregation of data and the resulting dependency on vehicle manufacturers or system suppliers is considered critical.

Overall, it could be determined for both C-ITS and AI that there have been very few points of con-tact with both topics in practice to date. However, the requirements derived from the interviews (plausibility of data, reliable, largely unprocessed information, etc.) must be taken into account in the design of KITT procedures. However, it should also be emphasised at this point that the re-spondents see a great added value in AI as well as in the integration of C2I data, since considerably more information of a consistently higher quality could be available, which could lead to an increase in the quality of information in the assessment of the situation.

2.3. Derivation of requirement profiles

From the identified basics and the corresponding demands of the users, corresponding require-ment profiles were derived for the areas of tunnel safety, C2X communication and IT security. These are intended to summarise the results of the requirements analysis with regard to the in-tended goals in KITT. This also includes the requirements for the integration of an AI for tunnel monitoring.

For the purpose of delimiting the requirements from the different topics, these were recorded depending on the respective stakeholders. Relevant stakeholders in KITT are vehicle users in front of and in the tunnel, tunnel operators and infrastructure managers, and emergency services.

For further comparability of the different topics, the general interests and goals of the individual stakeholders were first recorded and the respective functional and informative requirements for C-ITS systems were determined as a result of the fact sheets and the user demand analysis. In the following, the requirement profiles for tunnel safety and C2X communication are explained in ex-cerpts.

2.3.1. Requirement profile tunnel safety

The overriding objective of tunnel safety is to ensure the safety of road users. This is achieved through adequate protection against collisions and fires as well as the optimised handling of self-rescue and emergency rescue measures. For the development of the requirements profile from the point of view of tunnel safety, a breakdown was made into the three topics of detection, as-sessment and information.

Due to the specific requirements regarding the type, scope and accuracy of information, the tunnel safety requirement profile further distinguishes the group of vehicle users as an essential stake-holder, depending on whether they are still in front of or already in the tunnel. For road users in the tunnel, there is a direct impact on tunnel safety, and accurate and precise information is re-quired. The effects for vehicle users before the tunnel, on the other hand, do not occur directly and active intervention is possible even before entering the tunnel. With regard to the definition of requirements, the focus is on those aspects where innovative systems are used in the course of KITT:

- The detection requirements are defined in terms of the use of C-ITS.
- For the topic of assessment, the use of real-time risk analysis is considered.
- The visualisation of the information from the innovative systems (C-ITS, AI, real-time risk analysis) to the stakeholders takes place both with the help of conventional visualisation and through innovative C-ITS (e.g. through I2C).

Requirements for detection and assessment only arise from the point of view of the tunnel opera-tors or infrastructure managers, as only these are actively involved in these processes. The goals consist of supporting the operators, e.g. by reducing false alarms, as well as optimising tunnel oper-ation through real-time information. In order to achieve these goals, it is necessary to provide the information quickly via the C2X interface and to process it accordingly (e.g. plausibility check with tunnel data, assessment with real-time risk analysis). Recommendations for action to be derived from this depend on a high reliability of the C2X technology and further information processing. Frequent errors in the detection of events and thus erroneously execu-

ted switching actions would critically inhibit the acceptance of the systems. In particular, additional information from the C-ITS such as vehicle speeds, vehicle types and number of vehicles in the tunnel as well as the associated number of people are seen as particularly valuable for detection or assessment with the help of real-time risk analysis.

This information must be prepared accordingly in the course of visualisation. Different require-ments arise depending on the stakeholder. In the case of tunnel operators, who need to have a quick overview of the situation, especially in the event of an incident, simple, clear and self-explanatory information is required in a first step. After the initial reaction to the event, the opera-tor should be able to obtain detailed information on the origin of the data in the second stage and then initiate further measures if necessary. If emergency services are involved in the incident man-agement, relevant information shall be prepared in the system according to their requirements. For vehicle users before and in the tunnel, whereas, appropriate warnings and instructions for action in the event of an incident are relevant.

2.3.2. Requirement profile C2X-communication

The requirements profile for C2X communication defines requirements for vehicle side subsys-tems, infrastructure side subsystems, radio interfaces (hardware based) and communication (soft-ware based).

For the area of on-board subsystems, the functional requirements for the on-board unit on the part of the tunnel operators and the emergency services include the bidirectional sending and re-ceiving of data and messages, on-board processing of data, a minimum throughput rate of C-ITS-capable vehicles, and the quality and accuracy of the data. The vehicle user stakeholder, on the other hand, is considered to have requirements that focus more on easy-to-understand outlining. It was also summarised which different information requirements exist on the part of the stake-holders. For tunnel operators, this tends to be very detailed information that, in addition to the event itself, also depicts the surrounding situation, while for vehicle users, warnings of disruptions and preceding events, such as the end of traffic jams or broken-down vehicles, are of more inter-est. For the operational organisation, information that is highly relevant for operational planning is naturally relevant.

With regard to infrastructure requirements, the functional requirements for data acquisition, transmission and processing were listed from the perspective of the various stakeholders. While the requirements of the tunnel operators tend to focus on seamless data collection and transmis-sion as well as pre-processing of the data, vehicle users expect to receive only the information that concerns them and their vehicle.

As far as radio interfaces are concerned, vehicle users and emergency services only require reliable data transmission. Tunnel operators, on the other hand, expect the use of widespread technolo-gies with a corresponding range, high availability, low transmission latencies or sufficient transmis-sion capacities. The WLAN standard is preferred, as it fulfils all the aforementioned criteria and rep-resents a cost-effective variant.

Finally, the requirements for software interfaces for communication are listed in this requirements profile. In this case, vehicle users focus on maintaining data protection or the authenticity of the information. Tunnel operators have the requirements that standardised protocols are used for data transmission and that this is continuous and event-oriented. In addition to data and transmission security, real-time data transmission is also a requirement here.

The identified requirement profiles subsequently serve as the basis for the development of the utilisation concepts, which in turn are to provide the basis for the construction of the KITT ap-proach.

3. DEVELOPMENT OF A UTILISATION CONCEPT FOR THE INTEGRATION OF C2X AND AI

The objective in creating a utilisation concept is to show which requirements should be implement-ed in a KITT approach. It must be taken into account that there are requirements that can be im-plemented directly, but also requirements for which the basis must first be created, such as a tech-nical infrastructure, legislative changes for legitimation, confidentiality certificates, the expansion of standardisation, especially with regard to the structure of the supplementary protocol data, as well as a corresponding penetration rate of C2X-capable vehicles.

The utilisation concept is divided into three areas, the informative, the methodological and the technical utilisation concept.

The informative utilisation concept describes which information can currently be provided in real time for processing by KITT or should be provided in the future and how its visualisation of the me-thodically processed and technically validated information from KITT would have to be provided to the stakeholders.

The methodical utilisation concept describes how the assessment of the safety situation is to be carried out in real time on the basis of the available data from conventional and innovative tunnel sensor systems as well as from C2X communication. It also shows how existing risk assessment tools can be used and extended with additional safety-relevant information and functionalities.

The technical usage concept describes how and where the collection and processing of the C2X data as well as the implementation of the KITT modules should take place, taking into account IT security requirements, in an existing and largely standardised tunnel system architecture.

The procedure for creating the informative utilisation concept on the basis of the work status is described below. The requirements profiles drawn up for tunnel safety and C-ITS were taken into account.

3.1. Definition of Use Cases

Firstly, use cases have to be formulated for all three utilization concepts in order to illustrate the overall objectives and functionalities of KITT. The main use cases in KITT are as follows:

- Use Case 1: Initiation of (preventive) measures
- Use Case 2: Optimization of self-rescue
- Use Case 3: Optimization of external rescue

Use Case 1 serves the objective that risk situations and events in the tunnel are detected and as-sessed at an early stage during regular operation, so that preventive measures can be taken to min-imize the risk or the extent of the damage. Applying AI methods should enable both innovative data from C2X communication and conventional data from tunnel control technology to be fused for anomaly detection and, based on this, to examine the probability of occurrence of individual risks - which in this context represent safety-critical events. The probability of occurrence, in turn, provides the input for a subsequent real-time risk analysis to enable a holistic safety assessment of the road tunnel. The results of the real-time risk analysis are made available to the operator in visu-al form. As soon as a critical safety level exceeds, measures from a corresponding module are pro-posed to the operator in order to be able to take preventive countermeasures. In contrast, direct C-ITS-based and conventional messages have to be made available to the operator without pre-processing by means of an AI.

In contrast, Use Case 2 and Use Case 3 concentrate on the rapid forwarding of event-relevant in-formation in emergency operations in order to support tunnel users in self-rescue and to provide emergency services with additional and more precise operational information at an early stage (e.g., involvement of hazardous mate-

rials). The time of consideration of these two use cases be-gins as soon as a safety-critical event has been indicated by the risk analysis or an event-based message is received from C2X or the tunnel control system that requires the initiation of self-rescue and emergency rescue measures. Use cases 2 and 3 refer solely to the use of I2C in the con-text of the project.

The risk situations and the events are significant requirements for the analysis of the data and the information which has to be provided. Thus, the first step is to determine which risk situations or events have to be analyzed with the KITT approach. In a second step, a domain-specific knowledge about the respective risk situations or events has to be built up by assigning potential data from C2X communication and conventional tunnel data for the detection and assessment of individual risk situations or events. For this purpose, an incident data catalog was assembled as part of the pro-ject. In the further course of the project, this catalog will also provide a basis for the AI module be-ing developed in order to validate the AI on the basis of domain knowledge, which in particular rep-resents expert know-how.

3.2. Identifying risk situations and incidents

In order to collect information concerning tunnel safety, a catalog of risk situations and events in tunnels was assembled and these were assigned to defined use cases. The risk situations and events were compiled according to existing alarm and hazard prevention plans as well as regarding results of the user needs analysis. Figure 3 provides an overview of the individual risk situations and events to be detected and assessed within the KITT approach (Use Case 1) and the information that has to be made available (Use Cases 2 and 3):

Figure 3: Overview of the events assigned to the use cases

Regarding the KITT approach, the following distinction must be taken into account: for both C2X and conventional tunnel data, a separation is required between event-based and non-event-based data. Non-event based data dynamic and are provided to the system in short time intervals (e.g. at least one CAM per second). As a rule, events occurring in the tunnel cannot be derived from this data with one hundred percent probability. Rather, risk situations can be indicated from the data, which usually have to be further plausibilised. Accordingly, the use of AI is planned in the project in order to generate information rapidly for optimizing tunnel safety, especially from the large num-ber of data that occur every second. Event-based data (e.g. DENMs or tunnel notifications), on the other hand, indicate unambiguously an event occurred. Depending on the reliability of the system containing the data, this information provides the basis for further plausibility checks or is used di-rectly to trigger countermeasures or rather to provide them to the operator.

3.3. Qualitative analysis of C2X data to build domain-specific knowledge

In order to assess the potential of the new C-ITS technology data with regard to tunnel safety, these data have been analyzed accordingly. As mentioned in the introduction, the DENM and CAM protocol formats offer the greatest potential for road tunnels (see section 1). In this context, a dis-tinction must be made between mandatory and optional information within the containers. Man-datory information are basic sets which must be made available in accordance with the ETSI stand-ard so that so-called Day 1 applications, already implemented in the area of C-ITS, can use them. Optional information is aimed in particular at future-oriented Day 2 and Day 3+ applications, and is not currently sent by all vehicles, but is already defined by the standard, so that future applications can be built on it. [8, 9]

In the following, the protocol data and their benefits are presented exemplarily with regarding the KITT approach.

3.3.1. CAMs – Cooperative Awareness Messages

The classification of the data within the protocols is done in corresponding containers. Figure 4 shows the structure of the CAM protocols, consisting of the mandatory containers (red) ITS PDU Header, Basic Container and High Frequency Container and the optional containers (blue) Low Fre-quency Container and Special Vehicle Container. The ITS PDU header contains general information (e.g. protocol version and message type) and is also in use for other protocol formats. The Basic Container contains geo-referenced information about the sending unit (e.g. vehicle, RSU), while the High Frequency Container (e.g. speed, acceleration) and the Low Frequency Container (e.g. path history) provide dynamic vehicle information. The Special vehicle container is able to send corresponding information in the case of vehicles with a special role (e.g. emergency vehicles, dan-gerous goods).

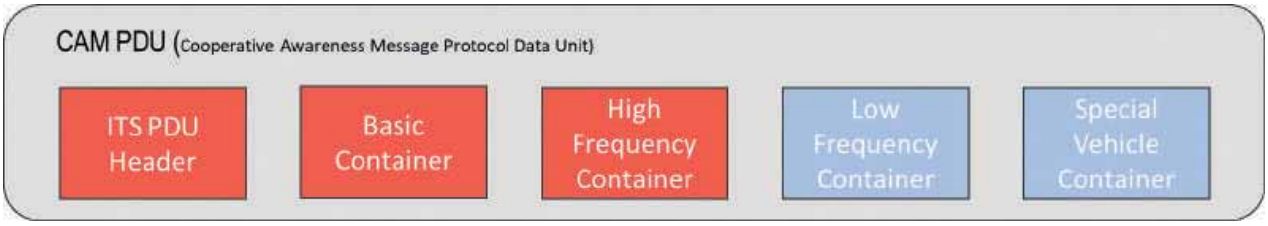


Figure 4: Container structure of a CAM according to [6]

All the data from the containers are assigned to the individual risk situations and events (based on Figure 3). Based on this, a domain-specific knowledge for the use of C2X data in the area of optimiz-ing tunnel safety or supporting the operators has already been built up in the preliminary stages of the AI development. This is done within the project based on an event data catalog.

Table 2 indicates the situational assignment of risk situations or events to individual CAM data fields. In addition, the status currently defined by the ETSI standard [6] regarding mandatory (M) and optional (O) data is listed. The clauses according to the ETSI data dictionary [10] are also listed for better comprehensibility.

Table 2: Sample of the event data catalog showing the assignment of data from the CAM protocol according to ETSI EN 302 637-2 [6] to individual events

Risk situation/ Event	Clause	Container	Data Field	Status
Vehicle breakdown	A.124	Basic	ReferencePosition	M
	A.40	High frequency	LanePosition	O
	A 74	High frequency	speedValue	M
	A 72	High frequency	speedConfidence	M
	A.45	High frequency	longitudinalAccelerationValue	M
	A.1	High frequency	longitudinalAccelerationConfidence	M
	A.80	High frequency	steeringWheelAngleValue	O
	A.79	High frequency	steeringWheelAngleConfidence	O
Traffic Jam due to congestion	A 74	High frequency	speedValue	M
	A 72	High frequency	speedConfidence	M
	A.45	High frequency	longitudinalAccelerationValue	M
	A.1	High frequency	longitudinalAccelerationConfidence	M
	A.124	Basic	ReferencePosition	M
Conspicious braking behaviour	A.45	High frequency	longitudinalAccelerationValue	M
	A.1	High frequency	longitudinalAccelerationConfidence	M
		High frequency	AccelerationControl	O

Compared to the desired data from the user needs analysis (see Section 2.2), the CAMs show good overall coverage in terms of already existing data from ETSI standardization [6]. In this context, mandatory data such as speedValue can support the targeted KITT functionalities well. Optional data points such as acceleration control could provide additional indications of anomalies (here: conspicuous braking behavior), which could be identified by means of AI and therefore for future developments should be given a different status.

CAM protocols can also provide information on the type of dangerous goods (data field Danger-ousGoods-Basic) for dangerous goods transports via the special vehicle container in addition to the highly dynamic data from the High Frequency Container. Although this information is mandatory, the data field Dangerous-GoodsExtended can optionally be used to send additional information re-garding restrictions for tunnels or the emergencyActionCode (which indicates the procedure to be followed by emergency services in the event of a critical incident). Concerning tunnel safety, such information offers a great potential to achieve a fast ability to act in the course of critical situations with dangerous goods transports (e.g. in case of a fire). Other desired information from the user needs analysis, such as the quantity of dangerous goods or the fire load, are currently not covered by the ETSI standard. The project aims to investigate the added value of this information for the KITT approach and then provide recommendations for further standardization.

3.3.2. DENMs – Decentralized Environmental Notification Messages

Figure 5 shows the structure of the DENM protocols with the mandatory (red) ITS PDU headers (general, see also CAM) and management containers as well as the optional (blue) situation con-tainer, location container and Á la carte container. The Management Container contains time and position related information about an event. The Situation Container provides a detailed descrip-tion of the reported event by means of so-ca-

lled Cause Codes. The Location Container shows the position and the area where the original sending vehicle is located. In the Á la carte container, addi-tional information relevant to the respective event could be sent.

Figure 5: Container structure of a CAM according to [7]

Although the data from the CAMs for the detection of tunnel safety-relevant events is highly dy-namic and usually requires further processing by the AI, transmitted DENMs already index events and contain a cause code or a sub-cause code in the situation container for further specification. In the case of a vehicle breakdown, for example, the following sub-cause codes can be sent according to ETSI standardization [7]:

- 0: unavailable
- 1: lackOfFuel
- 2: lackOfBatteryPower
- 3: engineProblem
- 4: transmissionProblem
- 5: brakingSystemProblem
- 6: steeringProblem
- 7: tyrePuncture

Sending sub-cause codes is currently still optional, but in the future - in addition to information that is already mandatory, such as the event position from the management container - it can greatly support event management by operators and emergency organizations. Precise information about the cause of the event is also a key requirement emerging from the user needs analysis and the requirements profiles (see Section 3). Additional information, such as event speed, can also be sent via the situation container, enabling event management to be supported in the further course of events for the purpose of plausibility.

All in all, the analysis of the currently defined DENMs shows that almost all events (except fire) can be indicated according to the requirements of section 3. In the course of tunnel safety, fires can lead to very high degrees of damage. Engine problems and defective or overheated brakes indicate an increased risk of fire, for instance. A direct coupling with ambient temperatures of the vehicle can be optionally sent in a DENM (e.g. in case of a breakdown) via the Á la Carte Container. This example shows that vehicles could be added in the future as additional temperature sensors for fire detection as well as in the course of assessment. According to the current definition, however, it should be noted that only a fire hazard is indicated and no clear fire detection is possible. This value should be further validated in connection with the cause code. Similar to the further pro-cessing of CAMs, corresponding correlations should be checked software-logically in order to obtain certainty in action and unambiguous information. This potential is being investigated in detail within the framework of KITT, particularly because of its relevance regarding tunnel safety.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

At the time of the preparation of this paper, the requirements for the use and integration of C-ITS and the application of AI processes were determined on the basis of the state of the art, regulatory requirements and user demands. These are currently being brought together in utilisation con-cepts. The first results with regard to the informational utilisation concept were outlining in the context of the contribution. These have an influence on the structure of corresponding evaluation methods (especially real-time risk analysis, see methodical utilisation concept) and must be inte-grated into an overall system architecture, taking into account IT security requirements (see tech-nical utilisation concept). The information utilisation concept presented here includes the compari-son or combination of processes and information in the course of tunnel monitoring and control in the context of tunnel safety with the information potentially available through C2X communication.

A particular focus is currently on providing a training data basis for the AI. Due to the low vehicle penetration rate with C2X-capable vehicles, this is done using synthetically generated training data and corresponding traffic simulation software. Finally, the developed concept is to be demonstrat-ed on a real tunnel structure.

Even at the current stage of the project, it is clear that this project is to be designed with great per-spective, but the relevance requires this early step due to the rapidly advancing digitisation in the area of connected and automated driving. The requirements from the point of view of tunnel safe-ty must be formulated at an early stage, as they may well deviate from those of the open road. This addresses infrastructure operators for the development of the necessary technical infrastructure and integration into existing monitoring and event management concepts as well as the develop-ment of competences of system users, as well as vehicle manufacturers who include safety aspects and the requirements derived from them in their design when providing information to the infra-structure. This opens up potentials that can contribute to improving road safety. For tunnel moni-toring, concepts for targeted data fusion and plausibility checks can be expected to provide oppor-tunities for better incident prevention. For the interpretation of the large amounts of data, meth-ods such as AI are needed that make them manageable. At the same time, it can be assumed that improvements in the case of incident management and explicitly for self-rescue can be achieved through the possibility of individualised responses (I2C).

5. ACKNOWLEDGEMENT

The project on which this report is based was funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the framework of the call “Artificial Intelligence in Civil Security Re-search” and by the Austrian Federal Ministry of Agriculture, Regions and Tourism (BMLRT) within the framework of the funding programme for security research KIRAS and was handled by the VDI Technology Centre and the Austrian Research Promotion Agency. The project started on 01 April 2021 and is expected to end on 31 March 2023.

6. REFERENCES

[1] Lehan, A.: Influence of digital transformation on the interaction between tunnel infrastructure and road user - opportunities and risks, In: Proceedings from the Ninth International Symposi-um on Tunnel Safety and Security, Munich, Germany March 11-13, 2020, S. 13-22

[2] VDA – Verband der Automobilindustrie e.V.: Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren (2015). https://www.vda.de/dam/vda/publications/2015/automatisierung.pdf, S. 19

[3] Mayer, G., Badocha, C., Norkauer, A.: Potentials of Integrating C2X Communication into Tunnel Operations Control Technology, Tunnel Safety and Ventilation Conference, Graz, 2018.

[4] Mayer, G.; Lehan, A.: Kooperative Systeme in Straßentunneln - Potentiale aus der Nutzung der C2X-Kommunikation für die Tunnelüberwachung. In: Tagungsband zur 1. Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur, Esslingen, 2021, S.191-204

[5] Mayer, G.; Lehan, A.: Mobilität 4.0 – Chancen und Risiken für einen sicheren Tunnelbetrieb, In: Forschung + Praxis - U-Verkehr und unterirdisches Bauen, Band Nr. 56, Internationales Forum für Tunnel und Infrastruktur, STUVA Tagung 2021, ISBN ISBN 978-3-00-070615-8, S.406-412

[6] ETSI TS 102 637-2: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic set of applications; Part 2: Specification of cooperative awareness Basic Service, v1.4.1, 2019

[7] ETSI TS 102 637-3: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular communications; Basic set of applications; Part 3: Specification of decentralized environmental notification basic service, v1.3.1, 2019

[8] ETSI TR 102 638: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions, v1.1.1, 2009

[9] CAR 2 CAR Communication Consortium: C2C-CC Basic System Profile, v1.1.0, 2015

[10] ETSI TS 102 894-2: Intelligent Transport Systems (ITS); Users and applications requirements; Part 2: Applications and facilities layer common data dictionary.

NUEVA TECNOLOGÍA DE SEÑALIZACIÓN DE ALTA VISIBILIDAD EN TÚNELES

Luis Ayres Janeiro
Director Técnico API MOVILIDAD, S.A.

La atmósfera del interior del túnel impone una serie de condicionantes, tanto a la visibilidad, como a los materiales, fundamentales para la funcionalidad y durabilidad de las señales. Las partículas en suspensión, sean de combustión, abrasión, frenos u otro agente, degradan la visibilidad, y afectan al contraste y al color con que se percibe la señal. Pero no solo eso, sino que la experiencia de productos anteriores demostraba que esas partículas penetraban en el cajón de la señal y afectaban notoriamente a la luminosidad de los LED y a su durabilidad, produciéndose fallos cuando no se había llegado ni al 20% de su vida útil.

API Movilidad ha partido de un exhaustivo estudio de la degradación de materiales en el túnel para poder adquirir un nuevo conocimiento de sellado y aislamiento resistente a condiciones de trabajo muy difíciles. Así se ha desarrollado una nueva estructura de ocultación y estanqueidad del bastidor anticorrosión para señales dentro del túnel.

Esta estructura está diseñada para absorber y reducir la temperatura interna de las luminarias para conseguir que los LED funcionen a pleno rendimiento y se degraden a menor ritmo, asegurando su longevidad y disminuyendo los costes de mantenimiento.

Por otra parte, también se ha optimizado el sistema de retro-iluminación, utilizando films retrorrefelctantes, espejos para reciclado de luz y arrays de LED diseñados específicamente y cuya distribución interna de leds permite una óptima iluminación del cartel y alcanzar los mejores niveles de retrorreflexión durante su vida útil.

Otro aspecto novedoso es el control de la luminosidad del cartel mediante medidores de opacidad, que premiten un reajuste automático de ésta según las condiciones lumínicas y que evite el acoplamiento con la luz emitida por otras señales del túnel.

El proyecto ha sido certificado por la Agencia de Certificación en Innovación Española, ACIE, entidad acreditada por ENAC, como proyecto de Investigación y Desarrollo.

NEW HIGH-VISIBILITY TUNNEL SIGNALLING TECHNOLOGY

The atmosphere inside the tunnel imposes a number of constraints on both visibility and materials that are fundamental to the functionality and durability of the signs. Particles in suspension, whether from combustion, abrasion, brakes or other agents, degrade visibility and affect the contrast and colour with which the sign is perceived. Not only that, but experience from previous products showed that these particles penetrated the signal box and significantly affected the brightness of the LEDs and their durability, leading to failures at less than 20% of their lifetime.

API Mobility started with an exhaustive study of the degradation of materials in the tunnel in order to acquire new knowledge of sealing and insulation resistant to very difficult working conditions. A new structure has been developed to conceal and seal the anti-corrosion frame for signals inside the tunnel.

This structure is designed to absorb and reduce the internal temperature of the luminaires so that the LEDs operate at full performance and degrade at a slower rate, ensuring longevity and reducing maintenance costs.

The backlighting system has also been optimised, using retroreflective films, mirrors for light recycling and specifically designed LED arrays whose internal distribution of LEDs allows for optimal illumination of the sign and the best levels of retroreflection during its lifetime.

Another innovative aspect is the control of the sign's luminosity by means of opacity meters, which allow for an automatic readjustment of the sign's luminosity according to the lighting conditions and avoid coupling with the light emitted by other signs in the tunnel.

The project has been certified by the Spanish Innovation Certification Agency, ACIE, an entity accredited by ENAC, as a Research and Development project.

NOUVELLE TECHNOLOGIE DE SIGNALISATION DES TUNNELS À HAUTE VISIBILITÉ

L'atmosphère à l'intérieur du tunnel impose un certain nombre de contraintes, tant au niveau de la visibilité que des matériaux, qui sont fondamentales pour la fonctionnalité et la durabilité des panneaux. Les particules en suspension, qu'elles proviennent de la combustion, de l'abrasion, des freins ou d'autres agents, dégradent la visibilité et affectent le contraste et la couleur avec lesquels le panneau est perçu. De plus, l'expérience des produits précédents a montré que ces particules pénétraient dans le boîtier de signalisation et affectaient considérablement la luminosité des LED et leur durabilité, entraînant des défaillances à moins de 20 % de leur durée de vie.

API Mobility est parti d'une étude exhaustive de la dégradation des matériaux dans le tunnel afin d'acquérir de nouvelles connaissances en matière d'étanchéité et d'isolation résistant à des conditions de travail très difficiles. Une nouvelle structure a été développée pour dissimuler et sceller le cadre anticorrosion des signaux à l'intérieur du tunnel.

Cette structure est conçue pour absorber et réduire la température interne des luminaires afin que les LED fonctionnent à plein régime et se dégradent moins vite, ce qui garantit leur longévité et réduit les coûts de maintenance.

Le système de rétroéclairage a également été optimisé, grâce à l'utilisation de films rétroréfléchissants, de miroirs pour le recyclage de la lumière et de matrices de LED spécialement conçues, dont la distribution interne des LED permet d'obtenir un éclairage optimal du panneau et les meilleurs niveaux de rétroréflexion pendant sa durée de vie.

Un autre aspect innovant est le contrôle de la luminosité du panneau au moyen de compteurs d'opacité, qui permettent un réajustement automatique de la luminosité du panneau en fonction des conditions d'éclairage et évitent le couplage avec la lumière émise par d'autres panneaux dans le tunnel.

Le projet a été certifié par l'Agence espagnole de certification de l'innovation, ACIE, une entité accréditée par ENAC, comme un projet de recherche et développement.

ANTECEDENTES DEL PROYECTO

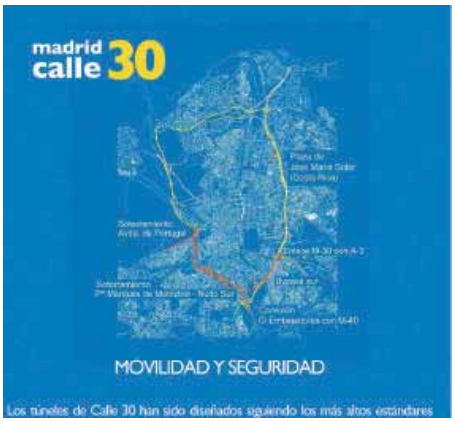
A comienzos del año 2004 comienza en Madrid (España) una obra de grandes dimensiones que supone el soterramiento de la vía de circunvalación M-30 dando lugar a la actual Calle 30. Esta obra que finaliza a mediados de 2007 supone la creación de una infraestructura vial subterránea de 43 kilómetros de longitud considerando sus distintos tramos y con ello se genera una problemática totalmente distinta a la que se había producido hasta este momento dentro de los túneles a nivel mundial.

Las principales particularidades que convierten a esta vía en única son:

1. Alta intensidad de circulación. La intensidad de circulación de Calle 30, sobre todo en las horas punta, es un elemento totalmente diferenciador de cualquier túnel existente en el mundo.

2- Longitud del túnel. Aunque no es uno de los túneles más largos del mundo, si es uno de los que mayor complejidad tiene, ya que no es un túnel recto como suele ser habitual, y por tanto los sistemas de tratamiento y gestión del mismo deben ser más eficaces.

3- Indicaciones de direcciones, entradas y salidas. Es uno de los pocos túneles a nivel mundial que posee la complejidad de accesos (entradas y salidas) a calles de ciudad. Normalmente los túneles solo tienen una entrada y una salida por lo que no necesitan de indicaciones de direcciones.



La resolución de esta problemática que hasta el momento era única en el mundo, se ha convertido en modelo a nivel mundial. Muchas ciudades del mundo están analizando el caso de Calle 30 de Madrid como ejemplo para el diseño de carreteras subterráneas pues se ha convertido en una necesidad mundial disponer de un modelo de túnel que no solo permita la gestión circulatoria, sino que esta se realice de la forma más segura posible.

El proyecto TUNNADVERT liderado por API movilidad, se centra en analizar los problemas de circulación interna de las vías subterráneas desarrollando y probando nuevos mecanismos de señalización de orientación de vías y calles dentro de los túneles, resolviendo los inconvenientes de los sistemas de señalización de orientación normalizados y utilizados hasta el momento.

Estas limitaciones que se buscan resolver en el proyecto pueden agruparse en los siguientes puntos:

1. Normativa de túneles. Hasta el caso de Calle 30 las señales introducidas dentro de los túneles debían ser internamente iluminadas, pero esta normativa se ha redactado pensando en señalización de emergencia y no en señalización de orientación. No existe normativa de señalización de orientación dentro de túneles lo que nos obliga a ser pioneros en el desarrollo y en la necesidad de contraste normativo con las autoridades responsables.
2. Normativa de señales de orientación. La normativa de señales de orientación (para exterior) definen el tamaño de las señales, de las letras, los tipos de poste de soporte, y los materiales a utilizar. En nuestro caso no es posible aplicar ninguna de ellas debido a las condiciones de los túneles:
    a) El tamaño reducido de los túneles no permite los tamaños de cartel ni por tanto la misma cantidad de contenido que la norma exige.
    b) No existe espacio para situar las estructuras de soporte y poste a los carteles.
    c) Los métodos de reflexión requeridos en la norma no sirven en túneles

d) La corrosión y la contaminación por partículas contenidas en túneles de tráfico alto reducen la visibilidad y la utilidad del cartel.

NOVEDADES GLOBALES DEL PROYECTO

La novedad principal del proyecto radica por un lado en el producto resultante y en la tecnología desarrollada para conseguirlo.

La tecnología desarrollada es también novedosa y se ha desarrollado con el fin de alcanzar un producto viable en este tipo de entorno. Para ello introduce novedades avanzadas:

1. Hasta el momento no ha existido el conocimiento y la capacidad de llevar a cabo un proyecto que solucione la orientación en calles y rutas dentro de túnel, siendo la primera labor de este proyecto la realización de mediciones y estudios que han permitido obtener la información para el desarrollo del nuevo producto. Este conocimiento servirá de base para el desarrollo de las normativas aplicables en estos túneles en el futuro y que actualmente no existen.

2. Nuevo material compuesto para potenciar la iluminación/reflexión en túnel desarrollado para optimizar la luminosidad (desde 60 lm a 120 lm) de los leds de 1 W de potencia, mediante el aprovechamiento del efecto multiplicador de algunos materiales, que combina la luz emitida por los faros de los propios vehículos mediante la propiedad reflexiva y la luminosidad interna de la propia señal. Aunque la optimización conseguida de la luz ha resultado un éxito, el factor que realmente se quiere impulsar es la visibilidad y percepción de la señal por el conductor, lo que no solo involucra a la iluminación sino también al contraste y la legibilidad de la señal en su conjunto.

3. Nuevo sistema de iluminación interna de dirección para túnel, que se distingue de todos los sistemas de señalización actuales en la electrónica interna totalmente novedosa que ofrece 14.000 lm/m2, y con unas dimensiones y peso totalmente diseñado para cubrir la necesidad de orientación en túnel, y que ofrece la visibilidad optima y mantenida en el tiempo para resolver la necesidad de percepción de los conductores en este entorno. Especial atención tiene el formato de la propia señal modificado para poder ofrecer la información útil en un espacio más reducido que las existentes en carretera convencional o autovía.

4. Nueva estructura de ocultación y estanqueidad del bastidor anticorrosión para señales de orientación en túnel. Esta estructura es totalmente novedosa en el sector en cuanto a su diseño, donde no se requiere una cámara interna de protección del bastidor (habitualmente externo).

5. Nuevo sistema de soporte de señal en túnel. Las señales luminosas en túneles suelen estar situadas en los laterales debido a la complejidad estructural de suspender una señal en la zona central o techo. Los sistemas de anclaje que se utilizan para las señales de orientación en el exterior bien en banderola o pórtico tampoco son útiles como base porque el pórtico no puede localizarse en ninguna ubicación dentro del túnel, y un anclaje horizontal en el túnel supone que la señal quede demasiado baja y por tanto no tenga el ángulo de visibilidad óptima para asegurar la percepción del conductor. Esta complejidad se ve incrementada cuando las dimensiones de la señal y su peso son distintos al de todos los elementos que se suelen utilizar en un túnel, por lo que se ha tenido que diseñar una estructura de soporte compuesta de varios materiales y específica para cumplir distintos objetivos:

   a) Anclaje a los techos de hormigón del túnel resolviendo las limitaciones de corrosión y viento horizontal existentes en el túnel.

   b) Soporte del sistema de iluminación en función de su forma y peso

   c) Reducción y difusión de la temperatura del sistema de iluminación para la optimización de la eficiencia de los leds.

MEJORAS CONSEGUIDAS

Resumiendo, el producto en su conjunto como señal de orientación internamente iluminada para túneles, busca varias mejoras sustanciales respecto a los sistemas existentes:

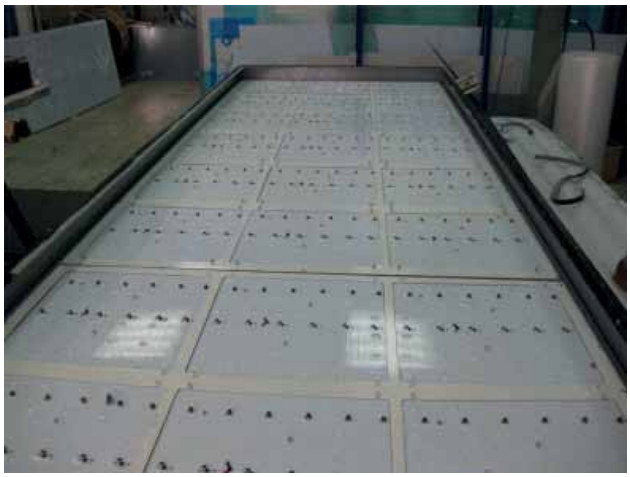
1. Consigue un rendimiento global de la señal superior a 120 lm/w
2. Consigue una potencia lumínica localizada de 14.000 lm/m2
3. Minimiza el esfuerzo y tiempo de montaje y mantenimiento reduciendo el impacto en el tráfico
4. Optimiza la temperatura interior de la señal a 45º para preservar el funcionamiento de los leds
5. Consigue una mejora sustancial de la resistencia al polvo, contaminación y agentes corrosivos asegurando su funcionamiento durante un mínimo de 12 años en condiciones óptimas.

La realización de este proyecto no ha resultado sencilla. Aunque existen muchos expertos en la gestión y la problemática de los túneles, solo existe un túnel en el mundo (Calle 30 de Madrid) que suma la complejidad de direccionamiento interno, altos niveles de tráfico y altos niveles de contaminación, por lo que hasta el momento no ha existido conocimiento concreto ni mediciones en entornos similares. Por ello ha sido necesario en el proyecto realizar mediciones y análisis detallados de este nuevo tipo de ambiente e infraestructura para conocer bien su funcionamiento y desarrollar un producto que logre mejorar la visibilidad y la percepción de los conductores en estos túneles. Varias de las mejoras técnicas obtenidas han sido el resultado de las limitaciones que durante los análisis y pruebas se han ido encontrando y que en ninguno casos han podido resolverse con soluciones ya existentes. Por tanto, este desarrollo supone no solo un avance técnico en el desarrollo de una nueva señal, sino en el afianzamiento de un nuevo modelo de gestión del tráfico dentro de túneles de esta complejidad, que como antes hemos indicado, comienzan a ser un modelo a seguir.

TECNOLOGÍAS DESARROLLADAS

1. Sistema de iluminación interna

Basándonos en sistemas de iluminación interna existentes en túnel (para señalización de emergencias) y sistemas nuevos de iluminación en exterior, se ha diseñado una solución para túnel con alto nivel de contaminación. Para ello se ha trabajado en corregir los problemas de corrosión y opacidad del ambiente en un túnel y desarrollar una placa electrónica que multiplica el efecto del nuevo material compuesto de difusión de la luz para un mayor aprovechamiento de la potencia, así como para la reducción de riesgos de contaminación interna y los problemas de opacidad parcial de la señal, buscando siempre una homogeneidad en la imagen emitida. Con este diseño conjuntamente con el nuevo material compuesto se ha conseguido una potencia lumínica de 14.000 lm/m2, que en base a las mediciones de percepción realizadas se considera suficiente y máxima para este tipo de túnel, ya que una potencia superior puede generar efecto flicker.



Con el fin de reducir el tiempo de fabricación y de mantenimiento, este sistema se ha diseñado en base a placas electrónicas de gran tamaño independientes pero unidas, de forma que cada una dispone de su propia fuente de alimentación con un diseño estanco para evitar contaminación, minimizando las posibles averías y al mismo tiempo permite una sustitución rápida en caso de fallo. Tras varios prototipos realizados, se ha optado por una estructura de 9 paneles por señal, que reduce tanto la necesidad de potencia luminosa como el riesgo de pérdida de homogeneidad ante el fallo de alguno de ellos.

Aunque la estructura externa del sistema de iluminación se ha desarrollado para conseguir una estanqueidad máxima en su interior, y por tanto de las placas electrónicas, se ha mejorado esta protección mediante la tropicalización de forma que se impide la penetración de cuerpos sólidos extraños, de agua y el acceso de las personas a partes peligrosas. Para ello se ha aplicado una capa de aislante líquido con base de silicona en las uniones, cables, leds y componentes de la placa que proporciona un grado de protección del circuito de totalmente estanco al polvo y al agua.

Se ha sometido cada prototipo a ensayos de 500 horas en cámara de niebla salina verificando la resistencia a la corrosión frente am-

bientes especialmente agresivos, y a 1000 horas de ensayo en cámara de envejecimiento artificial acelerado (OUV) con ciclos de humedad y radiación ultravioleta que reproducen la acción de los agentes atmosféricos.

Igualmente se han analizado los colores utilizados en las señales con el fin de maximizar la eficiencia de la luz emitida. El sistema de iluminación por tanto utiliza colores blancos o claros para obtener niveles próximos a 3.000 Cd/m2.

2. Material compuesto

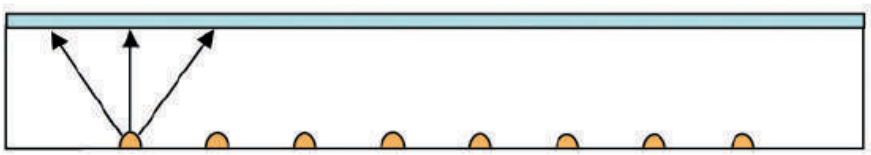
Para el uso de tecnología LED en iluminación de señales (incluyendo las señales de alerta o emergencia en túnel) es habitual utilizar láminas de metacrilato al que se le dan diferentes formas para modificar las propiedades de la refracción y de distinto espesor que realizan la labor de difusión y protección de las luminarias. El metacrilato es un material que soporta mal las deformaciones y tiende a estallar si se ve sometido a puntos de presión, golpes, etc, por lo que se ha optado por construir un material compuesto que mejore las propiedades de resistencia, durabilidad, reflexión e iluminación, considerando la combinación de todas estas propiedades como fundamental para obtener una correcta percepción de las señales de orientación en túnel.

Tradicionalmente la señalización en túneles se realizaba con señales internamente iluminadas con fluorescentes o bombillas de bajo consumo. El principal inconveniente de esta tecnología es la baja homogeneidad de la luz en la superficie de señal, lo que dificulta la correcta lectura de los textos y la interpretación de los pictogramas. Por otro lado, estas lámparas tienen una vida relativamente corta, en muchos casos inferior a las 8.000 horas, lo que en un túnel donde la señalización de emergencia funciona las 24 horas del día, implica una duración inferior a un año.

Hace unos años se ha empezado a implantar la tecnología led, pero al tratarse de carteles de dimensiones relativamente pequeños, la disposición de los leds es perimetral. Esto permite fabricar carteles con fondo muy reducido, de 25 mm o inferior. El problema de esta tecnología es que es poco homogénea (mayor luminosidad en el contorno que en el centro) y bajo nivel de luminosidad.

Estos problemas se han resuelto con la creación de un nuevo material compuesto en el que la unión de sus componentes se realiza con adhesivo acrílico en base sellante permanente, activado por presión (10 kg/cm^2). El conjunto del material queda fijado a la estructura mediante uniones de sellador de poliuretano para evitar la contaminación de partículas y su oscurecimiento. Los materiales que finalmente forman el compuesto son, y en este orden:

a) Cámara de aire de 60 mm: Entre el sistema de iluminación y el frontal se introduce una cámara de aire libre de partículas de 60 mm espesor, que favorece por un lado la difusión del calor generado por las luminarias, el efecto de dispersión de la luz sobre el compuesto y mejora la resistencia de todos los materiales a la luz interna emitida. Las dimensiones de esta cámara son las que han permitido optimizar este espacio interior y la visibilidad de la señal en su conjunto, favoreciendo un mayor aprovechamiento de la potencia emitida.



b) Policarbonato de entre 3 y 7 mm. Que protege al resto de materiales de la luz y el calor generado dentro del sistema de iluminación interno, ampliando la vida del resto de materiales del compuesto. El policarbonato facilita la dispersión de la luz de los leds y la homogeniza en toda la cara frontal de la

señal por lo que reduce las limitaciones del metacrilato pero introduce nuevos problemas (principalmente de adherencia de las láminas reflexivas) que han tenido que resolverse en el proyecto. Para evitar que los LED produzcan zonas de mayor luminosidad en la señal (efecto "hot spot") y hacer que el contraste sea homogéneo mejorando la visibilidad, se añade esta lámina de policarbonato externo de entre 3 y 7 mm, especialmente diseñado para difuminar la luz en la parte frontal de la estructura. Este panel cierra la cámara aislante y crea un conjunto hermético de láminas frontales y laterales. Este panel realiza además la labor de filtro de luz, evitando zonas con diferente contraste, ya que los hollines y partículas contaminantes se adhieren a las paredes de la estructura a lo largo del tiempo, cambiando las condiciones de reflexión. Con este novedoso método se consigue mejorar la calidad de la zona iluminada durante más tiempo, haciendo que el sistema sea más robusto.

c) Lámina retrorreflectante que potencia la visibilidad de la señal, en el caso de que falle la iluminación interna. La diferencia de percepción del contenido de la señal entre una solo internamente iluminada y otra que incluye este compuesto que combina reflexión e iluminación es notable y supone una mejora avanzada.

d) Texto o imagen. El texto o imagen de la señal se realiza sobre la capa reflexiva mediante impresión con tinta curada por radiación UV, de alta resistencia a corrosión y abrasión. Sobre la anterior lámina se rotulan los carteles de forma digital utilizando tinta ultravioleta de forma que amplíe el efecto de la luz sobre las líneas. La cantidad de texto y su orden ha seguido un patrón estudiado en el proyecto, debido a que las dimensiones del cartel no permiten el cumplimiento de la normativa vigente para vías fuera de túnel. Se han realizado pruebas de visibilidad y percepción para asegurar su correcto entendimiento a la velocidad máxima de la vía.

e) Lámina de protección translucida de fenólico sólido: Una vez conseguida la propiedad lumínica y perceptiva apropiada, se ha incorporado al compuesto un componente aislante de fenólico sólido con el fin de eliminar todo tipo de relieves y puntos de entrada a la contaminación. Con ello se alcanza una resistencia aumentada de 12 años ante corrosión, tanto del sistema de iluminación, la imagen y el sistema reflector. Para evitar el desgaste de la rotulación por razones de calor o luz excesiva, se aplica esta capa transparente que incrementa la capacidad reflexiva del conjunto y ha sido la mejor solución a las pruebas de combinación de métodos reflexivos para multiplicar la iluminación interna con el menor consumo de potencia energética posible.

f) Adicionalmente, el frontal queda ajustado a la carcasa mediante aislante de base de poliuretano, que sella la estructura ante partículas contaminantes.

3. Sistema de soporte

Esta estructura es totalmente novedosa en el sector de la señalización vial en cuanto a su diseño, donde no se requiere una cámara interna de protección del bastidor (habitualmente externo).

La estructura de soporte del sistema de iluminación tiene dos objetivos. El primero de ellos es plantear un sistema de protección del bastidor que soporta todo el peso de la estructura y donde su degradación supone un riesgo para la estabilidad de toda la señal, y el segundo es facilitar la localización, la posición y la orientación óptima para favorecer su percepción dentro del túnel, considerando que ninguna de las normas existentes ofrece información de su utilización, forma o tamaño. Por otro lado, esta estructura está diseñada para conseguir una temperatura interna óptima para que los leds estén en pleno rendimiento al absorber y reducir el calor interno emitido por las luminarias.

De esta forma se obtienen varios beneficios:

a) La señal usa materiales más resistentes a la acidez ambiental, protegiendo así a la estructura de soporte de la corrosión.

b) La cara visible de la señal disminuye de tamaño ofreciendo menor resistencia al viento, reduciendo peso y haciendo más visible la propia señal.

c) La orientación del frontal hacia el conductor permite una mejor percepción de la señal y su lectura y comprensión.

Los distintos factores a considerar en el diseño del sistema de soporte son:

a) Localización: La localización de la señal finalmente elegida tras distintas pruebas de visibilidad ha sido en el techo del túnel eliminando los laterales debido a la perdida de percepción del usuario en esos lugares y el espacio reducido de esta zona.

b) Base: Para poder conseguir que el techo del túnel soporte el peso de la estructura de la señal minimizando los efectos de la corrosión (hemos de considerar que esta localización es la más peligrosa para el tráfico en caso de caída) se ha optado finalmente por dos bases de acero unida cada una con el techo mediante cuatro tornillos con taco de acero de anclaje expansivo. Debido al esfuerzo en el largo plazo de la sujeción, los tortillos se introducen en un ángulo de 20°, dependiendo del grado de curvatura del túnel en la zona de instalación.

c) Estructura de posición: A su vez, cada base queda unida a una columna vertical respecto al techo del túnel, de acero galvanizado de gran resistencia. Es habitual que el techo no esté correctamente alineado, por lo cual se ha diseñado una estructura de posición de señal que realiza la corrección correspondiente:

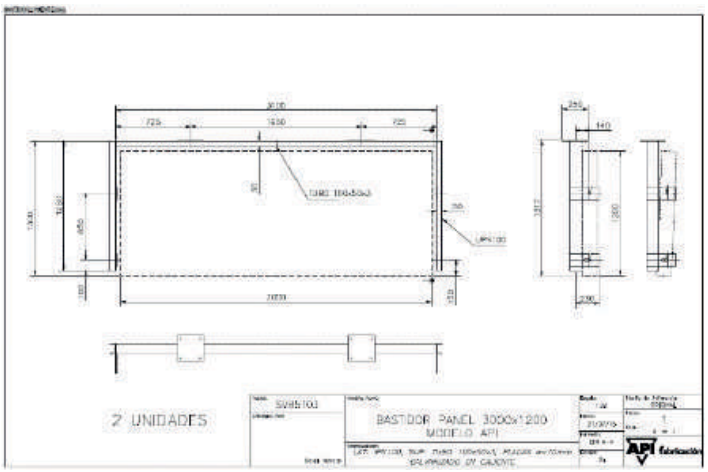
   - Posición vertical-horizontal: La estructura permite modificar la altura de la señal ajustándola al ángulo del carril que deberá informar. La posición de la señal no es del todo homogénea horizontalmente, debido a que se le aplica un ángulo, con el fin de facilita la visibilidad en varios carriles.

   - Altura: La altura de la señal debe ser regulable debido a que los desniveles del techo pueden producir que la estructura o carcasa de la señal toque con el techo, provocando presiones no previstas o incluso un incremento de la corrosión en esa zona.

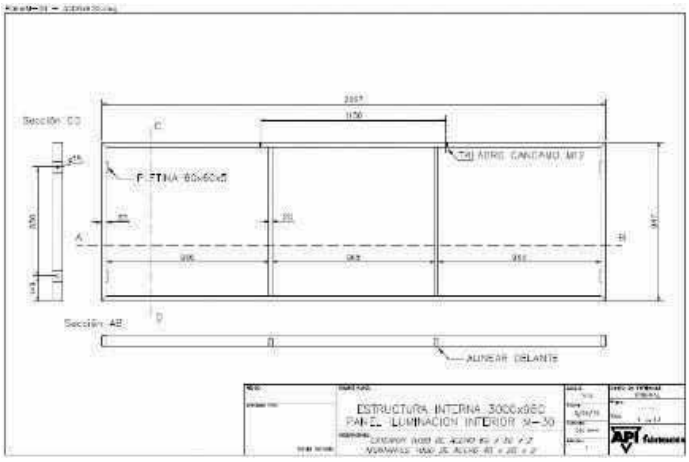
   - Posición de fondo: las señales de túnel deben permitir la lectura rápida (según la velocidad de la vía), lo que afecta al tamaño de la letra, el nivel de luminosidad y el ángulo de visión de la propia señal. Tras las pruebas se ha definido la aplicación de un ángulo de fondo inferior mínimo de -5 grados para una vía de 50-70 km/hora de circulación.

d) Bastidor: La señal posee una estructura de bastidor oculta bajo la carcasa que soporta el peso de toda la estructura y el peso de todos los elementos de unión. Aunque habitualmente los bastidores de las

señales son exteriores, se ha comprobado dentro de las cámaras de corrosión que no resisten a largo plazo una alta contaminación prolongada y su deterioro supone un riesgo excesivo para estar anclada al túnel. Por ello, el bastidor queda aislado del exterior dentro de la propia estructura.



e) Carcasa: La carcasa es una estructura realizada en chapa ligera de acero que se une con el bastidor instalado en su interior. Su labor es por un lado el de aislamiento estanco de todo el sistema de iluminación y del bastidor, asegurar la posición de todos los elementos y facilitar la difusión del calor interno generado por las luminarias, que se transfiere desde las placas de aluminio a la chapa de acero. Aunque inicialmente se tuvieron varios problemas de corrosión en las uniones, se ha aumentado el tratamiento aislante en estas zonas mediante galvanizado en frio.



f) Contenedor: El contenedor es un elemento adicional que se ha sumado a la estructura del sistema de soporte cuyo objetivo es la protección de las condiciones ambientales y de la corrosión al sistema de iluminación y también a la carcasa (que queda contenida u oculta por el contenedor). Este diseño ha permitido la reducción al máximo de las uniones y potenciales filtraciones a la señal. El material finalmente seleccionado para esta estructura ha sido el policarbonato debido a su resistencia a la corrosión y a su bajo peso.

4. Sistema de comunicación y control

Para ello se ha optado en combinar la señal con la tecnología desarrollada por IMESAPI dentro del proyecto de I+D SIXSIGMA, adaptando su uso a sistemas de iluminación en túnel. Este sistema permite establecer comunicación con sensores de control del comportamiento de cada una de las señales y establecer alertas en el momento de superación del umbral definido.

Sensores de Temperatura: Se han perfeccionado los sensores que ayudan a controlar los cambios de temperatura combinado varios dispositivos de medición: eléctricos, mecánicos y de radiación térmica.

Sensores fotoeléctricos o de Intensidad Lumínica: Los sensores de luz se usan para detectar el nivel de luz y producir una señal de salida representativa respecto a la cantidad de luz detectada.

Contadores eléctricos: Los metrocontadores o contadores eléctricos son dispositivos que sirven para medir el consumo eléctrico. Permiten controlar la cantidad de energía que llega a una señal y anticiparse ante una caída de tensión.

Sensores de Inclinación: están pensados para la conversión de una magnitud física en una eléctrica. En este caso, la inclinación es la magnitud física cuyo rango puede partir de unos pocos grados, para las medidas de inclinación con mucha precisión, hasta el giro completo de 360º.

Sensores de humedad: miden la humedad en el interior de la señal avisando de la posible entrada de líquidos.

Sensores de gases: permite detectar la presencia de gas en el aire y, a una determinada concentración, emite una señal óptica –acústica de aviso. Este tipo de sensores permiten controlar la contaminación interna dentro de la señal.

Sensores de Aceleración: Los acelerómetros o sensores de aceleración, están pensado para realizar una medida de vibración de la señal, y anticiparse ante problemas de sujeción de la señal. Para ello proporciona una señal eléctrica según la variación física, en este caso la variación física es la aceleración o la vibración.

DESARROLLO DEL PROYECTO: PRUEBAS EN ENTORNO REAL CALLE-30.

La primera fase del proyecto ha sido la selección de requisitos de la solución a plantear. Los equipos de API Movilidad y API Fabricación, han mantenido reuniones con el objetivo de marcar el alcance y los requisitos que debe tener el proyecto a realizar. Para ello, y considerando que no existían informes de visibilidad en detalle dentro del túnel en sus distintas localizaciones, ha sido necesario realizar de forma exhaustiva mediciones de opacidad, contaminación y corrosión en distintos túneles. Para poder medir la cantidad de partículas emitidas han sido muy útiles los equipamientos (tales como los sistemas de emergencia) ya disponibles en los túneles.

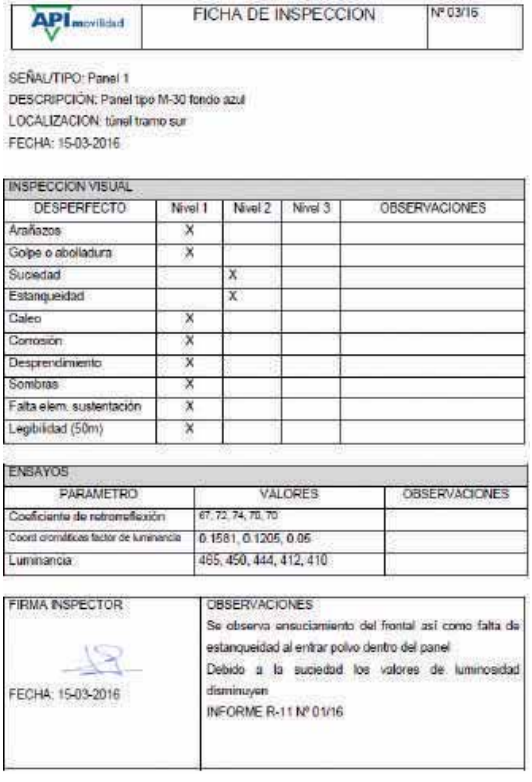
Se han analizado durante los primeros meses diferentes túneles en distintos tramos en los que hemos tenido permiso especial para su estudio.

En base a las características de corrosión, humedad y contaminación por partículas existente, el segundo paso ha sido la prueba de resistencia y de comportamiento de distintos materiales que potencialmente podrían utilizarse en el prototipo.

Las condiciones de frio y calor también han sido determinantes para poder seleccionar los materiales, sobre todo en el tratamiento de las luminarias y materiales anexos.

Igualmente se han probado las características reflexivas y de iluminación (y transparencia) tanto en condiciones normales como tras los tratamientos de envejecimiento, corrosión o contaminación emulados.

Una vez seleccionados hemos acudido a las normativas de señalización. Aunque estas normativas no incluyen la señalización de orientación en túnel, y menos en túneles con altos niveles de tráfico y contaminación, ha sido necesario recopilar similitudes con cualquier tipo de equipamiento que facilite su diferenciación y su defensa futura para poder ser



API movilidad — FICHA DE INSPECCIÓN — Nº 03/16

SEÑAL/TIPO: Panel 1
DESCRIPCIÓN: Panel tipo M-30 fondo azul
LOCALIZACION: túnel tramo sur
FECHA: 15-03-2016

INSPECCION VISUAL

DESPERFECTO	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	OBSERVACIONES
Arañazos	X			
Golpe o abolladura	X			
Suciedad		X		
Estanqueidad		X		
Calco	X			
Corrosión	X			
Desprendimiento	X			
Sombras	X			
Falta elem. sustentación	X			
Legibilidad (50m)	X			

ENSAYOS

PARAMETRO	VALORES	OBSERVACIONES
Coeficiente de retrorreflexión	67, 72, 74, 70, 70	
Coord cromáticas factor de luminancia	0.1581, 0.1205, 0.06	
Luminancia	465, 450, 444, 412, 410	

FIRMA INSPECTOR

FECHA: 15-03-2016

OBSERVACIONES
Se observa ensuciamiento del frontal así como falta de estanqueidad al entrar polvo dentro del panel
Debido a la suciedad los valores de luminosidad disminuyen
INFORME R-11 Nº 01/16

introducido en normativa. En el caso de normativa se han escogido las características de sistemas de alerta en túnel, así como la señalización en condiciones de nocturnidad, así como las nuevas tendencias destacables en proyectos de iluminación.

Importante también ha sido el estudio de los informes de incidencias y de seguridad en túneles, e investigaciones previas al respecto de las variables que determinan la visibilidad dentro de los túneles. El tratamiento de la visibilidad útil es fundamental para tratar la percepción de los usuarios, lo que determinará las características de la señal (tamaño, distancia de visibilidad, tiempo de reacción, ángulo de posición, lugar de posición, etc).

Respecto a requisitos de localización se han tenido en cuenta el principal modelo de túneles complejos que existe a nivel mundial (túneles de Madrid Calle 30) y en concreto los criterios de señalización del arco sur, tramo comprendido entre las radiales A-3 y A-5. Es un tramo bastante difícil a la hora de ser señalizado porque se puede considerar que tiene "doble" trazado, uno que discurre en superficie y otro que discurre en túnel.

Los túneles analizados tienen un límite de galibo de 4,5 metros y los enlaces están soterrados, los carteles de orientación tienen que adaptarse a estas circunstancias, siendo su diseño totalmente diferente al propuesto en superficie. Estas particularidades hacen que sea necesario separar los criterios establecidos para el diseño de los carteles que se colocan en la zona de superficie, de los colocados en la zona que discurre en túnel.

Una vez localizado el escenario, el resto de definición ha sido propia del proyecto ya que no existen requisitos ni normativas asociadas a la forma de señalización de orientación interna.

Una vez definidos estos puntos preliminares, se ha realizado el desarrollo conceptual y diseño de los nuevos sistemas de señalización. Para ello se ha dividido el proyecto en partes (o zonas) en base al tratamiento de la luz. Cada zona ha realizado una selección de un conjunto de materiales objetivo y se les ha sometido a pruebas para identificar su comportamiento en estas zonas (flexibilidad, durabilidad, índice de corrosión a la sal, índice de corrosión a la acidez, conductividad, robustez ante temperaturas, etc.).

Para llevar a cabo el seguimiento de los paneles, se tomaron dos paneles como muestras en los cuales se realizaron ensayos trimestrales para comprobar su comportamiento y eficacia.

CONCLUSIONES:

Con el desarrollo de este proyecto se han superado una serie de limitaciones que encontramos a la hora de señalizar túneles complejos:

1. Corrosión de materiales y durabilidad

Los materiales habitualmente utilizados en señalización exterior no necesitan soportar los niveles de corrosión que existen en túneles de elevada contaminación (humedad, gases de escape de los vehículos, pH ácido

o básico, par galvánico, diferencias de temperatura). Los materiales o equipos utilizados dentro de un túnel deben poder soportar estas condiciones de forma óptimas durante al menos 10 años (preferentemente 12 años) sin necesidad de sustitución. Esto supone no solo que la estructura aguante, sino que cualquier componente de la señal, sobre todo su capacidad de retrorreflexión, tenga también la misma durabilidad para que su visibilidad sea máxima en cualquier tipo de condición. Los túneles con alto volumen de tráfico son un problema para poder cumplir con este requisito debido a que la contaminación que se emite unida a la alta humedad del interior multiplica la influencia de la corrosión (por NOx que genera ambiente ácido), lo que supone un esfuerzo a la hora de desarrollar y usar alternativas de materiales que puedan responder a este tipo de entorno

2. Contaminación

Una segunda consecuencia de la contaminación es el alto volumen de partículas opacas en suspensión que ensucian los materiales incrementando su peso, y en el caso de almacenarse en componentes electrónicos, provoca el fallo de estos. En el caso de cristales (leds, luminarias, metacrilato, etc.) hacen que la superficie sea más opaca y por tanto reduzca de forma importante su eficacia la contaminación existente en los túneles, provocando el rápido ensuciamiento de los distintos elementos que componen el cartel, y una disminución drástica en la eficiencia y en el reparto homogéneo en la superficie del cartel. Un punto de riesgo son todas las uniones, grietas donde se puede introducir la suciedad y dañar al producto. Es necesario reducir el número de uniones y los puntos de riesgo que puedan derivar problemas de opacidad. Al igual que en la limitación anterior, se debe asegurar el funcionamiento del equipo en condiciones óptimas al menos durante 12 años de vida, considerando además la complejidad y riesgo de realizar labores de mantenimiento en túneles de esta complejidad y volumen de tráfico

3. Visibilidad reducida y opacidad

La visibilidad dentro de túnel se ve reducida tanto por el efecto túnel (por la diferencia entre la luz exterior e interior) como por el alto nivel de partículas en suspensión entre la señal y el conductor que impide que se pueda ver o leer parte o la totalidad de la señal con claridad. Estas partículas desvían la luz o incluso la reflejan por lo que pueden afectar la lectura y el tiempo de reacción del conductor. Para ello se debe analizar la cantidad de iluminación necesaria en cada señal, donde se deben situar las luminarias, cuál debe ser la orientación de las mismas para optimizar el nivel de dispersión de la luz y evitar la ceguera al conductor por exceso de iluminación (fenómeno estroboscópico), y al mismo tiempo asegurar que el fallo de alguna de las luminarias no afectan a la visibilidad integral de la señal (es un requisito impedir que una señal quede parcialmente iluminada, y afecte gravemente a la conducción en vez de facilitarla).

4. Falta de espacio

La falta de espacio afecta enormemente a la configuración de la señal, el ángulo de visión, la cantidad de texto de la información, el tamaño de la señal, su localización, etc. Las señales de dirección en carretera exterior están dispuestas fundamentalmente en el lateral derecho contenidas por una estructura metálica habitual-

mente de acero o aluminio y sostenida por uno o varios postes que resisten el peso de la misma en todo tipo de condiciones. Debido a la estructura interna de los túneles esta disposición no es posible. La única posición posible para las señales es ser colgada del techo, pero esto exige desarrollar una estructura distinta a la utilizada en carretera, vigilar el peso de la señal y probar varias alternativas para la correcta sujeción de la señal al techo del túnel que aseguren la vida útil del equipo

5. Percepción reducida

Un aspecto es la visibilidad de una señal que relacionada con la cantidad de luz o imagen que realmente alcanza al conductor (medida con luxómetros y opacímetros), y otra es como percibe el conductor la información que recibe de la misma. Debido a la reducción de visibilidad y a que el tamaño de las señales debe ser más reducida que la señalización exterior, se debe analizar si el diseño completo permite que el conductor entienda y resuelva con rapidez la información recibida. En el caso de túneles con direcciones es más importante debido a que el tráfico que lleva es dinámico (cambia continuamente entre carriles) lo que no es habitual en los túneles habituales que hasta el momento existen.

6. Impacto en los sistemas de alerta

Esta limitación se ha encontrado durante las pruebas de las primeras versiones del prototipo, donde resulta que las tecnologías de iluminación utilizadas pueden afectar al comportamiento de los sistemas de alerta (por ejemplo, anti-incendios) que se basan en mediciones del entorno. Es necesario que el impacto sobre el entorno del nuevo producto sea inocuo para estos sistemas.

7. Modelo de señalización

Considerando la novedad de este tipo de señalización en túnel, es necesario igualmente medir y analizar la cantidad de señales que se deben utilizar en un tramo de túnel. Debemos resolver cada cuanto se debe situar una señal, cuantos metros debe situarse una señal antes de una entrada o una salida, si es posible situar varias señales en paralelo, etc. Para estas cuestiones se debe analizar la forma de percepción de los usuarios y su comportamiento ante una señal con el fin de encontrar el punto de equilibrio entre señalización e iluminación de las señales. Debido a la inexistencia de señalización de orientación interna en túnel no existe legislación en España ni en Europa sobre las normas que se deben cumplir este tipo de equipos de señalización. Es-

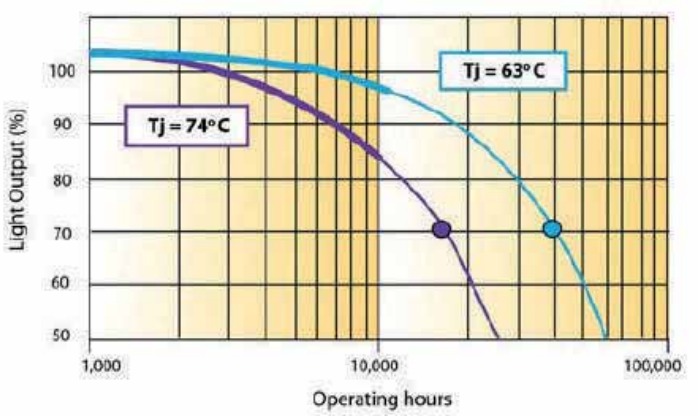
to implica la necesidad de realizar un estudio más amplio no solo de las condiciones en túnel y la forma de atacarlas, sino sobre todo la forma en la que los conductores van a percibir estos cambios.

8. Viento

El viento interno generado dentro de un túnel suele ser horizontal y tiene un comportamiento distinto al existente en el exterior del túnel. Ha sido necesario analizar el impacto del viento sobre las estructuras en los distintos puntos posibles de localización, considerando el efecto en el largo plazo sobre la señalización, y obligando al mismo a soportar las fuerzas perpendiculares respecto a la señalización que se pretende construir.

9. Control y difusión de temperaturas

Las bajas temperaturas existentes en el interior de algunos túneles, y la alta temperatura generada en la estructura de iluminación es un elemento a controlar y mejorar. Primero porque la temperatura afecta a la difusión de la luz y puede generar alteraciones en la visibilidad de la señal, y segundo porque acorta de forma importante la vida de las luminarias y de los circuitos eléctricos.



10. Mantenimiento y seguridad

En todos los planteamientos que se manejan siempre debe tenerse en cuenta la seguridad en su instalación y la facilidad y agilidad de mantenimiento o incluso extracción. Este requisito es importante porque en túneles con tráfico existe un riesgo mucho mayor de accidentalidad originado por tareas de mantenimiento, lo que debe reducirse a tiempo mediante el correcto diseño de la solución.

El proyecto ha sido certificado por la Agencia de Certificación en Innovación Española, ACIE, entidad acreditada por ENAC, como proyecto de Investigación y Desarrollo.

REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD EN TÚNELES

Cristina Zamorano Nicolás
Abertis Autopistas España

Los túneles y sus zonas de influencia son tramos que requieren de una especial gestión de la seguridad vial dadas las particularidades de la vía, principalmente en un espacio cerrado.

En un túnel, el riesgo de accidente es menor que a cielo abierto, no obstante, en el acceso, durante el trayecto por el mismo y, a la salida, es necesario mantener y extremar la seguridad y evitar riesgos innecesarios.

La Directiva Europea 2004/54/CE y su transposición al RD 635/2006, suponen, en su momento un avance indudable en la gestión de los requisitos mínimos de seguridad para mejorar las condiciones de utilización de estas infraestructuras. Pero no cabe duda que la experiencia y las lecciones aprendidas en el transcurso del tiempo nos conducen a reconocer que la conducta de los usuarios es la que más aporta a la seguridad global. En este sentido, es responsabilidad compartida de los proyectistas, los explotadores, gestores de tráfico y resto de organismos involucrados, crear y mantener un entorno adecuado donde se induzcan comportamientos seguros y eviten incidentes graves, así como que los conductores perciban seguridad y comodidad.

Dado que cada túnel ofrece sus propios desafíos de seguridad específicos, deben explorarse medidas que reduzcan la probabilidad de accidente y que, si sucede, sus consecuencias sean leves. En casos en que no puedan garantizarse niveles de seguridad suficientes, aun aplicando soluciones de ingeniería, diseño viario y gestión del tráfico, pueden llegar a plantearse intervenciones complementarias con sistemas de vigilancia vial.

A través de la comunicación propuesta, se expondrá como se abordó una solución concreta para laminar y disminuir la velocidad en el entorno de los Túneles de Guadarrama, a través de la instalación de cinemómetros de velocidad media, que sustituyeron a los radares fijos ya instalados, ampliando así y mejorando la vigilancia en el interior del túnel y tramos contiguos.

SPEED REGULATION IN TUNNELS

In a tunnel, the risk of accidents are lower than on the open road; however, during the trip through the tunnel, it is necessary to maintain and maximise safety and avoid unnecessary risks.

The European Directive 2004/54/EC and its transposition into Royal Decree 635/2006, at that time, represented an unquestionable advance in the management of minimum safety requirements to improve the conditions of use of these infrastructures.

But there is no doubt, our experience and the lessons we learnt over time, lead us to recognise that it is the drivers behaviour that contributes most to overall safety.

In this respect, it is the responsibility of designers, operators, traffic managers and other organisations involved to create and maintain a suitable environment where safe behaviour is encouraged and serious incidents are avoided, as well as drivers' perception of safety and comfort. As each tunnel offers its own specific safety challenges, measures should be explored to reduce the likelihood of accidents and, if they do occur, to keep their consequences to a minimum.

In cases where sufficient safety levels cannot be ensured even with engineering, road design and traffic management solutions, aditional interventions with road surveillance systems may be considered.

The proposed communication will show how a specific solution to reduce speed in the area around the Guadarrama Tunnels was addressed by installing average speed cinemometers, which replaced the fixed radars already installed, thus extending and improving surveillance inside the tunnel and adjacent sections.

RÉGULATION DE LA VITESSE DANS LES TUNNELS

Les tunnels et leurs zones d'influence sont des tronçons qui nécessitent une gestion particulière de la sécurité routière compte tenu des particularités de la route, principalement dans un espace clos.

Dans un tunnel, le risque d'accident est plus faible qu'à l'air libre, cependant, à l'accès, à la sortie et pendant le trajet dans le tunnel, il est nécessaire de maintenir et de maximiser la sécurité et d'éviter les risques inutiles.

La directive européenne 2004/54/CE et sa transposition dans le décret royal 635/2006 représentaient à l'époque une avancée incontestable dans la gestion des exigences minimales de sécurité pour améliorer les conditions d'utilisation de ces infrastructures. Mais il ne fait aucun doute que l'expérience et les enseignements tirés au fil du temps nous amènent à reconnaître que c'est le comportement des usagers qui contribue le plus à la sécurité globale. À cet égard, il incombe aux concepteurs, aux exploitants, aux gestionnaires de la circulation et aux autres organisations concernées de créer et de maintenir un environnement adéquat qui incite à un comportement sûr et évite les incidents graves, ainsi que la perception de la sécurité et du confort par les conducteurs.

Chaque tunnel posant des problèmes de sécurité spécifiques, il convient d'étudier les mesures permettant de réduire la probabilité d'accidents et, s'ils se produisent, de limiter au maximum leurs conséquences. Dans les cas où des niveaux de sécurité suffisants ne peuvent être garantis, même avec des solutions d'ingénierie, de conception des routes et de gestion du trafic, des interventions complémentaires avec des systèmes de surveillance routière peuvent être envisagées.

La communication proposée montrera comment une solution spécifique pour réduire la vitesse dans la zone autour des tunnels de Guadarrama a été abordée en installant des cinémomètres de vitesse moyenne, qui ont remplacé les radars fixes déjà installés, étendant et améliorant ainsi la surveillance à l'intérieur du tunnel et des sections adjacentes.

INTRODUCCIÓN AUTOPISTAS, GRUPO ABERTIS

Desde Autopistas, tenemos la misión de velar por la seguridad vial y trabajar para conseguir la siniestralidad cero.

Por ello, además de mantener en óptimas condiciones una infraestructura de primer nivel, debemos:

- Advertir de los riesgos detectados al volante y, de sus consecuencias.
- Concienciar a los conductores e
- Impulsar iniciativas a favor de una educación vial rigurosa.

En España, Abertis es operador de 561 km de autopistas de peaje, de los cuales aproximadamente 27 corresponden a túneles.

Imagen 1- Mapa Autopistas an Abertis company

La presente comunicación describe la acción concreta implantada en los túneles de la autopista AP-6 (Castellana de Autopistas), ubicados entre la provincia de Segovia y la Comunidad de Madrid. Se trata de dos túneles unidireccionales y un tercer túnel con posibilidad de operarse en reversible. Las principales características de los mismos son las siguientes:

Imagen 2- Esquema Túneles Guadarrama

Túnel 1: Forma parte de la calzada reversible.

Túnel 2: Tiene asociado la calzada sentido A Coruña.

Túnel 3: Tiene asociado la calzada sentido Madrid.

Imagen 3- Representación Túneles Guadarrama boca sur (Dirección Madrid)

Tabla 1- Detalle longitudes Túneles de Guadarrama

CONCEPTO	TÚNEL 1	TÚNEL 2	TÚNEL 3
Sentido de circulación en modo de operación normal	Reversible	Coruña	Madrid
Longitud (m)	2.866	3.323	3.148

ANTECEDENTES

Ya en el VII Simposio de Túneles de Carretera celebrado en 2019 en Barcelona, la propia presentación del Presidente del Comité Nacional de túneles, apuntaba a la necesaria visión de la seguridad integral y enfoque holístico, como medida para establecer las reglas básicas que aseguren un nivel de seguridad alto y uniforme para los usuarios tanto de túneles como en carreteras a cielo abierto. (1)

(1) Artículo "Concepción y proyecto de túneles de carretera para el futuro", Autor: Rafael López Guarga (Presidente del Comité de Túneles).

Sin duda, la crisis derivada del COVID ha cambiado los hábitos en cuanto a la conducción, incorporando nuevos riesgos o agravando los ya existentes como por ejemplo los derivados de las distracciones y la velocidad. Según datos publicados por el Ministerio del Interior, en 2020, en un 25% de los accidentes mortales registrados la velocidad inadecuada estuvo presente.

Así, de forma conjunta con la Dirección General de Tráfico (DGT) y, muestra de colaboración entre gestores públicos y privados, ambos con un objetivo común como es mejorar la seguridad vial y evitar siniestros, en el año 2011 comenzó a funcionar el primer cinemómetro de velocidad media en España, en el entorno de los Túneles de Guadarrama (en la autopista AP-6, entre las provincias de Madrid y Segovia).

Aunque actualmente los radares de tramo suponen la minoría en relación a los fijos o móviles, siendo los fijos los que copan el mayor porcentaje, se consideran un sistema válido para contener el riesgo.

¿QUÉ ES UN CINEMÓMETRO DE TRAMO?

A diferencia de un radar fijo, en un "radar" de tramo no se mide la velocidad de paso en puntos concretos, si no en tramos más amplios de varios kilómetros.

Según explica la propia Dirección General de Tráfico (DGT), el control de velocidad en un tramo se lleva a cabo a través de cámaras situadas una por carril que graban de forma continua a todos los vehículos que pasan desde el punto inicial de "entrada" al tramo hasta el punto final "de salida". Con los datos almacenados, el sistema calcula la velocidad media en función del tiempo invertido por cada vehículo en recorrer el tramo de referencia. Es decir, para un trayecto determinado y para cada vehículo concreto, se dispondrá de datos de la velocidad media mantenida.

Así mismo, según explica la DGT, este tipo de radares también realizan otras funciones como por ejemplo recoger información de los tiempos de recorrido, analizar la velocidad media del conjunto de vehículos, la intensidad y las características de la circulación, controlar los vehículos que transporten mercancías peligrosas y hacer estadísticas y alarmas de tráfico.

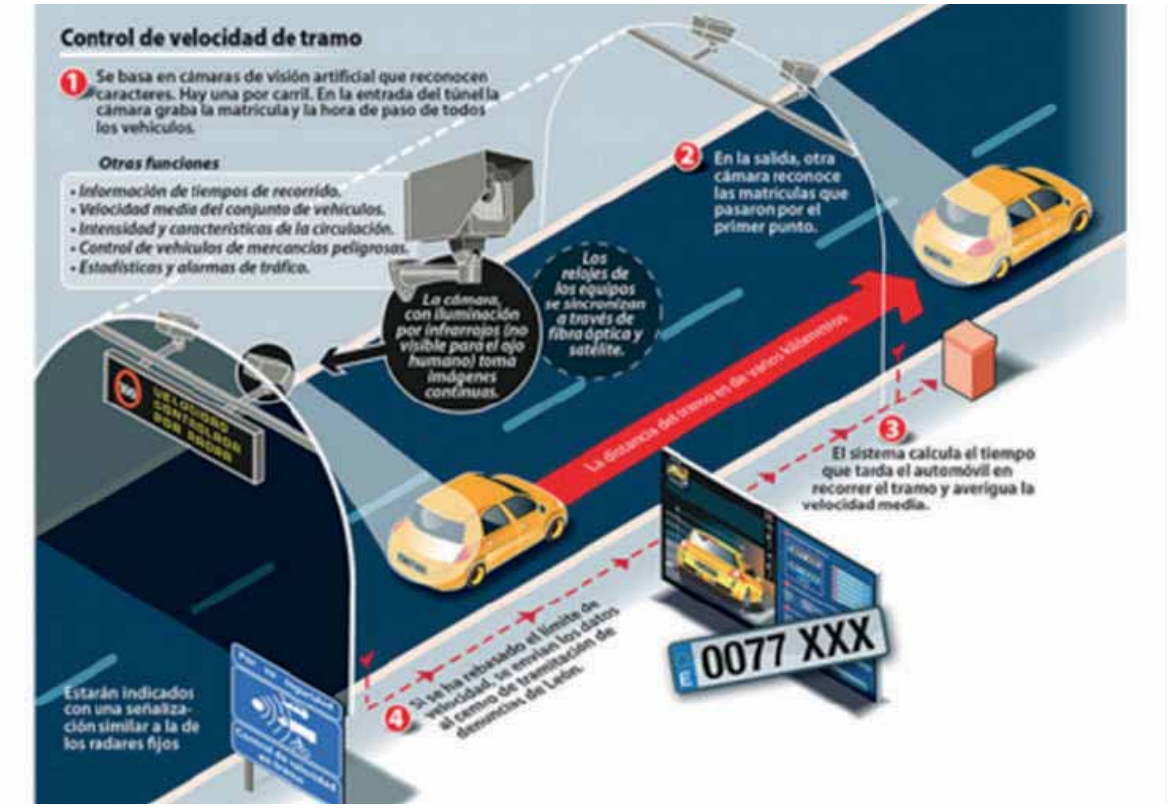


Imagen 4- Esquema de funcionamiento control de velocidad en tramo
Fuente Revista DGT:
https://revista.dgt.es/images/Radar-de-tramo-ampliada.jpg
https://revista.dgt.es/es/multimedia/infografia/2019/06JUNIO/0217-Radares-de-tramo-asi-funcionan.shtml

No es objeto de esta comunicación abordar la normativa específica en relación al control metrológico de los instrumentos destinados a medir la velocidad de circulación de los vehículos a motor ni valorar la idoneidad o no sancionadora de estos dispositivos. Para ello, ya se dispone de regulación y normativa al respecto.

DESARROLLO DE UNA MEDIDA CONCRETA EN LOS TÚNELES DE GUADARRAMA

En el año 2009, derivado de la inquietud mostrada por la DGT en cuanto a la velocidad en los túneles, se comenzó con la instalación del primer radar de estas características en los Túneles de Guadarrama.

El primero fue puesto en funcionamiento en el Túnel 2, en la calzada en sentido Adanero, el día 01 de diciembre de 2010. En la calzada en sentido Villalba fue en el año 2011.

Tiempo más tarde y ante el buen funcionamiento del radar del Túnel 2 se planteó la ejecución del radar del Túnel 3. En este caso concreto, dada la particularidad del trazado y la pendiente en el tramo de salida del Túnel 3 (esto es, dirección Madrid), la concesionaria propuso prolongar el ámbito de influencia del radar abarcando no solo los más de 3 kilómetros de túnel si no desde el tramo previo a la entrada del mismo hasta pasados varios kilómetros a la salida. En este sentido, se solicitó a la DGT que se ampliase hasta el punto kilométrico 49, aprovechando además un pórtico existente en ese punto.

Para la instalación del radar del tramo del Túnel 3 (y 2) una vez validada la propuesta con DGT de instalarlo entre la boca norte del túnel y el pórtico de señalización variable, se plantearon diversas reuniones con responsables de DGT y la empresa instaladora para organizar y coordinar la colocación de los equipos de radar, así como los carteles de señalización.

Hay que indicar que el radar de tramo supuso la retirada del radar fijo que ya existía a la salida del Túnel 3 en la margen izquierda.

Al instalarse las cámaras sobre pórticos de señalización variable ya existentes, la obra fue mucho más sencilla ya que se aprovechó el suministro de energía y de comunicaciones ya disponibles y tan solo requería de un nuevo tendido puntual. No obstante, en el caso de la boca norte del Túnel 2 si fue necesario construir una pasarela adosada al paramento exterior similar a la que existía en boca sur.

También se planteó un radar de tramo para el Túnel 1 (que puede actuar en reversible en función la intensidad del tráfico) pero se desestimó dado que ese túnel se abría pocas veces al año y además debería estar preparado para la lectura en dos sentidos, por lo que no se consideró en ese momento. La tecnología hoy en día permite abordar este proyecto y puede plantearse en un futuro.

Imagen 5- Detalle tramo previo entrada Túnel 3

Como se observa en la imagen, otra medida implantada para aumentar los niveles de seguridad vial ha sido la instalación de señalización horizontal tipo galones para fomentar el respeto por la distancia de seguridad. Medida que, al igual que con el radar de tramo, abarca tanto el túnel como su tramo previo y posterior. Lo que se busca es evitar modificaciones bruscas de velocidad que, generalmente, suelen registrarse a las salidas de los túneles.

CONTRIBUCIÓN DE LOS SISTEMAS ITS EN LA SEGURIDAD DE LOS USUARIOS EN LOS TÚNELES

Atendiendo a la definición del concepto de ITS (2) los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) son los sistemas de control e información que utilizan las tecnologías de procesamiento de datos y las comunicaciones en forma integrada, a efectos de:

- Mejorar la movilidad de personas y de bienes.
- Aumentar la seguridad, reducir la congestión del tránsito y permitir la eficaz gestión de incidentes.

- Cumplir los objetivos y metas de las políticas de transporte, tales como las medidas de gestión de la demanda o de prioridad del transporte público.

(2) (PIARC, Autores Professor Mashrur (Ronnie) Chowdhury (Clemson University, S. Carolina, USA), Professor Adel Sadek (State University of New York, Buffalo, NY, USA). Traducido al idioma castellano por Daniel G. Russomanno), https://rno-its.piarc.org/es/conceptos-basicos-its/que-significa-its.

Sin duda, los sistemas ITS pueden considerarse herramientas adecuadas y modernas para una correcta gestión de los túneles y sus zonas de influencia. Desde el punto de vista de la tecnología, debemos implementar equipos e instalaciones robustas, fiables y que ayuden al usuario a adoptar las medidas de seguridad acordes al medio por el que circulan.

Los cinemómetros de tramo son elementos que permiten gestionar el tráfico tanto en el interior de los túneles como en las zonas de influencia o en el tramo que considere adecuado, estableciendo límites de velocidad diferentes a los establecidos en el resto de la vía. Este tipo de sistema tiene un importante rol para los gestores de carreteras dado que incide en:

- la mejora de la capacidad de la vía
- asegurar que en la red se opere de forma segura, eficiente y sostenible.

El objetivo perseguido es que se cumpla la normativa, porque tan importante son las normas y leyes como verificar su cumplimiento. Los usuarios debemos entender que un cinemómetro de tramo en un sistema que ayuda a laminar las velocidades y que eso, favorece nuestra seguridad.

OBSERVATORIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS CONDUCTORES EN TRAMO DE TÚNELES

En los años 50, los Agentes de Tráfico tomaban como referencia la velocidad de sus propios vehículos para determinar si la del resto de usuarios de la vía era la adecuada o no. y, aunque posiblemente los vehículos sean uno de los elementos que más han evolucionado en los últimos años, tanto en prestaciones para el confort del usuario como en elementos de seguridad, por los últimos datos de siniestros en los cuales la velocidad inadecuada ha estado implicada, vemos que, a día de hoy, pasados unos cuantos años, los problemas siguen siendo los mismos.

A través de Observatorios del Comportamiento, como los que se llevan a cabo de forma regular en Autopistas, los usuarios debemos entender que un simple alcance entre vehículos o un siniestro provocado por exceso de velocidad, si se registra en el interior del túnel las consecuencias del mismo, el impacto tanto en la explotación del propio túnel como la gestión del tráfico y el impacto sobre el resto de usuarios puede ser muy superior a si se produce a cielo abierto. Así mismo, la dificultad de intervención de los servicios de emergencia o de la propia concesionaria, en caso necesario se incrementa con respecto a un incidente a cielo abierto.

Este estudio, del cual se muestran los resultados a continuación, se llevó a cabo, en territorio, sobre un túnel tipo, como puede ser un túnel de dos carriles, bien iluminado y señalizado, con una gestión de la explotación a través de los Centros de operaciones y, en pista, con los equipos de mantenimiento y, con una velocidad máxima limitada.

El estudio se realizó en colaboración con Intra y contó con una amplia muestra de cerca de 35.000 vehículos en los túneles del Garraf (autopista C-32), túnel de Vallvidrera y túneles de Guadarrama, en la autopista AP-6.

Además del parámetro de velocidad, desde Autopistas profundizamos en el análisis de otros factores concretos como la distancia de seguridad, el uso del intermitente, uso de luces en interior de túnel y comportamiento del usuario ante cambios de señalización, entre otros.

Como puede observarse, un 67% de los conductores de vehículos ligeros superaron la velocidad máxima permitida dentro del túnel. Además, un 7,3% superaron los 120 km/h, en una zona donde la velocidad estaba limitada a 90km/h.

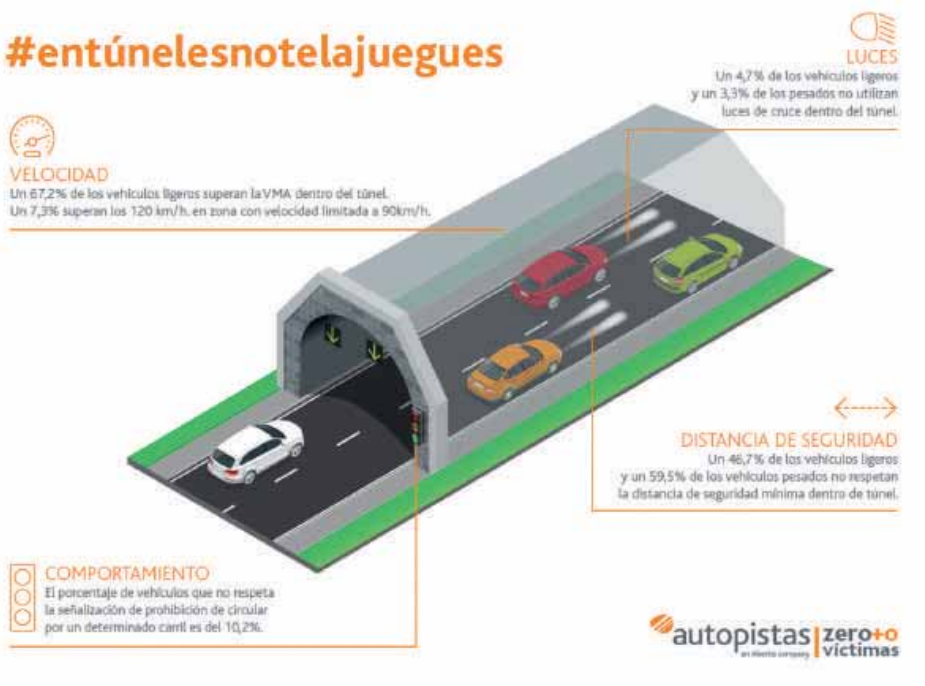


Imagen 6- Principales resultados del Observatorio del Comportamiento en Túneles

La conducta del usuario es una pieza clave para garantizar la máxima seguridad vial y, las campañas de concienciación y sensibilización, en colaboración con el resto de agentes implicados, son necesarias para conseguir transmitir la importancia de respetar las normas. En este sentido, tras el análisis de los resultados del observatorio, fueron varias la campaña de comunicación lanzadas, principalmente a través de redes sociales, para exponer los riesgos asociados a los parámetros observados.

Imagen 7- Imagen de uno de los mensajes emitidos en la campaña

Durante los años posteriores a la instalación del radar de tramo del Túnel 3, se ha llevado a cabo un seguimiento tanto de los parámetros indicados en el observatorio como de los registros de siniestralidad. En este caso, se ha constatado que, a pesar de la baja muestra, la instalación del radar de tramo es una medida que contribuye a la mejora del nivel de seguridad vial.

Así mismo y, en el marco de colaboración con la DGT, se ha ido contrastando e intentando informar al usuario a través de los paneles de mensajería variable, de la existencia del radar y de su longitud. Se ha observado que los usuarios recurrentes ya han interiorizado que en ese tramo concreto es necesario mantener una velocidad moderada y constante, pero es en periodos en los que circulan un alto porcentaje de vehículos foráneos que desconocen la situación, donde se observan los típicos frenazos justo en los paneles de mensajería donde se sitúan las cámaras, precisamente porque interpretan que es un radar fijo instalado en un punto concreto.

CONCLUSIÓN

Definir una solución concreta y evaluarla a lo largo del tiempo, permite avanzar e identificar las estrategias a seguir por todos los actores con responsabilidades en gestión del tráfico y la movilidad. Los Observatorios de Comportamiento de los conductores, junto con los sistemas adecuados, son una herramienta más para facilitar esta compleja tarea.

Aunque la Ley de Seguridad Vial y el Reglamento General de la Circulación, fija la normativa aplicable a los límites de velocidad, los conductores tenemos que asimilar que la tecnología y los sistemas como los radares sirven de ayuda para mejorar la seguridad vial.

Dando por concluido este artículo, es evidente que los cinemómetros de tramo son un elemento válido para conseguir los objetivos de calmado de velocidad, cumpliendo con los requisitos exigidos a un sistema ITS. A través de la colaboración entre la DGT y Castellana de Autopista, se optimizaron al máximo los costes y los tiempos de instalación, compartiendo además constantemente los resultados de la misma.

PLATAFORMA DIGITAL DE GESTIÓN INTEGRADA DE TÚNELES

Vicente Sebastián Alapont
Director de Ingeniería y Proyectos
ETRA

La digitalización de las infraestructuras es una realidad que se ha venido consolidado en los últimos años. La potencia de los sistemas de computación y de telecomunicaciones, unido las de tecnologías facilitadoras y emergentes, han introducido un cambio de paradigma en la gestión de las infraestructuras, en el sentido de que se ha incrementado la capacidad de sensorización de éstas y de su entorno, pero también su capacidad para intercambiar información con los actores que interactúan o hacen uso de ellas.

En el contexto de los túneles, este fenómeno ha permitido evolucionar los sistemas de control y seguridad que ya están prescritos por la normativa en función de sus características y los volúmenes de tráfico que soportan, convirtiéndolos en infraestructuras inteligentes mejorando sus capacidades de reacción y respuesta ante eventos, así como su gestión desde plataformas abiertas, con las ventajas que ello conlleva.

En esta comunicación se presenta una plataforma digital para la gestión integral de túneles, implementada con una arquitectura normalizada y con componentes de código abierto, que permite el control y monitorización de varios túneles desde una misma herramienta a través de su interfaz de usuario web, y su integración con terceros sistemas y plataformas de ciudad o carretera para el intercambio de información.

INTEGRATED DIGITAL TUNNEL MANAGEMENT PLATFORM

The digitalization of the infrastructures has been consolidated in the last years. The power of the Information and Communication Technologies, as well as the frontier and emerging technologies have changed the infrastructure management paradigms. The capability to sensorize and monitor the infrastructures and their surroundings has been incremented, but also their ability to exchange information with the actors that interact or use them.

This phenomenon has allowed to evolve the tunnel control and safety systems, as already prescribed by the EU Directives depending on their characteristics or their traffic levels, transforming them into intelligent infrastructures by improving their reaction to events and their response capability, as well as their management from open source platforms, with the consequent advantages.

This communication introduces a digital platform for integrated tunnel management implemented with a standardized architecture, with open source components, which allows to manage and control several tunnels from the same tool through a friendly web user interface, and its integration with third party systems, city platforms o road control systems, for the exchange of information.

PLATEFORME INTÉGRÉE DE GESTION DES TUNNELS NUMÉRIQUES

La digitalisation des infrastructures est une réalité qui s'est consolidée ces dernières années. La puissance des systèmes informatiques et de télécommunications, ainsi que celles des technologies facilitantes et émergentes, ont introduit un changement de paradigme dans la gestion des infrastructures, dans le sens où la capacité de détection de ceux-ci et de leur environnement a augmenté, mais aussi leur capacité à échanger des informations avec les acteurs qui interagissent avec ils, ou les utilisent.

Dans le contexte des tunnels, ce phénomène a permis de faire évoluer les systèmes de contrôle et de sécurité déjà prescrits par la réglementation en fonction de leurs caractéristiques et des volumes de trafic qu'ils supportent, les transformant en infrastructures intelligentes, améliorant leurs capacités de réaction et de réponse face aux événements, ainsi que leur gestion depuis des plateformes ouvertes, avec les avantages que cela comporte.

Cette communication présente une plate-forme numérique pour la gestion intégrale des tunnels, mise en œuvre avec une architecture standardisée et avec des composants open source, qui permet le contrôle et la surveillance de plusieurs tunnels à partir du même outil via son interface utilisateur Web, et son intégration avec des tiers systèmes et plates-formes urbaines ou routières pour l'échange d'information.

INTRODUCCIÓN

A diferencia de lo que ocurre en la gestión del tráfico y las infraestructuras de carreteras, en las que la supervisión del tráfico y del estado de las mismas se realiza de una forma centralizada, desde un centro de gestión coordinado por la autoridad correspondiente, como la DGT a nivel de la Red de Carreteras del Estado o los correspondientes responsables a nivel autonómico o municipal, los túneles tradicionalmente han sido gestionados como "unidades aisladas" con sus propios sistemas de gestión y un bajo nivel de integración con las infraestructuras viales adyacentes.

Probablemente la explicación viene dada porque los túneles, por sus características, requieren de un mayor equipamiento de seguridad sujeto a las especificaciones de la Directiva Europea y su transposición al Real Decreto 365/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado, que conlleva un diseño específico para la mejor solución tecnológica de los sistemas de seguridad y control en función de las características de cada túnel.

Además, la responsabilidad de la gestión es de cada una de las Demarcaciones de Carreteras en los túneles de carretera o de los Ayuntamientos en el caso de los túneles urbanos. Esto hace que existan diferentes criterios relativos tanto al modelo de gestión como al entorno en el que se ubica cada túnel.

El realizar una gestión individualizada de cada túnel es, por tanto, un planteamiento lógico. Sin embargo, esto no impide plantear escenarios en los que una gestión centralizada o coordinada de un conjunto de túneles puede aportar beneficios no solamente en términos de la gestión del tráfico y la infraestructura, sino además agregar una información que puede ser muy útil para los gestores de la red de túneles.

En este artículo se describe la arquitectura y funcionalidades de una plataforma digital de gestión integrada de túneles, desarrollada por ETRA y con el nombre de PLATUN, que desplegada sobre los sistemas de control existentes ofrece al gestor un interfaz único para la explotación de los túneles bajo su responsabilidad, facilitando además el intercambio de información con usuarios y con gestores de otras infraestructuras.

OBJETO DE LA PLATAFORMA

El objeto de esta plataforma es ofrecer una herramienta de gestión integrada de un conjunto de túneles de manera que los responsables de la operación y gestión dispongan de un interfaz homogéneo desde el que poder gestionar los diferentes túneles.

La plataforma está concebida y diseñada bajo los paradigmas de arquitecturas estándar y código abierto para facilitar la integración con los sistemas y equipamientos ya existentes o futuros de los túneles, haciendo uso de las tecnologías más avanzadas para la explotación y representación de la información.

La plataforma no pretende reemplazar los sistemas de seguridad y control de los túneles, sino convertirse en una capa de gestión de nivel superior en la que confluya la información procedente de los sistemas locales de los diferentes túneles para que, utilizando analíticas avanzadas de datos, el gestor pueda conocer la información de forma agregada, tanto para la toma de decisiones como para su difusión por los canales que considere más adecuados.

No es, por tanto, objeto de la plataforma sustituir los sistemas que ya existen en los túneles, sino aportar unas herramientas de valor añadido para su gestión de forma integrada.

ARQUITECTURA DE LA PLATAFORMA

La arquitectura de la plataforma de gestión integrada de túneles PLATUN ha sido diseñada siguiendo las recomendaciones y arquitecturas para las soluciones de ciudades inteligentes definidas en el marco del comité de normalización UNE CTN179. Si bien como sea indicado, estas normas están orientadas a la gestión de ciudades, su arquitectura basada en capas hace que sea perfectamente aplicable a cualquier sistema de gestión de información como es el caso que nos ocupa.

La Plataforma está desarrollada a partir de las últimas tecnologías Open Source, cuyo código fuente es accesible de manera libre y está respaldado por una amplia comunidad de desarrolladores. Esto garantiza las prestaciones y robustez de la solución, su evolución tecnológica e interoperabilidad necesaria en este tipo de entornos.

PLATUN es capaz de gestionar de manera global un conjunto de túneles, independientemente del proveedor del sistema de control y la tecnología existente, implementando los mecanismos de comunicación con ellos a través de métodos normalizados y estandarizados de intercambio de información, como son los servicios web a través de un API REST abierto, documentado y accesible. De esta manera, a través del interfaz de usuario web de la Plataforma, se puede acceder a la funcionalidad principal de control y monitorización de todos los túneles, desde un interfaz unificado.

La solución asimismo permite la conexión e interoperabilidad con sistemas externos y otras Plataformas, con el objetivo de obtener información útil para la gestión de los túneles, o de servir a terceros información existente en la Plataforma, que pueda ser de utilidad para otras entidades.

La siguiente figura muestra la arquitectura de la plataforma PLATUN.

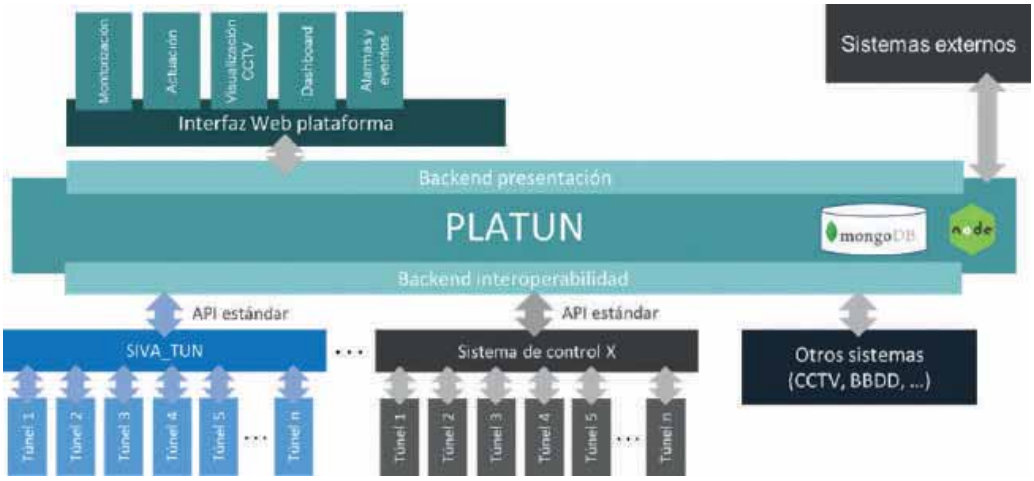


Figura 1. Arquitectura de la plataforma PLATUN.

Como se puede apreciar, la plataforma se estructura en una serie de capas o niveles bien diferenciados.

En la parte inferior se representan las infraestructuras físicas, los túneles con sus instalaciones de seguridad y control y sus propios scadas. También se contemplan otros sistemas y tecnologías que puedan aportar información relevante a la gestión de esas infraestructuras, por parte de la plataforma.

Para conectar e integrar las infraestructuras físicas, la plataforma dispone de una capa llamada Backend de interoperabilidad que incorpora los mecanismos necesarios para facilitar el intercambio de información. Dependiendo de cómo estén implementados los scadas en los túneles, se podrán utilizar métodos estándar de intercambio de información (API REST).

La capa central de la plataforma agrupa todos los componentes encargados de interpretar, estructurar, almacenar y analizar la información proveniente de las diferentes fuentes, dejándola lista para su explotación por las diferentes funcionalidades que ofrece.

En el caso de PLATUN, la información se almacena en MongoDB, una base de datos de código abierto NoSQL orientado a documentos. Esta base de datos, en lugar de guardar la información en tablas como se hace en las bases de datos relacionales, la guarda en estructuras de datos en documentos similares a JSON con un esquema dinámico, haciendo que la integración de los datos en ciertas aplicaciones sea más fácil y rápida.

Para que esta información esté disponible para las aplicaciones y funcionalidades de explotación, se utiliza un servidor Node js. Node.js®, que es un entorno de ejecución para JavaScript construido con el motor de JavaScript V8 de Chrome. Node.js usa un modelo de operaciones de entrada y salida sin bloqueo y orientado a eventos, que lo hace liviano y eficiente. El ecosistema de paquetes de Node.js es probablemente el ecosistema más grande de librerías de código abierto en el mundo, lo que aporta robustez a la plataforma.

La siguiente capa, es la llamada Backend de presentación y tiene como misión actuar como interfaz entre la plataforma y las aplicaciones de usuario que van a facilitar la gestión integrada de los túneles.

Un aspecto fundamental es el diseño para facilitar su uso, ya que se trata de un entorno complejo que debe manejar un gran volumen de información. Todas las funcionalidades son accesibles a través de un Interfaz web de operación amigable que ofrece la monitorización conjunta y global de todos los túneles y de todos los sistemas relacionados con la gestión de los mismos. Este interfaz dispone de opciones de actuación sobre cada uno de los sistemas a partir de los mecanismos de actuación que se establezcan. Además, cuenta con una gestión de usuarios y perfiles, que permite acotar las funcionalidades disponibles para cada usuario, y una gestión de capas de visualización para seleccionar los elementos a visualizar en cada momento, garantizando así la seguridad en el acceso a la información en función de los niveles de autorización de cada usuario.

GESTIÓN INTEGRADA DE TÚNELES

Desde el punto de vista de la explotación, la gestión integrada de un conjunto de túneles facilitará la gestión a alto nivel, desde un único centro de control, aportando a los operadores herramientas funcionales con las que llevar a cabo tareas como

- La monitorización del tráfico y el estado de las infraestructuras de los túneles
- La actuación sobre los sistemas de control cuando sea necesaria
- La gestión coordinada de incidentes, alarmas y eventos
- La gestión del inventario
- La generación de cuadros de mando y el análisis de la información de una forma integral.

Monitorización

A través de la capa de interoperabilidad, la Plataforma es capaz de monitorizar en tiempo real las variables y medidas recogidas por los equipos y sensores instalados en los túneles como los aforadores de tráfico, sensores de gases, anemómetros, analizadores de redes, ventiladores, y en definitiva cualquier equipo que tenga la capacidad de ofrecer datos en formatos normalizados.

Estos equipos se representan en un mapa de vista general y un sinóptico, con el objetivo de identificar su ubicación y estado de manera visual, tal y como se aprecia en la siguiente figura.

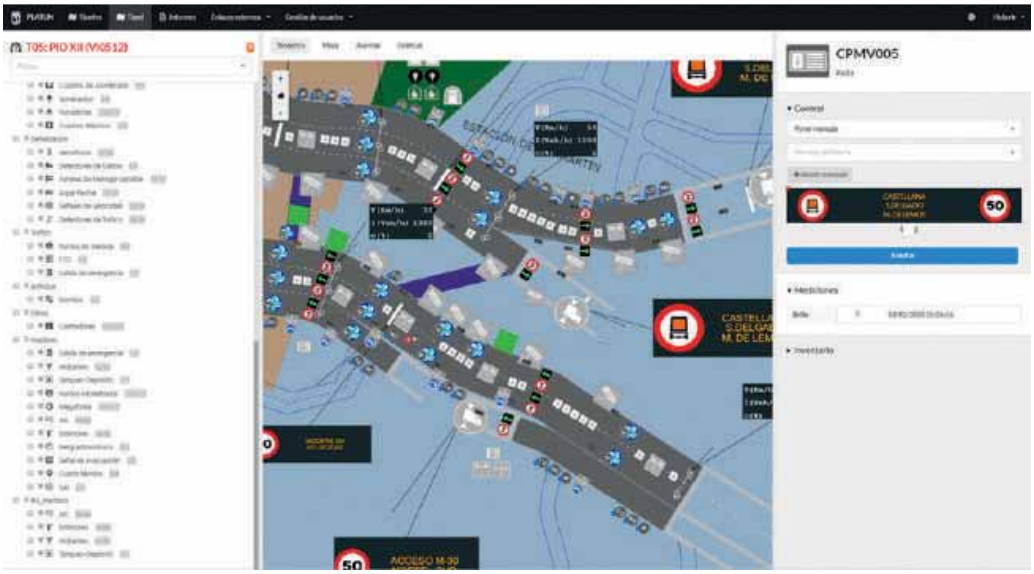


Figura 2. Representación de los equipos de un túnel en el interfaz de PLATUN.

El acceso a esta información en cada túnel se realiza a través del protocolo de comunicación estandarizado entre la Plataforma y el sistema de control del túnel, de manera que este sistema de control sirve en tiempo real a la Plataforma los datos medidos. La Plataforma monitoriza de manera conjunta las medidas de todos los sistemas de control de túneles conectados a la misma, permitiendo la gestión y visualización de esta información de manera global a través de tablas y gráficas representativas.

A modo ilustrativo, la siguiente figura muestra valores de la calidad del aire medida por los equipos de campo, y que podrían representarse tanto a nivel de túnel individual, como de todo el conjunto de los túneles.

Figura 3. Representación de valores técnicos agrupados.

Actuación

Otra funcionalidad importante es que la Plataforma permite al gestor, realizar una actuación conjunta sobre los sistemas de control de túneles conectados a la misma, enviando órdenes a través del protocolo de comunicaciones estandarizado.

De esta forma, desde la Plataforma se pueden configurar planes de actuación sobre los distintos túneles, combinando actuaciones sobre los mismos en función de lo que se requiera. Esto proporciona gran versatilidad a los gestores de la infraestructura a la hora de establecer actuaciones globales y para informar a los usuarios de los túneles.

Las actuaciones que es posible realizar son del tipo:

- Ejecución de una orden específica sobre un equipo de un túnel.
- Actuación conjunta sobre varios equipos de uno o varios túneles.
- Ejecución de un plan de un determinado túnel.
- Activación conjunta de planes preconfigurados en varios túneles.
- Creación y ejecución de planes desde la misma Plataforma.
- Otras actuaciones.

En cualquier caso, todo este tipo de intervenciones se podrá llevar a cabo tras la debida configuración de jerarquías de control y permisos de operación para evitar conflictos en la gestión.

Un ejemplo que puede ilustrar esta funcionalidad es el que se presenta en la siguiente figura, en la que se observan los diálogos de estado de un ventilador y de un panel de mensajería variable, sobre los que el operador podría realizar una actuación puntual en caso necesario.

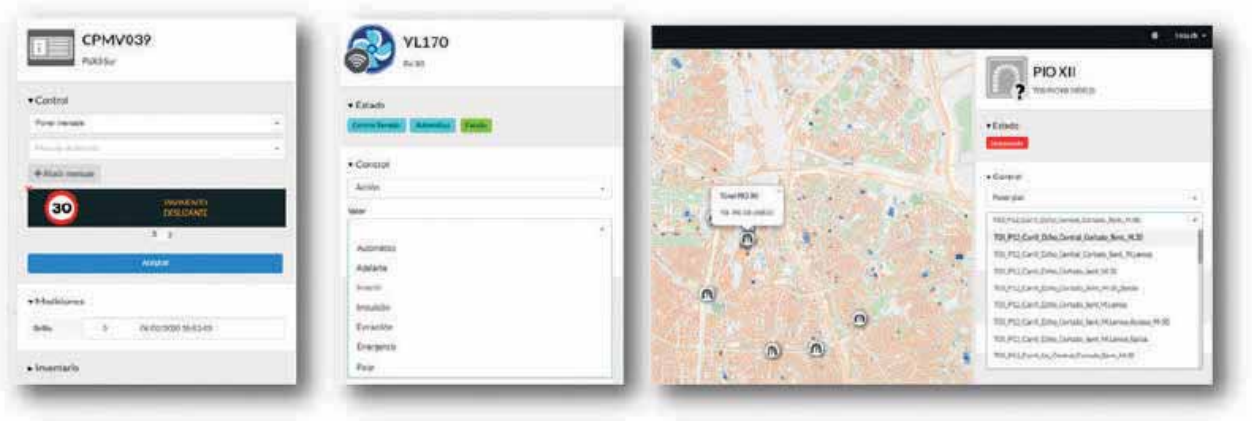


Figura 4. Funcionalidades de actuación sobre los equipos de campo.

Otro ejemplo de actuación, podría ser el envío de un plan de señalización coordinado a todos los paneles de mensaje variable de un grupo de túneles consecutivos, o una consigna uniforme de límite de velocidad, sin tener que ir configurándolo desde cada uno de los scadas que controlan cada uno de los túneles gestionados.

Gestión coordinada de incidentes, alarmas y eventos

La Plataforma permite monitorizar los incidentes, las alarmas y los eventos de todos los sistemas de control de túneles conectados de manera unificada, al ser recibidas a través de la capa de interoperabilidad.

Se concentra toda la información relativa a de alarmas de equipos, cambios de estado, actuaciones de operadores, eventos, incidencias, etc., de manera que a partir del análisis de la información global recibida y monitorizada, la Plataforma realiza el tratamiento de los datos para reconocimiento de patrones y el análisis predictivo de las situaciones identificando potenciales conflictos que puedan evolucionar en incidencias y generar nuevos eventos o actuaciones preventivas.

Figura 5. Gestión de incidentes, alarmas y eventos.

El hecho de disponer de este tipo de información de forma integrada permite evaluar situaciones complejas, tomar decisiones a escala global y organizar los recursos de intervención, por ejemplo en situaciones meteorológicas adversas como niebla que afecte a varios túneles de montaña o lluvias que afecten a pasos inferiores urbanos.

Gestión de Inventario

Otra funcionalidad que contribuye a la gestión de un conjunto de túneles es la gestión integrada del inventario de los equipos de seguridad y control instalados. Tener un conocimiento exacto de todos estos equipos, su ubicación, ciclo de vida, actuaciones planificadas de mantenimiento, reparaciones, etc, optimiza la gestión de la infraestructura.

PLATUN permite representar en la interfaz web de manera georreferenciada y tabulada los datos de inventario recogidos en bases de datos.

Cuadros de mando y análisis de información.

Una funcionalidad que aporta un alto valor al gestor es disponer de una herramienta con la que poder representar y visualizar aquellos datos e indicadores que le permitan tomar las decisiones adecuadas a nivel de gestión y explotación.

La Plataforma incorporar herramientas para generar cuadros de mando en los que representar las variables que se desee, relacionadas con la explotación del servicio de los túneles conectados, con el objetivo de disponer de una o varias vistas globales y representativas sobre el estado de los túneles, de manera que se facilite la gestión y explotación de los mismos.

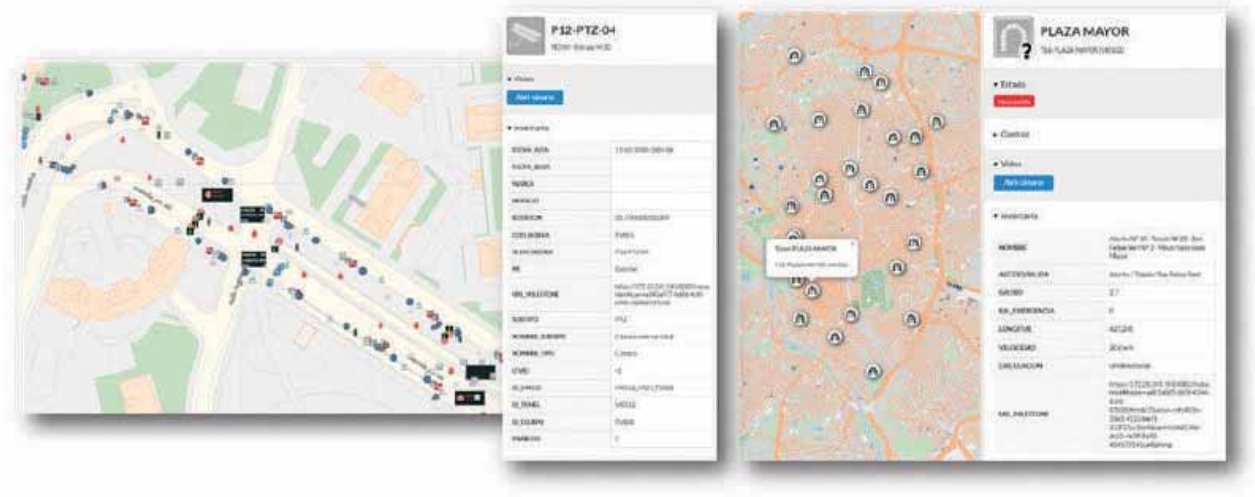


Figura 6. Gestión de inventario georreferenciado.

Figura 7. Cuadros de mando y visualización de indicadores.

Estas herramientas disponen de utilidades para representar la información en distintos formatos: tablas, gráficas de barras, gráficas circulares, evolución de tendencia, valores numéricos, mapas, etc., pudiendo mostrar información de distinto tipo, en tiempo real, o acumulados periódicos, tal y como se ilustra en la figura siguiente.

Esta funcionalidad puede facilitar, por ejemplo, información sobre consumo total de energía del conjunto de los túneles, establecer comparativas e incluso detectar desviaciones o situaciones anómalas en base a los datos representados.

La Plataforma incorpora herramientas de análisis de la información basadas en técnicas Big Data y Machine Learning que permiten identificar situaciones y tendencias, de manera que se pueda reaccionar de manera temprana ante posibles incidencias que se puedan producir. De esta manera, se pueden implementar algoritmos de Inteligencia artificial, permitiendo predicciones a corto y medio plazo de la evolución de las situaciones que se produzcan en la red de túneles.

CASOS DE APLICACIÓN

Por su arquitectura abierta, la plataforma PLATUN se adapta a las condiciones de cualquier conjunto de túneles, y dada su estructura modular, adapta sus funcionalidades al contexto de cada infraestructura.

Seguidamente se van a presentar, de forma resumida, tres instalaciones en las que se ha instalado PLATUN y el alcance que se le ha dado. Se trata de tres escenarios urbanos en Madrid, Barcelona y Valencia, con contextos y aplicaciones diferentes.

Túneles urbanos de Madrid.

En este caso, la plataforma PLATUN está integrado con 29 túneles urbanos de la ciudad de Madrid, siendo la funcionalidad más utilizada la gestión centralizada del inventario de los equipamientos de los túneles administrados por el Ayuntamiento.

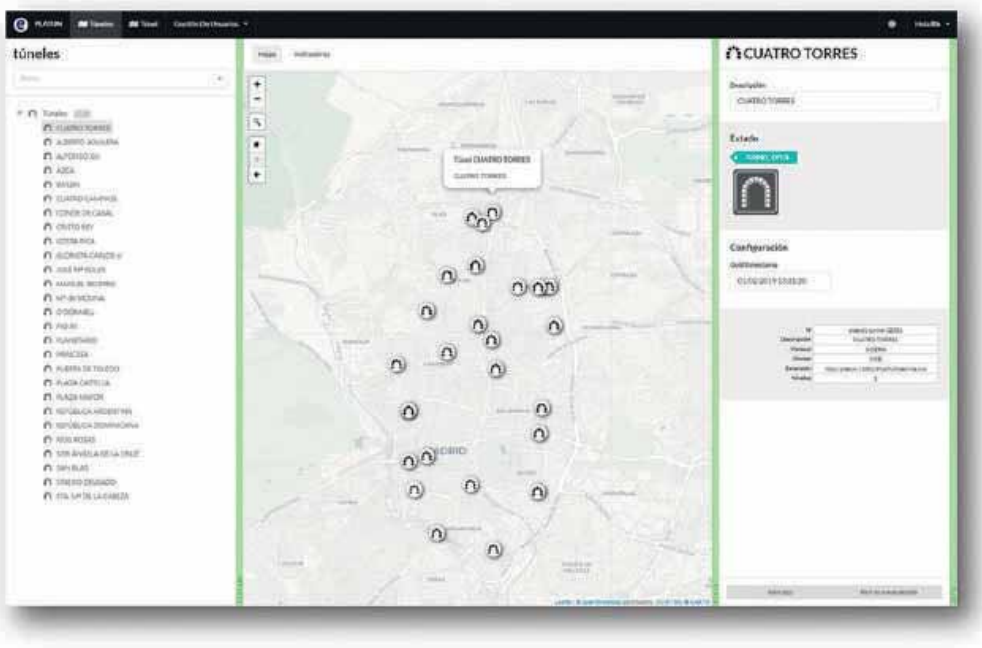


Figura 8. Inventario de túneles urbanos de Madrid.

Túneles urbanos de Valencia.

En el caso de Valencia, PLATUN se ha integrado con el sistema MISTRAL de gestión de movilidad urbana del Ayuntamiento de Valencia, pasando a ser una vertical más en el ecosistema de aplicaciones y servicios de gestión de movilidad de la ciudad.

De esta forma, los operadores del centro de gestión de movilidad, tienen integrada una herramienta desde la que pueden gestionar los túneles de forma individual, pero que a su vez quedan integrados en las estrategias generales de gestión de movilidad de la ciudad.

En el caso de Valencia, esta integración permite, por ejemplo, el tratamiento de las incidencias de los túneles como parte de la gestión de la movilidad estableciendo estrategias homogéneas de actuación sobre elementos del túnel y otros sistemas (regulación de tráfico, señalización dinámica, …).

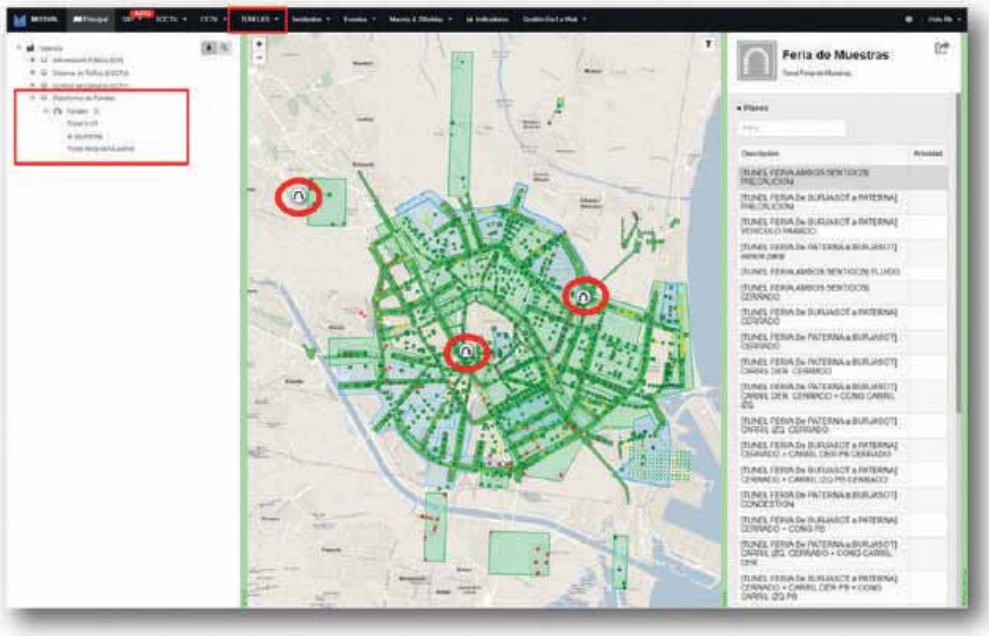


Figura 9. Integración de PLATUN con la plataforma de gestión de movilidad MISTRAL.

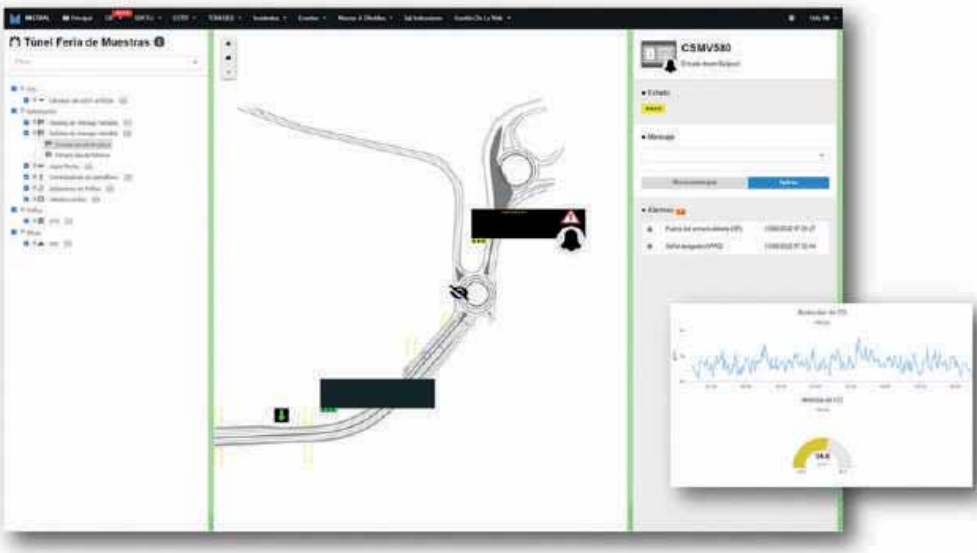


Figura 10. Gestión de un túnel de la red urbana.

Integración del Túnel de las Glorias en la ciudad de Barcelona

En Barcelona, se ha integrado el scada de control del Túnel de las Glorias en la infraestructura de gestión de movilidad de la ciudad. De esta forma, los operadores del Centro de Gestión de Movilidad Urbana disponen, en tiempo real, de datos de tráfico, como el estado de las colas dentro del túnel, pudiendo gestionar la regulación semafórica de acceso y salida del túnel mediante la funcionalidad de gestión de incidencias. Así mismo se dispone, en tiempo real, de la información publicada en los paneles de mensaje variable gestionada por el scada de control de túnel.

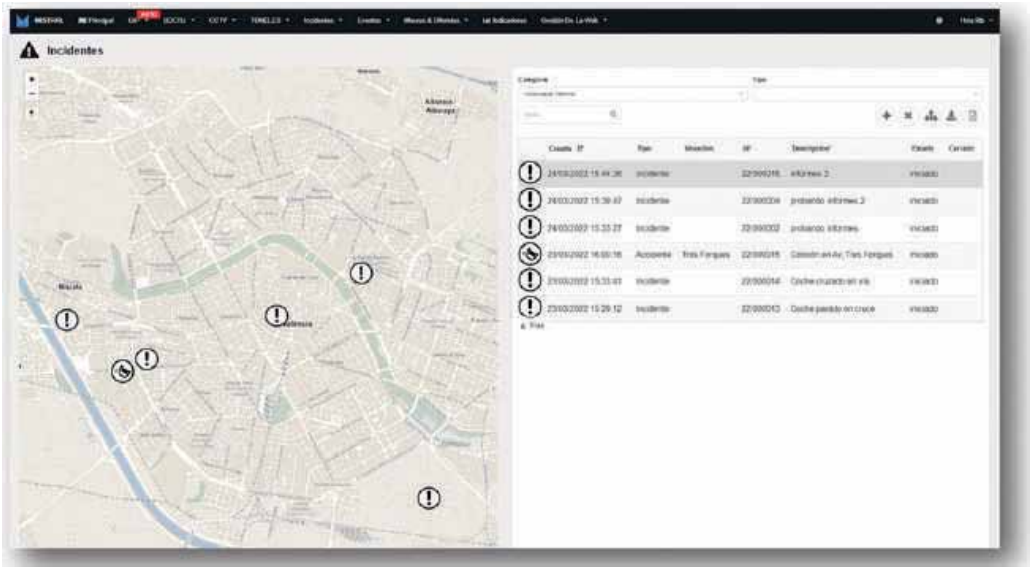


Figura 11. Gestión integrada de incidentes

CONCLUSIONES

La implantación de una Plataforma de gestión integrada aporta una serie de ventajas a la hora de gestionar un conjunto de infraestructuras complejas como una red de túneles:

- Integración de los datos de explotación en plataformas y repositorios abiertos que facilitan la integración con otras plataformas y sistemas de gestión.
- Disponer de una plataforma abierta, escalable, interoperable y neutra que puede evolucionar para gestionar nuevos sistemas de control.
- Al estar desarrollada con tecnologías Open Source, garantiza las prestaciones y robustez de la solución, la evolución tecnológica e interoperabilidad necesaria en este tipo de entornos. La Interoperabilidad con terceros sistemas, tanto para obtener información de los mismos, como para proporcionarles datos útiles relacionados con los túneles, es fundamental para la explotación de estas infraestructuras de manera coordinada con otros sistemas y entidades. La Plataforma permite implementar métodos estándar de intercambio de información para la comunicación con terceros sistemas, como por ejemplo el Sistema de Control de Tráfico o la Plataforma Smartcity de la ciudad.
- La capa de presentación con interfaz web responsive, permite acceder desde cualquier dispositivo (PC, Tablet, Smartphone) mediante un interfaz unificado y amigable a la gestión de todos los túneles, sin necesidad de conectarse a cada interfaz de usuario específico de cada sistema local.
- Los protocolos abiertos estándar para comunicación con sistemas verticales, basados en servicios web, posibilitan la comunicación con cualquier sistema de control que sea necesario gestionar. El sistema proporciona un API REST de integración para la difusión de la información recogida en la Plataforma, incluyendo todos los datos monitorizados por los equipos, sensores y sistemas conectados. Esto proporciona las siguientes ventajas adicionales, por una parte, la independencia del proveedor del sistema de control de los túneles, y por otra, la capacidad de gestionar varios túneles con sistemas de control de proveedores distintos.

- La seguridad en el acceso a los datos, en base a las políticas de seguridad y gestión de perfiles de usuario que incorpora la plataforma.
- El hecho de concentrar información procedente de múltiples fuentes, permite disponer de una gran cantidad de datos que tratados con herramientas de Big Data y analíticas avanzadas ofrecen una información integrada relevante para el gestor, pero también identificar patrones y prever incidencias o situaciones que puedan afectar al correcto mantenimiento o a la operación de las infraestructuras.
- Se trata de una herramienta cooperativa que incorpora un servidor de datos (DDP, Rest HTTP) para la construcción de aplicaciones de terceros y propias.

En resumen, la Plataforma ofrece a los gestores de las infraestructuras de túneles unas herramientas de gestión de alto nivel, complementarias a los sistemas de seguridad y control instalados en los túnel

SISTEMAS INTELIGENTES PARA LA DETECCIÓN DE INFRACCIONES DE TRÁFICO. EJEMPLO DEL TÚNEL DE BIELSA-ARAGNOUET

Andrés Olloqui
Director de Infraestructuras Transfronterizas AECT Pirineos – Pyrénées. Túnel de Bielsa-Aragnouet.

La AECT Pirineos – Pyrénées gestiona este túnel binacional de 3.070 m. entre el Pirineo de Huesca y Hautes-Pyrénées, junto con sus carreteras de acceso a ambos lados de la antigua frontera europea. El túnel original de 1976 fue equipado con modernas instalaciones de seguridad tras sendas obras de remodelación realizadas entre 2010 y 2014. A partir de este momento, el túnel presenta un funcionamiento con tráfico bidireccional con vehículos ligeros, mientras que se gestiona con tráfico unidireccional con presencia de vehículos pesados (camiones, autobuses, caravanas, etc.).

No obstante, a partir del momento en que se empezó a gestionar el túnel con alternancia de ambos modos unidireccional / bidireccional, aumentó el número de infracciones de tráfico, principalmente de vehículos que no respetaban el semáforo rojo ni barrera en los accesos del túnel en el modo unidireccional.

Desde entonces, hemos solicitado y puesto en marcha diversos sistemas inteligentes de gestión del tráfico que han permitido la identificación de las infracciones de circulación, con el fin de penalizarlas y animar al respeto de la señalización, fija y dinámica, de este túnel transfronterizo y sus carreteras de acceso.

A través del presente artículo pretendemos compartir nuestras experiencias y soluciones para atajar las infracciones de tráfico, con sistemas tales como el control fotográfico de semáforo rojo o la detección de matrículas.

INTELLIGENT SYSTEMS FOR THE DETECTION OF TRAFFIC INFRACTIONS. EXAMPLE OF THE BIELSA-ARAGNOUET TUNNEL

The EGTC Pirineos - Pyrénées manages this 3,070 m. binational tunnel between the Pyrenees of Huesca and Hautes-Pyrénées, together with its access roads on both sides of the former European border. The original tunnel from 1976 was equipped with modern security facilities after remodeling works carried out between 2010 and 2014. From this moment on, the tunnel operates with two-way traffic with light vehicles, while it is managed with one-way traffic with presence of heavy vehicles (trucks, buses, caravans, etc.).

However, from the moment when the tunnel began to be managed with alternation of both unidirectional / bidirectional modes, the number of traffic violations increased, mainly of vehicles that did not respect the red traffic light and barrier in the tunnel access during the unidirectional mode.

Since then, we have requested and implemented various intelligent traffic management systems that have enabled the identification of traffic violations, in order to penalize them and encourage respect for the fixed and dynamic signaling of this cross-border tunnel and its access roads.

Throughout this article we intend to share our experiences and solutions to tackle traffic violations, with systems such as photographic control of red traffic lights or license plate

SYSTÈMES INTELLIGENTS POUR LA DÉTECTION DES INFRACTIONS DE LA CIRCULATION. EXEMPLE DU TUNNEL DE BIELSA-ARAGNOUET.

Le GECT Pirineos - Pyrénées gère ce tunnel binational de 3 070 m. entre les Pyrénées de Huesca et des Hautes-Pyrénées, ainsi que ses routes d'accès de part et d'autre de l'ancienne frontière européenne. Le tunnel d'origine de 1976 a été équipé d'installations de sécurité modernes après des travaux de renouvellement réalisés entre 2010 et 2014. À partir de ce moment, le tunnel fonctionne en circulation bidirectionnelle avec des véhicules légers, tandis qu'il est géré en circulation unidirectionnelle en présence de poids-lourds (camions, cars, camping-cars, etc.).

Cependant, à partir du moment où le tunnel a commencé à être géré avec une alternance des deux modes unidirectionnel / bidirectionnel, le nombre d'infractions routières a augmenté, principalement à cause de véhicules ne respectant pas le feu rouge ni la barrière aux accès du tunnel en mode unidirectionnel.

Depuis, nous avons sollicité et mis en place différents systèmes intelligents de gestion du trafic qui ont permis d'identifier les infractions de circulation, afin de les sanctionner et d'encourager le respect de la signalisation, fixe et dynamique, de ce tunnel transfrontalier et de ses routes d'accès.

À travers cet article, nous voulons partager nos expériences et nos solutions pour lutter contre les infractions routières, avec des systèmes tels que le contrôle photographique du feu rouge ou la détection des plaques d'immatriculation.

1. INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA

En toda carretera, existen diversos condicionantes que favorecen o desfavorecen la realización de maniobras contrarias al código de circulación vigente.

En el caso del túnel de Bielsa-Aragnouet, algunos de los condicionantes que favorecen la realización de infracciones son los siguientes:

- Pendiente del túnel del 5%: excesos de velocidad por encima de los 60 km/h. permitidos.
- Funcionamiento basculante entre modo bidireccional y modo unidireccional, en este segundo caso con un acceso del túnel cerrado con semáforo y semibarrera automática: saltos de semáforo y barrera en los accesos, con invasión de línea continua y carril contrario.
- Dificultad para realizar adelantamientos en las carreteras de alta montaña (A-138 y RD-173) previas al túnel: adelantamientos en línea continua en los accesos y en el interior del túnel (único tramo recto prácticamente).
- Prohibición de circulación de camiones de más de 3,5 Tn. de forma general en España en condiciones de necesidad de cadenas de invierno (diferente legislación en Francia): acceso de camiones en condiciones de cadenas obligatorias.
- Prohibición de circulación de camiones de más de 3,5 Tn. por el túnel de 22:00 h. a 6:00 h.: acceso de camiones nocturnos.
- Prohibición de ciertos vehículos en el túnel, tales como ADR, ciclistas y peatones, sin una ruta alternativa cercana (2 h. de desvío aproximado hacia Somport o Vielha): acceso sobre todo de ciclistas en verano.

Asimismo, el hecho de que el túnel se encuentre en una zona rural de alta montaña, de poca intensidad de tráfico en buena parte del año (1.016 vehículos de media diaria), favorece la sensación de pérdida de responsabilidad del infractor.

Por último, al tratarse de un túnel con fuerte uso turístico, entendemos que hay buena parte de conductores que realizan un uso único puntual del túnel, que no favorece el conocimiento de su funcionamiento unidireccional y bidireccional (aun cuando no habría que poner en tela de juicio un semáforo rojo en ningún caso ni en el campo ni en la ciudad).

En definitiva, salvo en el caso del exceso de velocidad, en el resto de infracciones la incidencia conlleva el cierre de ambos accesos del túnel por parte de la operadora, así como la generación de una situación de peligro para los demás usuarios ("la libertad de uno termina donde empieza la del otro").

2. DOS PAÍSES, DOS SOLUCIONES

La gestión del túnel, sus instalaciones y sus protocolos de seguridad es común para toda la longitud del mismo, sin distinción entre el lado español y francés del túnel.

Sin embargo, las diversas soluciones adoptadas para reducir la tasa de infracciones han sido diferentes en cada país, teniendo en cuenta que la capacidad sancionadora no depende del explotador del túnel sino de las

autoridades competentes española y francesa.

De este modo podemos distinguir las siguientes medidas realizadas:

2.1 SOLUCIONES EN TERRITORIO FRANCÉS

a) Excesos de velocidad

Existen dos radares instalados en el tramo francés del túnel:

- Radar de velocidad sentido España a favor de pendiente, situado en un punto intermedio del mismo frente a un apartadero interior del túnel. El límite máximo de velocidad del túnel es de 60 km/h., mientras que la carretera española de acceso limita a 90 km/h. y la francesa a 80 km/h. Este radar de velocidad a favor de la pendiente resulta ser el que más infractores detecta por este motivo.
- Radar de velocidad sentido Francia, situado en la salida del túnel en el lado francés. Al contrario, al venir el vehículo circulando en contrapendiente, las infracciones en este sentido suponen apenas un 10% frente a las del sentido contrario.

b) Control de semáforo rojo

En el año 2017, a instancias del Consorcio del Túnel de Bielsa-Aragnouet (actualmente AECT Pirineos-Pyrénées), la Dirección Departamental de Territorios (DDT) de Altos Pirineos instaló en el acceso de boca norte francés un control fotográfico del semáforo rojo de regulación de dicho acceso, junto con su correspondiente bucle embebido en el asfalto.

Cabe señalar que en Francia no existe la posibilidad de definición de listas VIP (excluidas de la gestión de la infracción, de cara a vehículos de explotación), aunque sí es posible en territorio español. Además, los vehículos de explotación del túnel no pueden en ningún caso eximirse por parte de la autoridad com-

petente de cualquier infracción cometida (rechazo de alegaciones presentadas por parte del gestor público del túnel).

En esta circunstancia, tuvimos que dejar una pequeña zona sin balizar desde el parking de boca norte en caso de tener que acceder con un vehículo de explotación con el túnel cerrado por alguna incidencia.

c) Sirenas de alarma

En el año 2016, a la vista de que puntualmente alguna oveja era capaz de sobrepasar el paso canadiense previo al acceso del túnel, instalamos una sirena en boca norte y boca sur, comandada manualmente desde el centro de control por nuestras operadoras, para ahuyentarlas.

Curiosamente, al cabo de un tiempo las ovejas se habituaron a este sonido de alarma y dejó de perder efectividad para estos animales, si bien sigue resultando útil accionarla para disuadir a diversos infractores humanos cuando la operadora detecta un inicio de infracción. En algunos casos, este sonido consigue que el infractor desista de su peligrosa maniobra en los accesos al túnel.

Finalmente, en 2021 instalamos también una nueva sirena y señal luminosa en el apartadero del túnel para disuadir a algunos usuarios de parar y estacionar en el mismo sin causa de fuerza mayor (retirada de cadenas, descanso, micción, etc.).

2.2 SOLUCIONES EN TERRITORIO ESPAÑOL

a) Denuncias DGT

Cuando en el año 2017 se planteó la instalación de un control fotográfico de semáforo rojo en ambos accesos del túnel, en el lado español la DGT acordó con el gestor del túnel de Bielsa-Aragnouet que, en lugar de instalar un aparato de este estilo, se aprovechara que las cámaras del túnel y sus accesos estaban legalizadas (y debidamente señaladas según la LOPD) para que el gestor del túnel emitiera a la DGT sendas denuncias de infracciones de tráfico acompañadas de las imágenes registradas de la infracción.

De esta forma se tratan diversas infracciones, tales como:

- Salto de semáforo y barrera de acceso de la boca sur española.
- Adelantamientos en línea continua, tanto en el acceso sur como en el interior del túnel.
- Circulación de camiones en el acceso sur en condiciones de cadenas obligatorias.
- Circulación de camiones en horario nocturno prohibido.
- Giro prohibido en la salida del túnel en boca sur.
- Estacionamiento sobre línea continua nada más salir del túnel.

Gracias a los diferentes acuerdos entre países europeos, la gestión de estas infracciones por parte de la DGT llega a cualquier vehículo europeo, si bien la retirada de puntos sólo es efectiva a día de hoy en vehículos de matrícula española.

A nivel legal, tan sólo en una ocasión tuvo lugar un juicio en relación con un infractor del túnel, y el juez aceptó sin problema alguno las grabaciones del túnel como prueba, reafirmándose de este modo la penalidad impuesta al infractor.

b) Detección de matrículas

Cabe señalar la problemática de identificar la matrícula del vehículo infractor. Inicialmente, para poder cursar las denuncias de los infractores en el lado español del túnel y su acceso español, la operadora tenía que realizar en tiempo real un zoom de alguna de las cámaras domo del túnel sobre el vehículo infractor, lo cual no siempre era posible.

Posteriormente, en diciembre de 2020, procedimos a legalizar (DGT y DGA, lado español; Prefectura de Altos Pirineos, lado francés) e instalar un sistema de detección de matrículas dentro del túnel en ambos sentidos, ligados mediante nuestra red de comunicaciones al centro de control del túnel.

La instalación de dichos detectores se realizó en la bóveda del interior del túnel con el fin de mejorar su fiabilidad (96% de detección) y su durabilidad en situaciones meteorológicas adversas (nieve, hielo, niebla, etc.). El coste del material (2 cámaras AXIS), licencias (VAXTOR) y software (Helix 6) ascendió a unos 8.200 € más IVA, aparte de los costes de mano de obra y maquinaria para su instalación, llevados a cabo por el personal de mantenimiento del túnel.

Algunas de las características a destacar de este sistema son:

- Se trata de un sistema basado en un reconocimiento OCR. Detecta matrículas y, en ocasiones también, textos que aparecen en la parte posterior de los vehículos.
- El sistema genera ficheros .csv y almacena (hasta 28 días) las imágenes de las matrículas captadas junto con el día y hora, así como el sentido de la marcha del vehículo.
- Para mejorar su capacidad de detección, priorizamos la detección de matrículas españolas y francesas sobre otras nacionalidades. En cualquier caso, el sistema puede clasificar hasta 10 tipos de países.
- En el sistema adquirido, incluimos la opción de detección de vehículos ADR (prohibidos a priori en el interior del túnel), ligado a una ventana emergente y una señal sonora de alerta para la operadora, de manera que pudiera activar el protocolo de presencia de materia peligrosa (cierre de túnel, ventilación y aviso a fuerzas del orden). Tras realizar pruebas con matrículas falsas de ADR, el sistema se encuentra plenamente funcional, si bien curiosamente al principio confundía matrículas suizas como ADR (por suerte poco frecuentes en nuestro túnel), error que pudo ser subsanado.

c) Sirenas de alarma

Paralelamente a la instalación de la sirena de alarma de boca norte, se instaló la sirena de alarma de boca sur del túnel, accionada manualmente del mismo modo por nuestra operadora del centro de control.

A día de hoy, esta sirena supone un método con resultados razonables para disuadir a un infractor de cada cinco, aproximadamente.

2.3 SEÑALIZACIÓN DE AVISO

a) Señalización vertical

Aparte de las preceptivas señales P3 de peligro por la proximidad de un tramo con la circulación regulada por semáforos, y P31 de posible congestión en los accesos al túnel (debido al funcionamiento unidireccional con presencia de vehículos pesados), disponemos de las siguientes señales relacionadas con los sistemas de infracción antes descritos:

Aviso de zona videovigilada

Uso del modelo español amarillo en la carretera de acceso sur al túnel y en el centro de control español, así como del modelo francés azul en el acceso norte del túnel y en el centro de control secundario francés.

Aviso de control de semáforo rojo

Se realiza un aviso del control de semáforo rojo unos 30 m. antes del control de barrera y semáforo en ambos accesos del túnel: lado francés (control automático de semáforo rojo) y lado español (control de infracciones a través de cámaras con la DGT).

Aviso de radar de velocidad

Según la normativa francesa, el radar debe estar avisado mediante señalización vertical con una antelación mínima de 500 m. con respecto a la posición del radar.

b) Información dinámica en PMVs

Asimismo, en ciertos momentos del año se realizan campañas de información en dos PMVs que gestionamos, a 5 km. del túnel en el lado español y a 6 km. del túnel en el lado francés, para informar al usuario de que se trata de una zona bajo videovigilancia.

En definitiva, pretendemos transmitir al usuario, tanto para ayudarle en caso de incidente como para conminarle al mayor respeto por las normas de tráfico, que la zona de acceso al túnel se encuentra bajo videovigilancia.

3. RESULTADO DE LAS MEDIDAS ADOPTADAS

Tras todo lo expuesto, nos deberíamos preguntar si la imposición de infracciones tiene como consecuencia la mejora de la seguridad vial de la carretera, y en concreto de nuestro túnel carretero de Bielsa-Aragnouet.

Para ello, entremos en primer lugar a analizar las estadísticas de infracciones detectadas en los últimos años.

Véase en valor absoluto:

Año	Nº denuncias DGT	Nº exceso velocidad radares	Nº saltos radar semáforo BN	Nº infractores total	Nº vehículos total por túnel
2016	11	3.014	0	3.025	355.122
2017	84	2.742	93	2.919	359.564
2018	50	2.271	403	2.724	370.939
2019	79	2.503	8	2.590	370.836
2020	34	3.346	126	3.506	224.527
2021	67	3.924	44	4.035	223.035
TOTAL 2016-2021	325	17.800	674	18.799	1.904.023

O en valor relativo:

Año	% infractores DGT	% infractores radares	% infractores radar semáforo	% infractores TOTAL
2016	0,003%	0,849%	0,000%	0,852%
2017	0,023%	0,763%	0,026%	0,812%
2018	0,013%	0,612%	0,109%	0,734%
2019	0,021%	0,675%	0,002%	0,698%
2020	0,015%	1,490%	0,056%	1,562%
2021	0,030%	1,759%	0,020%	1,809%
TOTAL 2016-2021	0,017%	0,935%	0,035%	0,987%

Habríamos deseado presentar una tendencia clara de descenso de las infracciones año tras año; no obstante, el análisis de estos datos resulta algo más complejo, teniendo en cuenta algunas cuestiones como las siguiente:

- La gestión de infracciones con la DGT se inició en julio de 2016 sólo con matrículas españolas, incorporándose al sistema las matrículas francesas y de otras nacionalidades a partir de marzo de 2017.
- La sanción de la infracción de ciertos camiones por circular en condiciones de cadenas obligatorias se incorporó en diciembre de 2017.
- Durante el ejercicio 2019 hubo diversos problemas técnicos con el control de semáforo rojo francés.
- La instalación del sistema de detección de matrículas en diciembre de 2020 ha permitido identificar a la casi totalidad de infractores de cara a la DGT.

- Nuevas restricciones de circulación en el túnel, tales como la prohibición de camiones de 22 a 6 h. desde noviembre de 2020, o el cierre nocturno a todo vehículo (decreto temporal francés por seguridad nacional) desde enero de 2021, han aumentado el número de infracciones por estos motivos.

De la misma manera, hay que considerar que, tal como hemos comentado anteriormente, el túnel Bielsa-Aragnouet tiene un fuerte uso turístico, por lo que buena parte de los conductores realizan un uso único puntual del túnel. Creemos que la imposición de infracciones favorece que en un periodo de tiempo razonable (¿2 años mínimo?) el conductor infractor no reproduzca su comportamiento en vías públicas. De cierta manera se alecciona al conductor imprudente, si bien, al ser un túnel marcadamente turístico, el conductor aplica su carácter reformado post-infracción en otras vías.

En cualquier caso, resulta llamativo comprobar que en los 6 años de análisis de las infracciones del túnel de Bielsa-Aragnouet, apenas 4 vehículos han sido reincidentes entre las 325 denuncias de la DGT (1,2 %), por lo que creemos que al menos la población transfronteriza pirenaica ha aprendido a respetar las normas de circulación del túnel.

Para finalizar, a modo estadístico e informativo, exponemos una tabla resumen de infracciones gestionadas con la DGT entre 2016 y 2021, organizadas por tipología de infracción y nacionalidad del vehículo:

Tipo de infracción	FRANCIA	ESPAÑA	ALEMANIA	RUMANÍA	POLONIA	AUSTRIA	GRAN BRETAÑA	OTROS	TOTAL	
Adelantamiento en línea continua	69	45	10	7		3	1	7	142	44%
Salto semáforo rojo	43	27	1	1	2		1	2	77	24%
Camiones con cadenas obligatorias	3	32		1	1			3	40	12%
Giro prohibido desde parking sur al túnel	13	13							26	8%
Otros	17	15			1		1	6	40	12%
Total	145	132	11	9	4	3	3	18	325	
	45%	41%	3%	3%	1%	1%	1%	6%		

STRATEGY-LED INVESTMENT IN TUNNEL POSITIONING AND WAYFINDING ITS TECHNOLOGIES

Hossein Parsa
Principal ITS Strategy and Innovation Lead, Transurban, Australia

Road tunnel operators deploy ITS and supporting technologies to provide reliable and safe trip for the motorist. Examples are Radio-break-in, Public Address (PA), Tunnel Incident Management Signage, Lane Use Management Systems (LUMS), surveillance and detection technologies, cellular networks and positioning services.

With the advent of Connected, Automated and Zero Emission Vehicles (CAVs and ZEVs) and supporting C-ITS infrastructure, the ITS technologies and processes are transforming drastically. In such future, motorists are gradually becoming CAV passengers rather than vehicle drivers and road operators necessitate to target and communicate with machines rather than human beings.

At the same time, road occupants are increasingly becoming users and contributors of cooperative transport system through their personal devices and connected vehicle technologies. They create transport data and consume them. These on-board technologies together with the demand from motorists, provides opportunity for personalisation of the transport services such as personalised traffic messages as well as targeted behavioural changes for network optimisation. Example of the latter is the speed harmonisation.

This article will explore the evolutions of ITS technologies to enable the safe and reliable operation of new generation of vehicles in the road tunnel environment both in the mid-term where the CAVs/ZEVs are sharing the road tunnel infrastructure with other cars and in the future where CAVs/ZEVs are the dominant vehicle types.

The article discusses the technology, social and market evolutions which are fuelled by CAVs/ZEVs and will portray how the ITS will shift in the light of these evolutions.

Examples such as digital twins and digital infrastructure - in leu of physical signage - or the use of machine-readable emergency messages - in leu of radio-break-in and PA audio messages – will be provided.

The article demonstrates the end state technology roadmaps and the evolution of current technologies to future state technologies.

INVERSIÓN ESTRATÉGICA EN TECNOLOGÍAS ITS DE POSICIONAMIENTO Y SEÑALIZACIÓN DE TÚNELES

Los operadores de túneles de carretera implementan Sistemas Inteligentes de Tráfico (ITS por sus siglas en ingles) y tecnologías de apoyo para proporcionar viajes confiables y seguros para el automovilista. Algunos ejemplos son Sistemas de Interrupción de Radio, Sistemas de megafonía (PA por sus siglas en ingles), Sistemas de gestión de carriles (LUMS por sus siglas en ingles), tecnologías de vigilancia y detección, redes celulares y servicios de posicionamiento. Con la llegada de los vehículos automatizado-conectados y vehículos de cero emisiones (CAV y ZEV por sus siglas en Ingles) y la infraestructura C-ITS de apoyo, las tecnologías y los procesos de ITS se están transformando drásticamente. En ese futuro, los automovilistas se están convirtiendo gradualmente en pasajeros de CAV en lugar de conductores de vehículos. Por su parte, los operadores de carreteras deben apuntar y comunicarse con máquinas en lugar de seres humanos.
Al mismo tiempo, los ocupantes de las carreteras se están convirtiendo cada vez más en usuarios y contribuyentes del sistema de transporte cooperativo a través de sus dispositivos personales y tecnologías de vehículos conectados. Crean datos de transporte y los consumen. Estas tecnologías a bordo, junto con la demanda de los automovilistas, brindan la oportunidad de personalizar los servicios de transporte, como mensajes de tráfico personalizados, así como cambios de comportamiento específicos para la optimización de la red. Ejemplo de esto último es la armonización de velocidades.
Este artículo explorará la evolución de las tecnologías ITS para permitir la operación segura y confiable de la nueva generación de vehículos en el entorno del túnel de carretera, tanto a mediano plazo, donde los CAV/ZEV comparten la infraestructura del túnel de carretera con otros automóviles, como en el futuro donde los CAV/ZEV son los tipos de vehículos dominantes.
El artículo analiza las evoluciones tecnológicas, sociales y de mercado que son impulsadas por CAV/ZEV y describirá cómo ITS cambiará a la luz de estas evoluciones.
Se proporcionarán ejemplos como gemelos digitales y infraestructura digital, en lugar de la señalización física, o el uso de mensajes de emergencia legibles por máquina, en lugar de la interrupción de radio y los mensajes de audio en megafonía.
El artículo demuestra las hojas de ruta de tecnologías hacia su estado final y la evolución de las tecnologías actuales a un estado futuro.

INVESTISSEMENT STRATÉGIQUE DANS LES TECHNOLOGIES STI DE POSITIONNEMENT ET D'ORIENTATION DANS LES TUNNELS

Les opérateurs de tunnels routiers déploient des Systèmes de Transport Intelligents (STI) et des technologies de soutien pour offrir un trajet fiable et sûr à l'automobiliste. Les exemples sont Radio-Break-In, les systèmes de sonorisation, la signalisation de gestion des incidents dans les tunnels, les systèmes de gestion de l'utilisation des voies, les technologies de surveillance et de détection, les réseaux cellulaires et les services de positionnement.
Avec l'avènement des véhicules connectés, autonomes et à zéro émission (VCA et VZE) et de l'infrastructure de soutien STI-C (Systèmes de Transports Intelligents Coopératifs), les technologies et processus STI se transforment radicalement. Dans un tel avenir, les automobilistes deviennent progressivement des passagers de véhicules connectes et autonomes (VCA) plutôt que des conducteurs de véhicules et les opérateurs routiers doivent cibler et communiquer avec des machines plutôt qu'avec des êtres humains.
Dans le même temps, les usagers de la route deviennent de plus en plus des utilisateurs et des contributeurs du système de transport coopératif via leurs appareils mobiles personnels et les technologies des véhicules connectés. Ils créent des données de transport et les consomment. Ces technologies embarquées, associées à la demande des automobilistes, offrent des opportunités de personnalisation des services de transport tels que des messages de trafic personnalisés ainsi que des changements de comportement ciblés pour l'optimisation du réseau. L'harmonisation de la vitesse en est un exemple.
Cet article explorera les évolutions des technologies STI pour permettre l'exploitation sûre et fiable de la nouvelle génération de véhicules dans l'environnement des tunnels routiers à la fois à moyen terme où les VCA/VZE partagent l'infrastructure du tunnel routier avec d'autres voitures et à l'avenir où les VCA/VZE sont les catégories de véhicules dominants.
L'article traite des évolutions technologiques, sociales et de marché qui sont alimentées par les VCA/VZE et décrira comment les STI évolueront à la lumière de ces évolutions.
Des exemples tels que les jumeaux numériques et l'infrastructure numérique en remplacement de signalisation physique, ou l'utilisation de messages d'urgence lisibles par ordinateur à la place de messages radio et de messages audio de sonorisation, seront présentés.
L'article décrit les feuilles de route des technologies du futur et l'évolution des technologies actuelles vers les technologies du futur.

BACKGROUND

1. Transurban is Australia's largest privately owned toll road developer, owner, operator, and is one of the largest pure-play toll road businesses in the world.
2. Transurban operates in five markets across Australia and North America, with interests in 21 operational toll roads and a significant pipeline in development and delivery.
3. Transurban operates or is developing over 15 tunnel roads across its markets. Transurban operate some of the world's most complex road tunnel systems with WestConnex tunnels in Sydney ultimately being around 26km length in length and having over 20 exit/entry decision points. Figure 1 illustrates the Transurban's roads and tunnels in Sydney, Australia.
4. Every day, more than 2 million trips are made on Transurban roads. Technology and data help Transurban to make every one of these 2 million+ trips as safe and efficient as possible.
5. Particularly, in line with government and industry specifications, Transurban deploys ITS and supporting technologies to provide reliable and safe trip for the motorist. Examples are Radio Rebroadcast Break-in (RRB), Public Address (PA), Tunnel Information Signage (TIS), Variable Speed Limit Signage (VSLS), Lane Use Signage (LUS), Motorway Emergency Telephone System (METS), surveillance and detection technologies, cellular networks, and positioning services.
6. Some of the technologies such as LUS, METS and detection technologies are common across open and tunnel roads. Others are specific to the tunnel environments. This include RRB, PA and TIS.

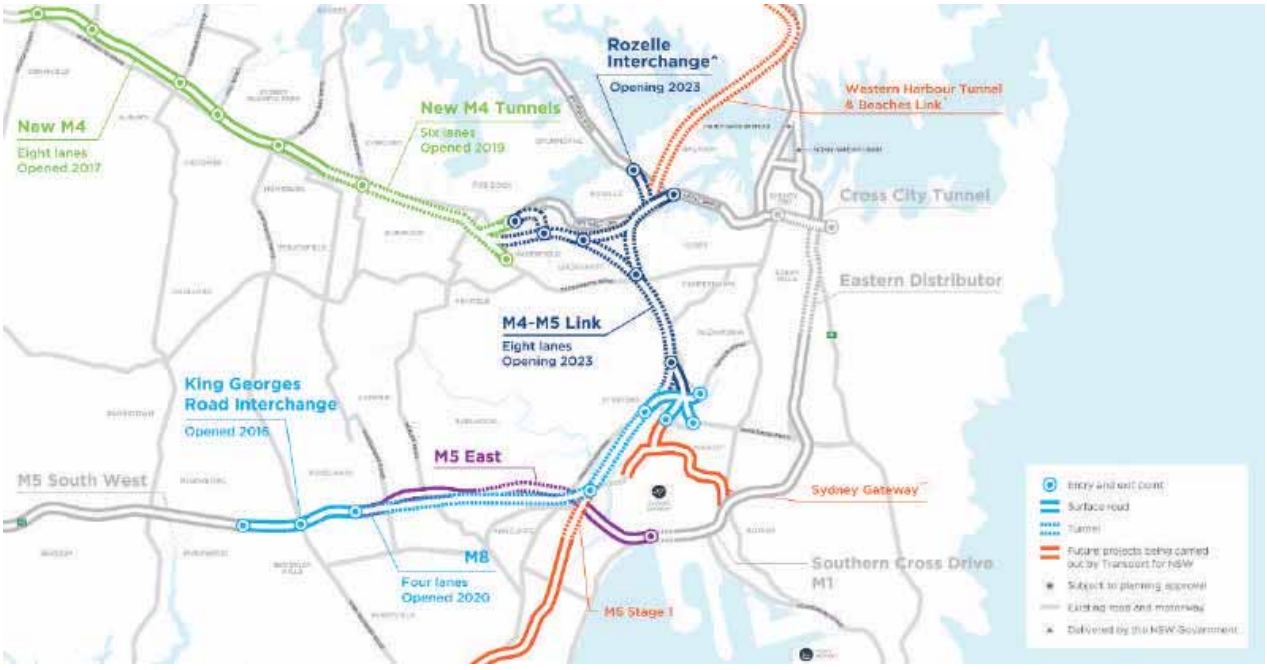


Figure 1 – Transurban roads in Sydney, Australia

7. These technologies have been devised to support several road operations functions. Emergency management, incident response, traffic control and regulation; and road user experience are some of these functions. There are also mechanical and electrical technologies such as egress signage and deluge systems that are deployed to provide a safer tunnel. Table 1 outlines the functions and some of the main supporting tunnel technologies.

Table 1 – Road operator functions and supporting technology in the road tunnels

Function	Tunnel Technology
Emergency management and road user communication	RRB, PA, TMS, METS, TIS, VMS, Evacuation egress signage, Deluge system, lighting
Traffic control and regulation	LUS, VSLS, VMS, Surveillance and detection (CCTV Camera, Automatic Incident Detection System, Infrared - e.g. TIRTL, Freeway Data Stations)
Driver-assist and customer experience amenities	Cellular network, Wayfinding and positioning technologies

8. With the advent of Connected, Automated and Zero Emission Vehicles (CAVs and ZEVs) and supporting C-ITS infrastructure, the ITS technologies and processes are transforming drastically. These vehicles need different roadside technologies, communication infrastructure and data to operate safely and effectively. As an example, CAVs don't need to be guided through PA or RRB for emergency situations and instead digital data can perform similar function.
9. These vehicles together with the roadside infrastructure and communication networks are new powerhouse of road and traffic data which can power the road operations and can assist and further - in the future - replace the need for roadside surveillance and detection technologies.
10. Motorists' behaviour and choices are also changing significantly. These new customer demand patterns also make some of the tunnel technologies less relevant. An example is the drive-time listenership which is shifting drastically towards online-listenership and makes RRB less preferable choice for the emergency road user communication.
11. Emerging technologies are also deployed for Transurban to operate safer tunnels and for motorists to have a better customer experience. In tunnels environment, the lack of coverage of widely used positioning technologies, contribute to higher cognitive load, driver stress levels and confusion leading to safety incidents, congestion, and negative customer experience. In response to this challenge, Transurban has deployed tunnel wayfinding and navigation systems in several tunnels.
12. Transurban collects and analyses wide range of data and monitors the technology, societal, and policy trends to improve its roads and ensure it continue to support the cities as they evolve over time.

MARKET TRENDS

13. From Transurban viewpoint – as a road operator – industry forces continue to be driven by technology, social and policy industry shifts.

14. These forces mainly shaped by how the motorists demands and how their behaviours are shifting. This is also supported by technology changes including the advent of the CAVs. The dominant customer has been an "Informed Driver" who is getting information from the road signage, and audio-visual channels such as PA and radio and make decisions. While, currently, the customer is shifting towards "Assisted Driver" where lots of vehicle functions supported by vehicle-generated or third party-provided information decreasing the cognitive load of the driving and removing some of the driving tasks. In the future, the dominant consumer will be the vehicle itself.

15. From a tunnel technology perspective there are major shifts in three areas:

    a. End consumers currently being motorists are shifting towards connected, automated and zero emission vehicles.

    b. Physical and communication infrastructures have been provided to support operation and two-way communication between roadside technology and control centres. This is shifting to support C-ITS. CAVs - through their sensors - are complimenting the road event detection data required for road operations. Will prevalence of CAVs in the future the need for surveillance and detection technologies will be decreasing. Example of these developments is the BMW, MobileEye and HereTechnologies partnership to create live map of the roads using care sensor data (reference here).

    c. Digital infrastructure such as real-time data exchanges services and digital twins are complimenting and, in some areas, will be replacing the roadside technologies. Advisory signage such as Variable Message Signs are examples of roadside technologies which can be replaced with digital twins. Figure 2 below demonstrates the three customers and evolutions of road user communication technologies is response to these transformations.

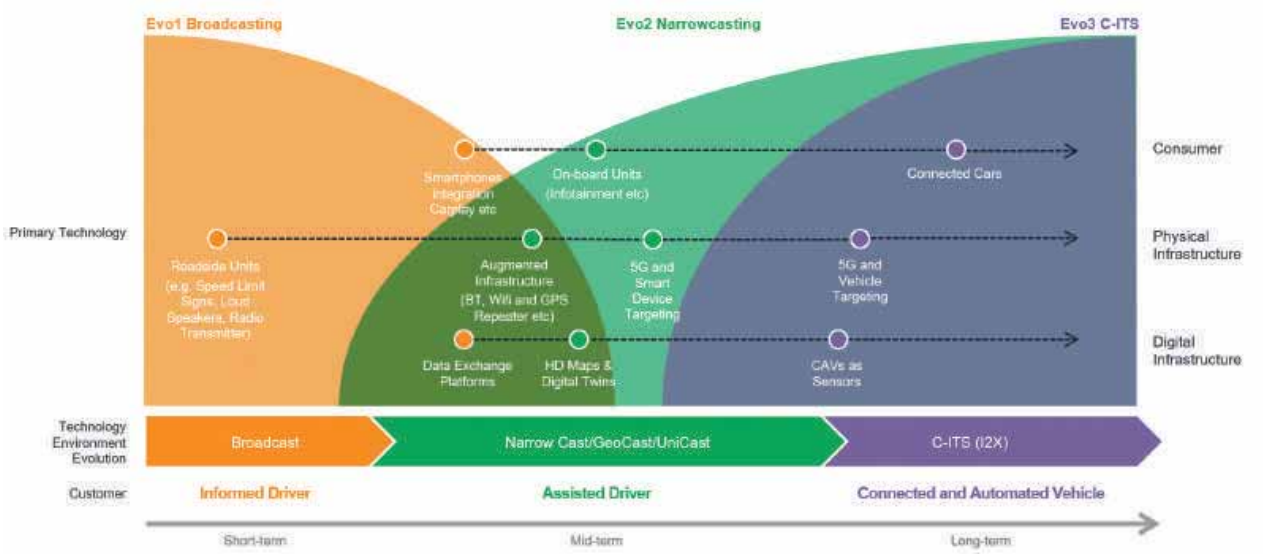


Figure 2 – Road user communication technologie evolutions

16. The following table (Table 2) tries to predict the way different tunnel technologies need to transform to be able to address the demands and challenges of the future.

Table 2 – Examples of today and future tunnel technologies

Function in the tunnel	Technology Today	Future*
Traffic control through speed data, traffic condition notifications and lane use management signs etc.	Roadside electronic and static signage	Virtual signs communicated directly to the vehicle fuelled by digital twins and live maps
Emergency guidance and communications	RRB, PA, TMS	Digital messages communicated to the vehicles
Surveillance and detection	CCTV Camera, Automatic Incident Detection System, Infrared - e.g. TIRTL, Freeway Data Stations	Crowdsourced through car sensors such computer vision, lidar and radar etc.
Wayfinding and navigation	Mix of static signage and roadside technologies	Computer vision augmented with technologies such as live digital twins, Simultaneous Localisation and Mapping Technologies (SLAM), visual cues (to guide SLAM) and GNSS tunnel repeaters
Fire management in case of tunnel fires	Deluge system	Additional need for catering for electrical battery vehicles and hydrogen-fuelled vehicles
* There are going to be exceptions and need for co-existence of today and future technologies in the mid-term and in special circumstances		

STRATEGIC RESPONSE

17. In response to the market trends and industry forces, Transurban has devised multiple initiatives:

    a. Supporting and partnering with the asset management, asset operation and technology engineering teams, an innovation and ITS strategy team is tasked to conduct market trends analysis and develop technology roadmaps.

    b. Together with industry partners, an innovation agenda and program of work is developed to ideate, plan and trial the new technologies and understand risks, costs, and feasibility of the new technologies and create relevant IP.

    c. The outputs of above two initiatives forms the asset lifecycle management investments and strategic projects to future-prove the ITS, roadside and associated technologies.

VEHÍCULOS CONECTADOS Y AUTÓNOMOS A TRAVÉS DE LOS TÚNELES DE CARRETERA

Iván Ricondo Zaldívar
Gerente túneles viarios en TEKIA Ingenieros S.A.

En el Simposio nacional de túneles de Barcelona del año 2018, esta empresa ya presentó su visión de la circulación de los Vehículos Autónomos y Conectados (VAC) a través de los túneles viarios con objeto de analizar la repercusión que pudiera tener en la explotación de los túneles en el futuro, siendo una novedad entonces.

Ahora se considera una realidad más próxima y todas las Administraciones de carreteras preparan en mayor o menor medida la adecuación de carreteras y túneles a la circulación de estos vehículos.

Esta comunicación pretende actualizar la información sobre la evolución del VAC en estos últimos cuatro años (2018-2022), con un enfoque más orientado hacia las necesidades de conservación y mantenimiento de las infraestructuras e instalaciones existentes en los túneles de carretera, que permitan a las Administraciones y Gestores de túneles prepararse y adaptarse de mejor forma a esta realidad para aprovechar toda la mejora potencial que los VAC ofrecen en materia de seguridad.

CONNECTED AND AUTONOMOUS VEHICLES THROUGH ROAD TUNNELS

At the 2018 Spain National Tunnel Symposium, this company already presented its vision of the circulation of Automated and Connected Vehicles (ACV) through road tunnels in order to analyze the repercussion that it could have on the operation of tunnels in the future, being a novelty then.

Now it is considered a closer reality and all Road Administrations prepare to the adaptation of roads and tunnels to the circulation of these vehicles.

This communication aims to update the information on the evolution of the ACV in these last four years (2018-2022), with a focus more oriented towards the needs of maintenance of the existing infrastructures and facilities in the road tunnels, which allow the Tunnel Administrations and Managers better prepare and adapt to this reality in order to take advantage of all the potential improvement that ACVs offer in terms of safety.

VÉHICULES CONNECTÉS ET AUTONOMES DANS LES TUNNELS ROUTIERS

Lors du Symposium National des Tunnels de Barcelone 2018, cette entreprise avait déjà présenté sa vision de la circulation des Véhicules Autonomes et Connectés (VAC) dans les tunnels routiers afin d'analyser la répercussion que cela pourrait avoir sur l'exploitation des tunnels à l'avenir, étant donc une nouveauté.

Elle est désormaisconsidérée comme une réalité plus proche et toutes les Administrations routières préparent plus ou moins l'adaptation des routes et des tunnels à la circulation de ces véhicules.

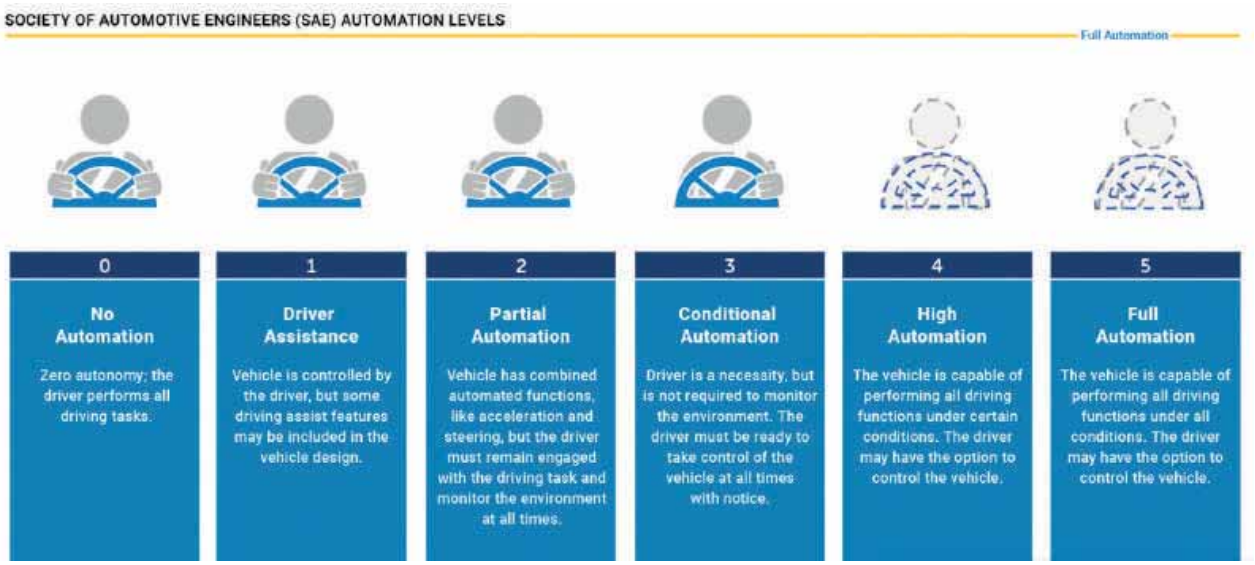
Cette communication vise à mettre à jour les informations sur l'évolution du VAC au cours de ces quatre dernières années (2018-2022), avec un accent plus orienté vers les besoins de conservation et d'entretien des infrastructures et équipements existants dans les tunnels routiers, qui permettra aux Administrations et aux Gestionnaires de Tunnels de mieux se préparer et de s'adapter à cette réalité afin de profiter de toute l'amélioration potentielle qu'offrent les VAC en termes de sécurité.

1. SITUACIÓN DEL VEHÍCULO AUTÓNOMO, CONECTADO Y ELÉCTRICO

1.1 Vehículo autónomo

A fecha de redacción del presente artículo, la evolución en la automatización de la conducción de vehículos sigue su proceso, si bien el aumento en los niveles de automatización es más lento del inicialmente previsto por los fabricantes de vehículos, tanto por cuestiones técnicas como por aspectos normativos y de regulación.

La siguiente imagen recuerda los niveles de automatización en la conducción definidos por la Sociedad de Ingenieros Automotrices y aceptados internacionalmente, con una breve explicación posterior.



Niveles de autonomía. Fuente SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices)

0) Nivel 0: el coche no tiene ningún sistema automatizado que le permita tomar el control, sólo puede tener sistemas que emitan alguna advertencia.

1) Nivel 1: en este nivel los coches incluyen sistemas como el control de crucero (cruise control) o la tecnología para mantener el coche en el carril (lane control).

2) Nivel 2: vehículo semiautónomo. El conductor debe permanecer en alerta por si en algún momento tiene que tomar el control del coche ya que éste puede no responder adecuadamente y es obligatorio que el sistema se desactive cuando el conductor tome el control.

3) Nivel 3: los vehículos pueden circular de forma autónoma en entornos controlados como autopistas o autovías.

4) Nivel 4: los coches autónomos pueden circular sin supervisión del conductor en áreas acotadas donde el coche tenga suficiente información para no depender del conductor.

5) Nivel 5: la conducción autónoma en este nivel es completa. Puede circular por cualquier carretera o ciudad siempre y cuando sea legal la conducción autónoma.

En el año 2018 varios fabricantes de vehículos ligeros como Volvo, Ford y BMW apuntaban a la disponibilidad en el mercado de vehículos nivel 4 y 5 para el año 2021.

Objetivos 2018 de vehículos ligeros y proyectos autónomos

La realidad es que a fecha de mayo de 2022 estos objetivos de autonomía no se han cumplido. El Tesla model S y su software autopilot sigue estando en nivel 2. Como modelo más avanzado de automatización a nivel comercial podemos citar el Mercedes clase S con el sistema de conducción Drive Pilot basado en sensor Lidar, y certificado para nivel 3 por la Autoridad Federal alemana de transporte por carretera, que está disponible en el mercado a partir del 17 de mayo de 2022, y con el que se puede circular sin supervisión del conductor en vías seleccionadas (sin semáforos, obras de conservación o rotondas) y a una velocidad máxima 60 km/h.

Mercedes clase S Drive Pilot (nivel 3)

En el transporte de mercancías se han realizado pruebas con tráfico de pelotones (platoon, car following) de camiones semiautónomos, así como proyectos de camiones autónomos que serán realidad antes o después.

El potencial de seguridad que pueden proporcionar estos vehículos sigue siendo muy elevado, dado que en conducción autónoma evitarían los accidentes asociados al factor humano, presente en el 90% de los accidentes según las estadísticas.

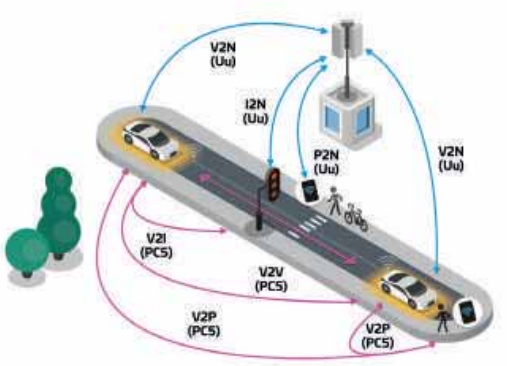
1.2 Vehículo conectado

Dentro de los ITS, los sistemas cooperativos son aquellos que se basan en las comunicaciones e intercambio de información entre vehículos (V2V) o entre vehículos e infraestructura (V2I), vehículos con centros de control o redes (V2N) y con personas (V2P). Los sistemas cooperativos soportarán aplicaciones y servicios para mejorar la seguridad, eficiencia, confort y el impacto medioambiental del transporte mediante el intercambio entre vehículos, infraestructura y centros de control.

Las tecnologías de comunicación cooperativas han ido evolucionando desde dos planteamientos diferentes.

Por un lado, las tecnologías de comunicaciones de corto alcance, denominada en Estados Unidos como DSRC (Dedicated Short Range Communications) y se ha desarrollado en base al estándar IEEE 802.11p-2010, y en Europa se define como ITS-G5, basada en el estándar IEEE 802.11-2012 y IEEE Std 802.2. En ambos casos se especifica las normas de funcionamiento de una red de área local inalámbrica (WLAN) especialmente adaptada para comunicación de vehículos, que ofrece una baja latencia en las comunicaciones, aspecto necesario para aplicaciones de seguridad.

Por otro lado, la segunda tecnología de comunicación vehicular es la denominada C-V2X (Cellular-V2X), basada en los estándares de telefonía móvil LTE y 5G definidos por el grupo 3GPP. C-V2X cuenta con la gran ventaja de disponer de una infraestructura ya existente en el caso de LTE y del actual despliegue a gran escala que está realizando para 5G. En cuanto a prestaciones, esta tecnología ofrece un mayor rango de cobertura, pero una latencia mayor en escenarios de alta congestión.



Dentro de la misma tecnología cabe diferenciar las comunicaciones directas (PC5) V2V/V2I/V2P, y las comunicación de red (Uu) V2N/I2N//P2N independientes de la red de telefonía.

Los fabricantes de vehículos se encuentran en la disyuntiva de tener que decantarse por una u otra solución tecnológica. Por ejemplo, Volkswagen apostó por ITS-G5 desde el principio. Toyota y General Motors lanzaron coches con DSRC, si bien a día de hoy no tienen un posicionamiento claro. Otros fabricantes como BMW, Daimler, Ford y Stellantis (FCA y grupo PSA) se inclinan por C-V2X.

Posicionamiento de algunos fabricantes de vehículos sobre los tipos de tecnología de comunicación cooperativa

IDesde el ámbito del túnel, nos centraremos en las comunicaciones que implican a la infraestructura (V2I e I2N) así como las comunicaciones directas entre vehículo y centro de control (V2N), habida cuenta que la mayor parte de túneles dispone de un local de control en el cual se centraliza la información.

1.3 Vehículo eléctrico

La electrificación en las motorizaciones de vehículos sigue su ascenso mundial de acuerdo a las políticas comunitarias de sostenibilidad y reducción de emisiones. En el caso de España, en de las nuevas matriculaciones de vehículos ya son con motores totalmente eléctricos o híbridos en el año 2021 se matricularon unos 70.000 vehículos eléctricos y enchufables, y se prevé un aumento progresivo hasta el año 2050, año a partir del cual quedarán prohibidas las nuevas matriculaciones de vehículos con motores de combustión. Este hecho tiene varias implicaciones sobre la gestión de los túneles carreteros.

2. ENSAYOS DE VEHÍCULOS CONECTADOS EN TÚNELES

Son numerosas las experiencias ya realizadas de vehículo conectado si bien el escenario generalmente establecido es carretera a cielo abierto. En túneles dichas experiencias son más limitadas, a continuación se citan y describen algunas de las mismas.

2.1 Túnel de Cereixal (A-6, Galicia)

El túnel de Cereixal se encuentra situado en la A-6 en la provincia de Lugo, y fue puesto en servicio en el año 2001 como parte del trazado de la A-6. Tiene una longitud aproximada de 700 metros y se compone de doble tubo con circulación unidireccional. La conservación del túnel depende de la Subdirección de Conservación de la Dirección General de Carreteras Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, concretamente desde la Demarcación de Carreteras del Estado en Galicia.

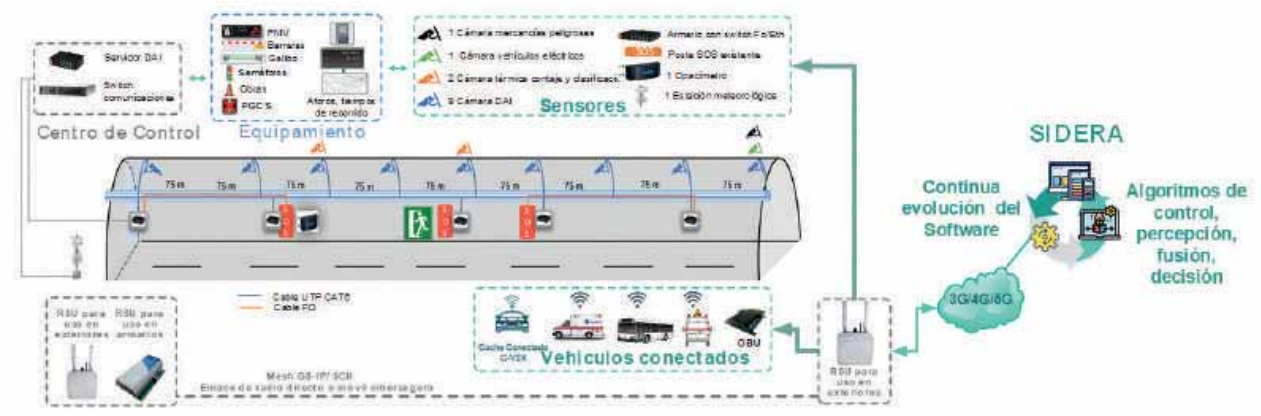
Túnel de Cereixal, A-6 (Galicia, España)

El 26 de mayo de 2021, el túnel de Cereixal se convirtió en el primer túnel de España con cobertura 5G, con la capacidad de conectarse con los vehículos gracias a las comunicaciones C-V2X (celular vehicle-to-everything), la sensorización IoT (Internet of Things) y el edge computing de la red 5G, para ofrecer las siguientes funcionalidades:

- Informar sobre la presencia en el interior del túnel de vehículo con MMPP y su tipología.
- Clasificación de vehículos según su distintivo energético y distinción de los coches eléctricos y de combustión (acceso a base de datos DGT).

- Número de Vehículos que circulan por el interior del túnel.
- Clasificación de los vehículos del interior del túnel (ligeros / pesados).
- Datos de DAI.
- Detección de baja visibilidad en interior de túnel.
- Información climatológica (temperatura y estado de pavimento, GRIP o nivel de adherencia, porcentaje de hielo, altura de la película de agua, humedad relativa sobre pavimento, temperatura de rocío, dirección y velocidad del viento, temperatura del aire, humedad relativa, radiación global, presión atmosférica, cantidad, tipo e intensidad de precipitación)

Para ello se instalaron en el túnel en el marco del proyecto cámaras DAI, cámaras térmicas, cámaras de lectura de matrícula para detectar MMPP y vehículos eléctricos, opacímetro, estación meteorológica y nodos de comunicaciones. Igualmente se instalaron balizas cooperativas de tipo híbrido (ITS-G5 / C-V2X) y un software de gestión sobre la plataforma comercial SIDERA.



2.2 Túneles de Calle 30

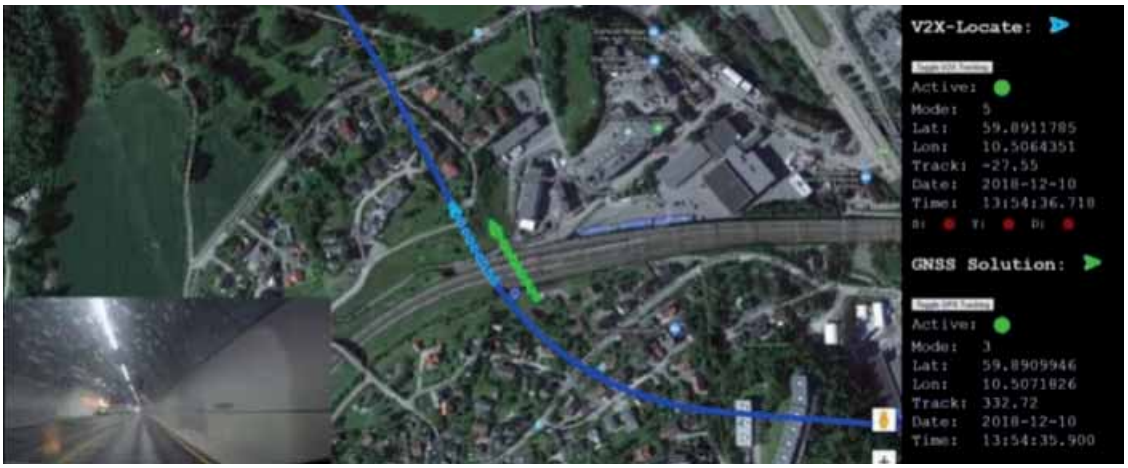
En Calle 30 se inició un piloto a través del programa C-Roads en el año 2017 con comunicaciones híbridas (DSRC y telefonía móvil), incluyendo equipamiento en los túneles (RSUs – RoadSide Units) con interdistancias de entre 500 y 1.000 metros de varios fabricantes (Indra, Kapsch, Insia), y a bordo de 60 vehículos (OBUs – On Board Units), desarrollándose varios servicios como – señalización de obras, – señalización de condiciones meteorológicas, – señalización de vehículo lento o detenido, – señalización de precaución por retenciones próximas, – información de limitación de velocidad en el interior del vehículo, – información a bordo sobre vehículo de emergencia próximo, – información de tráfico, e – información de aparcamiento, si bien el escenario fue a cielo abierto.

Posteriormente varios de los socios (Insia) del proyecto han continuado con la implantación de equipos en interior de túnel, habiéndose colocado balizas RSU híbridas (ITS-G5 y C-V2X) en varios puntos de interior de túnel, resultando que la cobertura aparentemente es superior a la existente a cielo abierto con las mimas RSU.

2.3 Bjørnegård Tunnel

El túnel de Bjørnegård tiene una longitud de 2,2 km y está situado en Noruega en la carretera E-16 en el municipio de Bærum,

cerca de la capital Oslo. En el año 2019 se realizó una prueba con RSU's del fabricante Cohda Wireless para solventar la problemática de los sistemas GNSS (GPS) en zonas soterradas y poder ubicar eficazmente a los vehículos en el interior de túneles. La prueba resultó satisfactoria trabajando a una frecuencia de 5,9GHz, previendo realizarse más pruebas en otros túneles gestionados por la Administración de carreteras noruega (NPRA).



2.4 Dalian Tunnel

El túnel Dalian de 1,8 km se encuentra ubicado en Sanghai (China) sobre el rio Huanpu. En el año 2019 se convirtió en el primer túnel chino con cobertura 5G y con el objetivo de aumentar la precisión de posicionamiento de vehículos, mejorar el mantenimiento de equipos, e implantar sistemas de vigilancia sobre realidad aumentada.

3. CONSIDERACIONES SOBRE LA CONSERVACIÓN Y EL MANTENIMIENTO DE TÚNELES AL PASO DE LOS VAC

Los túneles viarios son puntos singulares de las carreteras que incrementan el riesgo de los usuarios a su paso, particularmente los riesgos asociados a incendios en espacios confinados. Para paliar dichos riesgos se les toda de múltiples medidas de seguridad, tanto en el ámbito de las infraestructuras (galerías de emergencia, drenaje de líquidos tóxicos, aceras, etc.) como de equipamiento (iluminación artificial, ventilación forzada, sistemas de protección contra incendios, señalización variable, cámaras de vigilancia, comunicaciones, etc.). Todas estas medidas deben estar en perfecto estado de funcionamiento para que su contribución sobre la seguridad sea efectiva, para lo cual es indispensable realizar un mantenimiento y conservación adecuado.

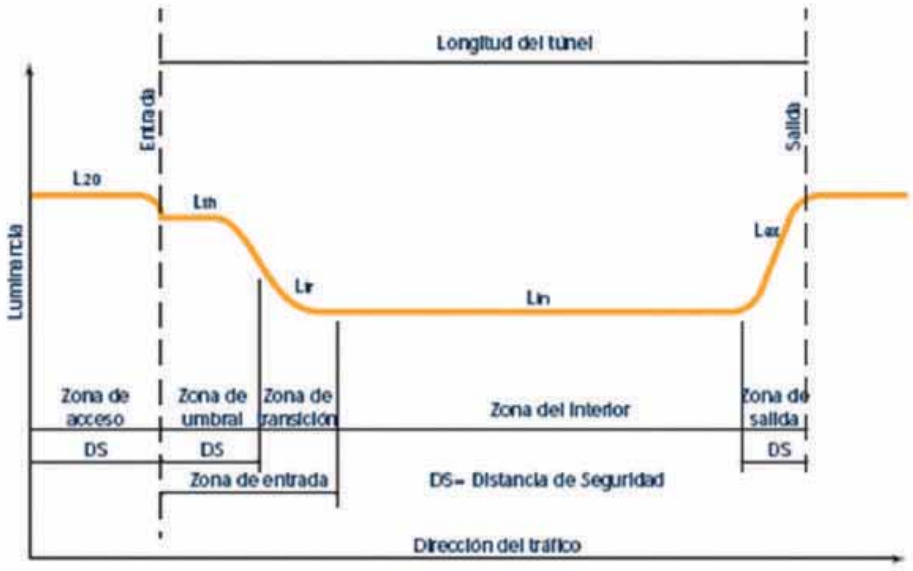
En el presente apartado se analiza la afección que puede tener la llegada del vehículo autónomo, conectado y eléctrico sobre la conservación y el mantenimiento de los equipos existentes, de forma que las Administraciones responsables de explotación de los túneles se vayan adaptando de forma progresiva a esta realidad.

3.1 Sistema de alumbrado

Uno de los sistemas habituales en túneles de carretera es el de iluminación, particularmente importante en los accesos al túnel

para paliar el efecto de agujero negro que se produce en la visión humana al pasar de forma brusca de unas condiciones de iluminación elevadas a otras de menor iluminación como las del interior de un túnel, efecto que se maximiza en situaciones diurnas con climatología soleada.

En el interior del túnel, se exige también iluminación artificial una vez pasada la zona umbral y de transición, aunque de menor nivel tras recorrer la zona de adaptación (transición), para mejorar las condiciones de visibilidad y percepción de seguridad del usuario al atravesar el túnel, a pesar de que se exija tener encendidas las luces de cruce.



Esquema zonas de alumbrado de un túnel

La sensorización de los vehículos autónomos actuales de mayor nivel se basa en sistemas radar, lidar y cámaras para detectar elementos en su entorno. Como ejemplo podemos citar el nuevo modelo de Mercedes clase S certificado para nivel 3 de autonomía, que incorpora radar y lidar en su parte frontal, además de cámaras en todo su perímetro. Este tipo de vehículos, en teoría, ya serian capaces de atravesar un túnel sin necesidad de iluminación artificial en sus bocas por cuanto sus sensores no necesitan de adaptación ante los cambios de iluminación, ni en el interior dado que la percepción de seguridad y comodidad de conducción no serían necesarias en el modo de circulación automatizada, aspecto que sería recomendable contrastar de forma experimental.

Sin embargo, el resto de vehículos con menores niveles de autonomía, 0, 1 y 2, presentes mayormente en nuestros días y que seguirán circulando en futuras décadas, incorporan sensores (normalmente cámaras) de identificación del entorno, detección de elementos y preaviso de colisión que se ven afectados por las condiciones de visibilidad externas, aspecto que refuerza la exigencia de mantener unas condiciones lumínicas exigentes en el túnel como hasta la fecha, manteniendo de forma adecuada las luminarias, el balizamiento de guiado, los hastiales y paneles de revestimiento, mediante operaciones de renovación y limpieza periódicas.

En el caso de las luminarias de emergencia a baja altura, su mantenimiento seguirá siendo crítico para garantizar la visibilidad en caso necesidad de evacuación a pie, incluso más exigente a medida que la automatización de los vehículos aumente y la iluminación normal pierda relevancia.

3.2 Elementos de señalización fija y variable

Los elementos de señalización fija horizontal y vertical, regulados en España por las normas 8.1-IC y 8.2-IC respectivamente, resultan indispensables para mejorar la seguridad del paso de vehículos independientemente de su grado de automatización, con objeto de delimitar correctamente los carriles para mantener en ellos o realizar cambios de carril con seguridad, interpretar correctamente de forma automática las señales verticales como pueden ser las de limitación de velocidad, etc. Será por tanto necesario fomentar entre los explotadores la necesidad e importancia de mantener de forma adecuada y limpia tanto la señalización fija horizontal (marcas viales, señales pintadas en calzada) como la vertical.

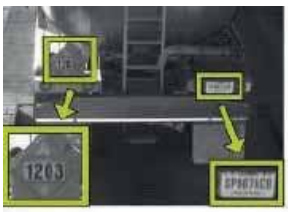
Igualmente la señalización variable, disponible en gran número de túneles carreteros a partir de cierta longitud, con semáforos, paneles de mensajería variable, señales de afección de carril, de limitación de velocidad u otros elementos, debe mantenerse de forma adecuada de forma que funcionen correctamente todos sus pictogramas, pixeles y nivel de contraste, de forma que facilite su interpretación automática por los sensores del vehículo. Este apartado es particularmente importante dado que los mapas cartográficos que pueden disponer los vehículos internamente solo tienen en cuenta las condiciones habituales de circulación (velocidad, adelantamiento, etc.). Una alternativa o complemento a esta mensajería sería ofrecer mediante conectividad V2I la información variable al interior del propio vehículo.

Como caso particular podríamos mencionar la gestión de carriles reversibles con balizas led como la existente en el túnel de Vallvidrera en Barcelona, para ver si los coches automatizados podrían interpretar el código de colores de forma similar a los semáforos, sistema también habitual en los carriles no segregados reservados para autobuses y vehículos de alta ocupación (BUS-VAO).

3.3 Cobertura de telefonía móvil en el interior del túnel

La cobertura de telefonía móvil no es un sistema exigido en túneles de carretera, si bien sí es habitual su implantación por interés de las compañías de telefonía. No obstante, dicha cobertura es necesaria para alguno de los servicios cooperativos ya existentes en la actualidad como el sistema eCall, regulado y de obligada implantación en Europa a partir de abril de 2018 para vehículos ligeros.

Este sistema permite el aviso automático en caso de accidente al centro de coordinación de emergencias más cercano, emitiendo un aviso con datos básicos de localización del vehículo y hora de suceso mediante la red de telefonía móvil. Los túneles disponen habitualmente de una infraestructura de telefonía móvil que da cobertura en su interior, aspecto crucial que permite esta funcionalidad. Este sistema complementa la detección de accidentes en túneles que dispone de sistemas de vigilancia y de detección automática de incidentes (DAI), y es relevante en túneles más cortos, normalmente interurbanos de longitud inferior a 500 metros, sin la presencia de estos sistemas.



Por tanto, se considera importante supervisar por parte de los explotadores de túneles el mantenimiento que se realiza por los operadores de telefonía de esta infraestructura, así como la realización de pruebas y ejercicios dentro del plan de simulacros que garantice su funcionamiento en el interior de los túneles.

3.4 Servicio de recarga eléctrica

Con un parque de vehículos eléctricos en continuo ascenso, las administraciones responsables del mantenimiento de carreteras pueden plantearse la incorporación de puntos de recarga eléctrica en lugares de especial riesgo como son los túneles. Por ejemplo, en aquellos túneles con apartaderos sería conveniente disponer de tomas de carga para el caso de vehículos que se quedasen sin energía para continuar la marcha. Igualmente podrían localizarse tomas adaptadas en las estaciones de emergencia que suelen disponer de tomas de fuerza monofásicas y trifásicas.

4. APROVECHAMIENTO DE LA INFORMACIÓN Y CONECTIVIDAD DE LOS VEHÍCULOS PARA LA GESTIÓN DEL TÚNEL

Los vehículos puede ser fuente de información relevante para la gestión de la seguridad de un túnel de carretera. Si la conectividad de los vehículos avanza en el ámbito de los sistemas cooperativos como se espera, y se dan las circunstancias de regulación necesarias, similar a lo normalizado por ejemplo con el sistema eCall en el ámbito comunitario, las posibilidades de mejora de la seguridad de los túneles son evidentes. Se identifican a continuación casos posibles

4.1 Paso de vehículos con MMPP

Uno de los mayores peligros existentes en un túnel de carretera es la ocurrencia de un incendio, particularmente cuando se ve implicado un vehículo con una elevada carga de fuego, situación que se produce con las mercancías peligrosas. Para evaluar este riesgo particular, las normativas exigen la realización de análisis específicos, en Europa a través de un método cuantitativo (QRAM) de la PIARC, que determinen la posibilidad del paso y restricciones de este tipo de vehículos por los túneles.

Existen sistemas de reconocimiento óptico de caracteres (OCR) que permiten detectar de forma automática vehículos con mercancías peligrosas, si bien su uso no está extendido en túneles. Un ejemplo es el sistema previsto instalar en el nuevo túnel de Olesa (1,8 km) en la B-40 de Barcelona, donde no se permitirá el paso de MMPP. Las limitaciones de estos sistemas son varias, por un lado, la dificultad de localizar las placas naranjas en los vehículos pesados cuya ubicación es variable, y por otro, el desconocimiento de la carga que lleva en ese momento el vehículo.

Estas limitaciones podrían solucionarse mediante comunicación cooperativa vehículo- infraestructura, o entre centros de control, enviando la ruta y carga con antelación al centro de control del túnel afectado, de forma que se conozca de forma automática el tipo de mercancía y cantidad en caso de incidente posterior, información relevante para su gestión por parte de los servicios de emergencia, particularmente bomberos.

4.2 Paso de vehículos especiales

De forma similar al apartado anterior, los vehículos de especiales dimensiones o peso (longitud superior a 19 metros, anchura mayor de 2,55 metros, gálibo superior a 4 metros, peso mayor de 40 tn) podrían igualmente

enviar una comunicación automática de sus características al centro de control de túneles más cercano con objeto de alertarles, o bien mediante el intercambio de información y planificación de rutas entre centros de control de túneles y empresa de transportes.

4.3 Vehículos con riesgo de incendio

La detección temprana de un incendio en túnel es un aspecto crucial en la gestión posterior del incidente. Para ello los túneles cuenta habitualmente con sistemas específicos de detección, como el DAI que puede alertar de la presencia de humo, incluso antes con la detección de un accidente o detención de un vehículo averiado con incendio posterior, así como sistemas basados en un cable lineal de incendio.

No obstante, lo ideal sería tratar de evitar la entrada al túnel de vehículos con elevado riesgo de incendiarse. Este principio se implementó en el túnel de Mont Blanc con la instalación de unas cabinas en el exterior previas a la bocas del túnel que registran la temperatura del motor o carga de los vehículos pesados a su paso, generándose una orden de desvío de los vehículos en caso de superior determinado umbral de temperatura. Un sistema similar más actualizado es el basado de arcos de detección con cámaras térmicas y escáneres láser desarrollado por la empresa SICK, explicado en el siguiente enlace: https://www.youtube.com/watch?v=Polavg5hU5o&t=5s.

Una alternativa a este sistema de costosa implantación sería mediante la comunicación directa del estado y temperatura del motor de los vehículos en tiempo real a los centros de control de túneles afectados por su paso

4.4 Detección de niebla

La niebla suele ser un problema habitual en carreteras con túneles de montaña de larga longitud donde la climatología pueda variar de forma significativa entre ambas bocas. El riesgo existente en caso de niebla densa es elevado por cuanto se pierde la visibilidad y la probabilidad de accidente aumenta de forma considerable.

Las siguientes imágenes muestran un accidente múltiple ocurrido en enero de 2020 cercano a un túnel de Gipuzkoa en la A-636, túnel de Argisao, con la implicación de 11 vehículos y 14 víctimas heridas, siendo la causa la perdida de visibilidad por un banco de niebla denso.

Lo habitual en este tipo de túneles es disponer en el exterior cercano a las bocas de una estación meteorológica con detección automática de niebla que alerte al centro de control para activar el procedimiento de precaución correspondiente. En el ejemplo de Gipuzkoa así se realizó, teniendo la señalización de precaución y de disminución de velocidad activada, no obstante no fue suficiente para evitar el accidente.

Con la conectividad de los vehículos, seria técnicamente viable que la señal de encendido de los faros antiniebla, junto con su posición, fuese comunicada al centro de control y al resto de vehículos cercanos, con objeto de alertar del riesgo existente

5. CONCLUSIONES

La circulación de vehículos conectados, eléctricos y cada vez con mayor grado de automatización será un hecho progresivo que se vaya incorporando a nuestras carreteras, ofreciendo mayor seguridad a los usuarios de las vías.

Los túneles viarios, como puntos singulares de los viales por su carácter de confinamiento y riesgo adicional en caso de incendio, incorporan una serie de medidas de seguridad para paliar dichos riesgos, sin embargo, dichas medidas fueron previstas considerando la existencia de vehículos no conectados ni automatizados. Por tanto, de cara a maximizar la mejora de seguridad que ofrece la automatización de la conducción y las comunicaciones cooperativas, las Administraciones responsables de la explotación de túneles deben reconsiderar sus procedimientos de trabajo (operación, conservación, mantenimiento y renovación de equipamiento) para adaptarse a dicha evolución, como:

- Presar especial atención a la conservación y limpieza de líneas de borde y separación de carriles, así como señalización vertical, elementos clave para la conducción automatizada
- Mantener unas condiciones de iluminación y visibilidad adecuadas en el interior del túnel con objeto que los vehículos parcialmente automatizados puedan interpretar correctamente las señales.
- Disponer y habilitar una infraestructura de comunicaciones inalámbricas que permita al centro de control de los túneles comunicarse directamente con los vehículos, ofreciendo y recibiendo información relevante, más allá de los sistemas actualmente existentes como los de radiodifusión.
- Habilitar puntos de recarga eléctrica de vehículos a lo largo de los túneles
- Adecuar los contratos de suministro eléctrico a medida que los consumos energéticos principales del túnel, estos son la iluminación y ventilación, vaya disminuyendo con el paso del tiempo.

PLATAFORMA DE SIMULACIÓN PARA ENTRENAMIENTOS DE OPERADORES

Fco. Javier Cabrerizo Fuentes
Aceinsa Movilidad-Intelia

En la operación de los sistemas de control infraestructuras el objetivo prioritario es la seguridad de la vía, y más concretamente en la operación de túneles. Para ello, se requiere una formación al personal que opera dicha infraestructura, según Real Decreto 635/2006 y la Directiva Europea 2004/54/C.

Esta formación se debe realizar en un entorno virtual, a través de sistemas de simulación de las distintas situaciones que se pueden generar en los túneles. Mediante estas plataformas de simulación los operadores se enfrentarán a situaciones críticas, además de poder chequear la efectividad de los distintos planes de actuación establecidos.

Esta plataforma de simulación se compone de un sistema de operación idéntico al usado por los operadores, una aplicación para simular las distintas magnitudes físicas, estados y alarmas de los distintos subsistemas gestionados, y un interfaz para que un entrenador genere los diferentes escenarios.

Los principales beneficios son:

- Operadores entrenados para situaciones críticas y de emergencia de manera periódica y actualizada.
- Comprobar la efectividad de los planes de actuación.
- La optimización en la reducción de costes en la puesta en marcha del sistema de control, evitando que el software instalados tenga mal funcionamientos que puedan ocasionar situaciones no deseadas.
- Plataformas de control robustas, seguras y optimizadas al poder testear distintas casuísticas de funcionamiento de las aplicaciones.

El futuro de los simuladores es amplio al poder beneficiarse de las distintas tecnologías que están saliendo al mercado. Entre otras, los gemelos digitales y las herramientas BIM para hacerlos más reales, la Inteligencia Artificial y , el Machine learning para el análisis y el aprendizaje.

SIMULATION PLATFORM FOR OPERATOR TRAINING

In the operation of infrastructure control systems, the priority main objective is safety, and more specifically in the operation of tunnels. To this end, training is required for the personnel who operate this infrastructure, in accordance with Spanish National Decree 635/2006 and European Directive 2004/54/C.

This training must be carried out in a virtual environment, through simulation systems of the different situations that can take place in tunnels. By means of these simulation platforms, operators will face critical situations, as well as being able to check the effectiveness of the different action plans established.

This simulation platform consists of an operating system identical to the one used by the operators, an application to simulate the different physical magnitudes, states and alarms of the different subsystems managed, and an interface for a trainer to generate the different scenarios.

The main benefits are:

- Operators trained for critical and emergency situations on a regular and updated basis.
- Checking the effectiveness of action plans.
- Optimisation in the reduction of costs in the implementation of the control system, avoiding malfunctioning of the installed software that may cause undesired situations.
- Robust, safe and optimised control platforms that are able to test different situations of application operation.

The future of simulators is wide-ranging as they can benefit from the different technologies that are coming onto the market. Among others, digital twins and BIM tools to make them more real, Artificial Intelligence and Machine learning for analysis and learning.

PLATE-FORME DE SIMULATION POUR LA FORMATION DES OPÉRATEURS

Dans l'exploitation des systèmes de contrôle des infrastructures, l'objectif prioritaire est la sécurité des voies, et plus particulièrement dans l'exploitation des tunnels. À cette fin, une formation est requise pour le personnel qui exploite cette infrastructure, conformément au décret royal 635/2006 et à la directive européenne 2004/54/C.

Cette formation doit être réalisée dans un environnement virtuel, par le biais de systèmes de simulation des différentes situations qui peuvent se présenter dans les tunnels. Grâce à ces plateformes de simulation, les opérateurs seront confrontés à des situations critiques et pourront vérifier l'efficacité des différents plans d'action établis.

Cette plateforme de simulation est constituée d'un système d'exploitation identique à celui utilisé par les opérateurs, d'une application permettant de simuler les différentes grandeurs physiques, les états et les alarmes des différents sous-systèmes gérés, et d'une interface permettant à un formateur de générer les différents scénarios.

Les principaux avantages sont les suivants :

- Des opérateurs formés aux situations critiques et d'urgence sur une base régulière et actualisée.
- Vérifier l'efficacité des plans d'action.
- Optimisation dans la réduction des coûts de mise en œuvre du système de contrôle, en évitant les dysfonctionnements du logiciel installé qui peuvent provoquer des situations non souhaitées.
- Des plates-formes de contrôle robustes, sûres et optimisées, capables de tester différentes casuistiques de fonctionnement des applications.

L'avenir des simulateurs est vaste car ils peuvent bénéficier des différentes technologies qui arrivent sur le marché. Entre autres, les jumeaux numériques et les outils BIM pour les rendre plus réels, l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique pour l'analyse et l'apprentissage.

INTRODUCCIÓN

En general, en los sistemas de control infraestructuras, nos enfrentamos normalmente a una dificultad en común: son sistemas a los que se les da un uso rutinario normal, pero que habitualmente no están expuestos a situaciones de emergencia. Dicho de otro modo, normalmente no suele haber problemas graves; pero cuando los hay tenemos que actuar con rapidez y determinación.

En este sentido la normativa específica que tiene que realizarse una formación obligatoria, según el Real Decreto 635/2006 y la Directiva Europea 2004/54/C. Pero, ¿qué ocurre una vez que ya se ha realizado la formación? Los incendios no ocurren todos los días y el operador corre el riesgo de olvidar la ubicación de los menús o la secuencia de funcionamiento del sistema de control.

La operación normal de carretera puede llevarte a mandar un aviso a un panel de mensaje variable, indicando que hay viento, un coche en el arcén, o avisos de índole general como campañas de tráfico.

Cuando ya hay un incidente leve, no tiene que ser todavía un incendio, los operadores tienen que lanzar un plan a carretera con agilidad para minimizar el tiempo en el que se debe mandar el aviso a la señalización variable o que un carril sea cortado.

En el caso de los incendios, aunque los nuevos sistemas de control ayudan al operador ejecutando automáticamente el plan de incendio, el operador debe tener en todo momento control sobre la aplicación. Por ejemplo, pueden llegar los bomberos y solicitar operaciones en manual, etc.

Por todos estos motivos la operativa tiene que realizarse de manera rápida, tiene que ser algo que se realice prácticamente sin pensar. Tanto si se trata de un incidente leve como si es un accidente grave o una operación de emergencia.

En definitiva, en una operación de carreteras con el objetivo final de la seguridad de la vía, es necesario que todo el personal involucrado en el servicio esté entrenado para gestionar y actuar ante diferentes escenarios (condiciones variables de tráfico, apertura de puertas, calidad del aire deterior, obstáculos en la vía, incendios…). Este entrenamiento sólo puede ser realizado sin afectar a las condiciones normales de funcionamiento de la vía y el túnel.

REQUISITOS

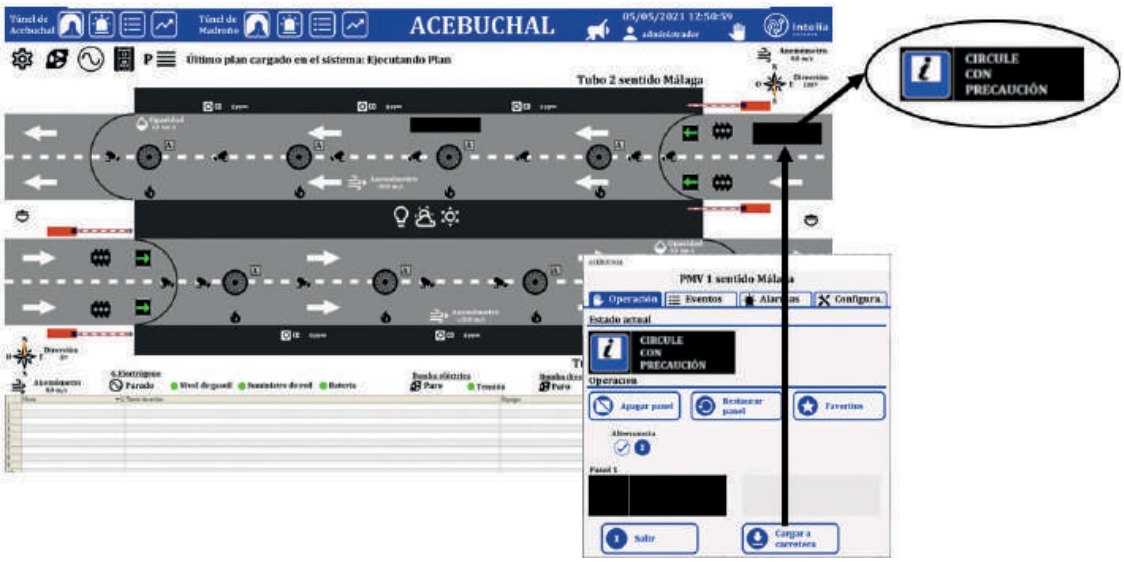
¿Qué necesitamos para poner en marcha una plataforma de simulación? Por un lado, necesitamos que la plataforma de simulación visualmente sea igual en apariencia y funcionamiento que la aplicación que tenemos en el centro de control, y que cualquier cambio sobre esta no afecte a la vía real. Para ello se utilizará en un entorno virtual la misma aplicación de control de túneles que maneja el personal operativo en la instalación.

Por otra parte, en un entorno virtual no tenemos enlace físico con las magnitudes físicas: la temperatura del aire, la velocidad del viento, los niveles de gases, etc. Es decir, con los sensores, captadores y alarmas que generan los distintos elementos instalados en el túnel. En este punto es donde hay que desarrollar una plataforma que permita al menos:

- Configurar distintas variables de simulación. De esta manera podremos simular unas condiciones físicas extremas que serían muy difíciles de que se den en la realidad, por ser situaciones excepcionales de alto riesgo y graves consecuencias.
- Creación de los distintos escenarios para el análisis de la simulación, para extraer conclusiones acerca del buen uso del sistema de control ante diferentes situaciones y alarmas.

En conclusión, necesitamos que el sistema nos muestre en pantalla el evento sobrevenido y que la plataforma de simulación ejecute los algoritmos de control con estas señales simuladas. Y a su vez, simule una repuesta con los valores obtenidos en el procesamiento del algoritmo de control.

Un ejemplo sería lanzar un aviso a un panel de mensaje variable, y que en el sistema de control se pueda ver la representación del panel con dicho aviso.

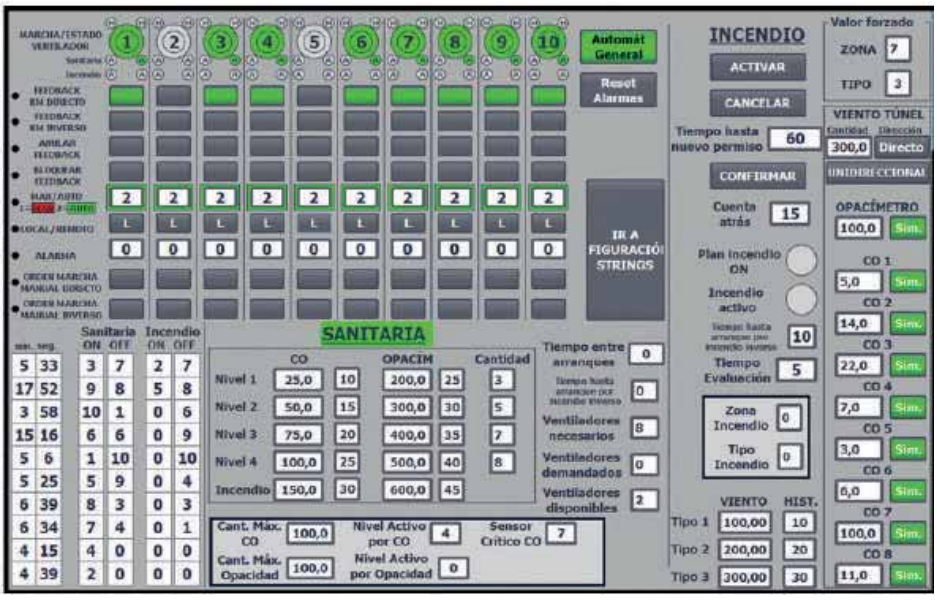


En el caso de un plan de carretera sería lo mismo, agrupando diferentes elementos de control: que los semáforos se pongan en amarillo, que los Aspa-Flecha indiquen un cambio de carril y que haya un aviso en un panel de mensaje variable.

Otro ejemplo de esto sería el control de ventilación: en la aplicación arrancaríamos un torpedo y el sistema nos muestra como la velocidad del viento va cambiando en función de la consigna de velocidad que le demos al torpedo.

En este sentido de generar repuestas físicas necesitamos también que la plataforma sea capaz de simular condiciones como las de un incendio. Por otra parte, la plataforma debe proporcionar una respuesta simulada para cada elemento de medida como son los detectores de CO, opacímetros, anemómetros…

Esto sería un ejemplo de una plataforma en la que el propio operador tiene que ir introduciendo los valores simulados del entorno físico.



Para cada elemento hay que ir marcando confirmación de arranque de cada torpedo, niveles de lectura, velocidad del viento en el interior del túnel, etc. En el caso extremo de simulación de ventilación de incendio, en el que necesitamos conseguir una velocidad determinada del viento para que el humo se estratifique en función de los torpedos que vamos arrancando, conseguir simular todas las variables se convierte en un trabajo imposible.

ARQUITECTURA SIMULACIÓN

Para tener un sistema de simulación y un entrono virtual, deberíamos, al menos, disponer de un servidor hardware con la suficiente potencia para ejecutar los distintos software y servicios necesarios de simulación:

- Software SCADA de control de túnel, con la misma versión del sistema operado en tiempo real, con las mismas rutinas de control para que el sistema virtual actúe exactamente igual de lo que ocurre en la realidad
- Software simulación de equipamiento de control y adquisición de datos, bien sea basado en arquitectura PLC o ERU, comunicado directamente con el SCADA de control.
- Software de simulación, reaccionando a las ordenes que da el software de PLC/ERU y proporcionando datos simulados del proceso de captación de datos y alarmas del sistema.
- Consola de entrenador desde donde el formador actuará para cambiar las distintas condiciones de los sensores y alarmas del túnel en cuestión.

BENEFICIOS

Uno de los principales objetivos en la operación y explotación de infraestructuras viarias es la seguridad y eficiencia del servicio. Por eso, el disponer de plataformas de simulación nos permite conseguir que los operadores que gestionan la vía, y en concreto los túneles, estén entrenados para las distintas casuísticas que se van a encontrar en la operación diaria. Y más concretamente, estar preparados ante situaciones críticas y de emergencia.

Otro factor a considerar, es la optimización en la reducción de costes en la puesta en marcha del sistema de control, evitando que el software instalados tenga mal funcionamientos que puedan ocasionar situaciones no deseadas. Redundando de nuevo en la seguridad del servicio y la operación. A medida que vamos entrenando al personal operativo, se va perfeccionando durante en la vida del contrato de explotación y mantenimiento la plataforma de control. En definitiva, es una forma continua de depurar el aplicativo de control, y optimizar su uso mediante:

- La detección de errores del desarrollo porque ayuda a depurar desde una simple dinamización en la visualización, hasta una secuencia de funcionamiento completa.
- La plataforma también nos ayuda a identificar cuellos de botella en la operativa de Scada, comprobando que no hay menús que bloquean modos de funcionamiento, etc.

- Nos sirve incluso para comprobar la efectividad de los planes de actuación, simulándolo podemos comprobar si hay algún elemento que no esté incluido en el plan.

Durante la operación nos sirve para analizar la operativa probando diferentes escenarios y viendo cuales son las acciones óptimas que debe realizar el operador. Evaluando cómo de efectivos son los planes de emergencia y cuánto tardamos en ejecutar un plan de emergencia y en definitiva mejorar la operatividad del túnel.

Podemos mantener a los operadores actualizados e incluso hacer cursos de capacitación para los operadores de manera que el responsable de operación pueda evaluar si los operadores están suficientemente entrenados para operar en un centro de control. Es decir, por medio de la plataforma de operación el operador adquiere experiencia y solidez no poniendo en riesgo la operación real.

TENDENCIAS

Como ya se puede ver en todos los ámbitos, están saliendo al mercado herramientas avanzadas de modelado digital con las que, junto con las herramientas de ingeniería tradicionales, conseguimos obtener el gemelo digital.

Si añadimos la herramienta BIM conseguimos un modelo de realidad aumentada del túnel, que nos que nos puede valer como entrenamiento sin tener que exponerse al riesgo de "bajar" a carretera. En este caso no sólo se mejora en operatividad, sino que se mejora en seguridad. Con este modelo se ayuda al operador a ubicarse en un entorno real para ver dónde están los equipos de control, ver físicamente como actúan y no desde una pantalla

En cuanto a los datos que se generan durante la operación, lo que podemos intuir es una potencialidad para aplicar las herramientas de Inteligencia Artificial para analizar todos los datos. Y usarlos para realizar una evolución continua del software tanto de simulación como lo que luego podemos llevar a carretera.

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE TÚNELES EN SERVICIO MEDIANTE LA INTEGRACIÓN, APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA BIM (BIMEXTUNEL)

Zacarías Barcenilla Torres
Pedro Yarza Álvarez
Alauda Ingeniería

BIMEXTUNEL consiste en una única herramienta inteligente que comprende toda la información relevante para la gestión de los túneles en servicio, permitiendo realizar una toma de decisiones rápida y eficaz por cada una de las figuras responsables de su operación y conservación (Autoridad Administrativa, Gestor, Empresa Explotadora, RST, Organismo de Inspección...).

Se han diseñado y desarrollado un conjunto de módulos interoperables entre sí (maqueta-digital y virtual-interdisciplinar), capaces de transformar la gestión tradicional de los túneles en un modelo más eficiente y fiable, en tiempo real. Mediante el empleo de herramientas de análisis y gestión de datos Big-Data, visualización de elementos, metodología BIM y desarrollo de algoritmos, se ha obtenido un sistema que centraliza y gestiona toda la información del entorno y los activos (BIT-BIM-GIS-GMAO-SCADA), así como las jerarquías y figuras presentes en un túnel en servicio, además de funcionalidades predictivas en el caso de riesgo de incendio.

Para su consecución, se ha diseñado y desarrollado:

- Una estructura jerárquica de datos/elementos incorporados al modelo BIM.
- Diccionarios de datos asociados a los atributos de los elementos.
- La estructura de usuarios/roles para la gestión de túneles en servicio.
- Una completa maqueta digital, adecuada para los túneles en servicio.
- Una herramienta GIS como base de acceso a BIMEXTUNEL que permita ubicar los túneles, realizar mediciones, geoposicionar planos, etc.
- Los protocolos de vinculación entre todas las herramientas que formarán parte del Sistema de Gestión durante toda la vida/explotación del túnel: BIT, SCADA, GMAO, GIS y maqueta-digital.
- Una herramienta de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO) específico para túneles.
- Una herramienta de gestión documental.
- Una herramienta que permite la comunicación e interacción entre los diferentes agentes que intervienen en la operación de un túnel.
- Algoritmos de cálculo del Índice de Riesgo Dinámico de un túnel.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN IN-SERVICE TUNNEL MANAGEMENT SYSTEM THROUGH THE INTEGRATION, APPLICATION AND ANALYSIS OF THE BIM METHODOLOGY (BIMEXTUNEL).

BIMEXTUNEL comprises several systems in a single intelligent tool that incorporates all the relevant information for the management of tunnels in service, allowing accurate, quick and efficient decision-making for all the people responsible for the operation and maintenance of a tunnel network (Administrative Authority, Manager, Company Operator, tunnel safety manager, tunnel inspectors, etc.).

A set of interoperable modules has been designed and developed. These modules allow the transformation of the traditional management of tunnels into a more efficient and reliable model with information available in real time to support decision making. BIMEXTUNEL centralizes and manages all the information and the assets related to the management of a tunnel network. It does it through the use of different tools and methodologies like BIT [tunnel management database], BIM, GIS, CMMS & SCADA. It incorporates the roles & hierarchies of the people involved in tunnel management and maintenance, predictive functionalities in the event of fire risk using big data analysis, data management tools, visualization of elements, BIM methodology and algorithm development.

To achieve this, the following features have been designed and developed:

- A hierarchical structure of data/elements incorporated into the BIM model.
- Data dictionaries associated with the attributes of the elements.
- The structure of users & roles for the management of tunnels in service.
- A complete digital model, suitable for tunnels in service.
- A GIS tool as the basis for access to BIMEXTUNEL that allows locating and searching for the tunnels on the network, provides basic measurement tools, allows the visualization of georeferenced as-built drawings, etc.
- Definition of the "linking" protocols for transferring information between the tools that will form part of the Management System throughout the life/operation of the tunnel: BIT, SCADA, CMMS, GIS and digital model.
- A specific tool for Computer Aided Maintenance Management (CMMS) for tunnels.
- A document management tool.
- A tool that allows communication and interaction between the different agents involved in the operation of a tunnel.
- Algorithms for calculating the Dynamic Risk Index of a tunnel.

CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME DE GESTION DES TUNNELS EN SERVICE PAR L'INTÉGRATION, L'APPLICATION ET L'ANALYSE DE LA MÉTHODOLOGIE BIM (BIMEXTUNEL).

BIMEXTUNEL se compose d'un outil intelligent unique qui regroupe toutes les informations pertinentes pour la gestion des tunnels en service, permettant une prise de décision rapide et efficace par chacun des responsables de leur exploitation et de leur maintenance (Autorité administrative, Gestionnaire, Société Exploitant, Responsable de la sécurité des tunnels, inspecteur de tunnels...).

Un ensemble de modules interopérables (modèle numérique et interdisciplinaire virtuel) a été conçu et développé, capable de transformer la gestion traditionnelle des tunnels en un modèle plus efficace et fiable, en temps réel. Grâce à l'utilisation d'outils d'analyse et de gestion de données Big-Data, de visualisation d'éléments, de méthodologie BIM et de développement d'algorithmes, un système a été obtenu qui centralise et gère toutes les informations sur l'environnement et les actifs (BIT-BIM-GIS-CMMS- SCADA), ainsi que les hiérarchies et figures présentes dans un tunnel en service, ainsi que des fonctionnalités prédictives en cas de risque incendie.

Pour y parvenir, les éléments suivants ont été conçus et développés :

- Une structure hiérarchique des données/éléments incorporés dans le modèle BIM.
- Dictionnaires de données associés aux attributs des éléments.
- La structure des utilisateurs/rôles pour la gestion des tunnels en service.
- Une maquette numérique complète, adaptée aux tunnels en service.
- Un outil SIG comme base d'accès à BIMEXTUNEL qui permet de localiser les tunnels, de prendre des mesures, de géolocaliser des plans, etc.
- Les protocoles de liaison entre tous les outils qui feront partie du Système de Gestion tout au long de la vie/exploitation du tunnel : BIT, SCADA, CMMS, SIG et maquette numérique.
- Un outil spécifique de Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (CMMS) pour les tunnels.
- Un outil de gestion de documents.
- Un outil qui permet la communication et l'interaction entre les différents agents impliqués dans l'exploitation d'un tunnel.
- Algorithmes de calcul de l'indice de risque dynamique d'un tunnel.

1. OBJETIVOS.

1.1 Objetivos generales.

El Gobierno de España ha lanzado recientemente un plan de inversiones de manera prioritaria (febrero 2020), para la revisión de la red de túneles, a petición de la Comisión Europea. Esta petición responde a la exigencia europea de aplicar unos requisitos mínimos de seguridad en estas infraestructuras críticas (sólo en la red de carreteras del Estado hay un total de 354 túneles). Alauda se embarca en este proyecto de mejora en la gestión, seguridad y eficiencia de los túneles, apoyado por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (anteriormente Ministerio de Fomento) y cofinanciado por CDTI (Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial).

Los túneles son elementos singulares de la carretera que, tanto por sus características físicas como por su normativa, requieren de una mayor atención en cuanto a su explotación. En esta explotación aparecen tanto figuras (agentes) desconocidas en el resto de la carretera, como el director de explotación del túnel, el responsable de seguridad o el inspector como procesos o requerimientos que no se prescriben para ningún otro elemento de la carretera: análisis de riesgo, simulacros periódicos, planes de emergencia, manuales de explotación, etc.

Se hace necesario, por tanto, homogeneizar la forma de trabajar en la conservación y explotación de los túneles: generar herramientas tecnológicas que permitan que el día a día de la operación del túnel quede correctamente registrado y que pueda ser consultado en tiempo real por el Gestor del túnel y/o por la Autoridad Administrativa. Además, es imprescindible garantizar que la documentación e información almacenada está siempre actualizada y que se ajusta fehacientemente a la realidad del túnel. Para ello se hace necesario emplear los últimos avances tecnológicos e incorporar el conocimiento sobre el funcionamiento de estas estructuras a la fase de explotación de un túnel, viabilizando a través de una nueva definición conceptual, una mejora sustancial de los procesos y optimizando la gestión de las infraestructuras, proponiendo nuevas funcionalidades que ayudarán a la toma de decisiones y a la toma de datos en la gestión de los túneles.

Además, es vital en esta tarea homogeneizar los distintos sistemas de monitorización existentes en los túneles en función de la constructora que ha realizado los distintos proyectos de construcción o posteriores remodelaciones, con un sistema que facilite la centralización y presente una utilidad escalable a los túneles de toda la red de carreteras.

Por estos motivos, el principal objetivo del proyecto es mejorar la gestión, seguridad y eficiencia de los túneles de la Red de Carreteras del Estado mediante el estudio, análisis y desarrollo dentro de la metodología BIM en la explotación de estos. Este sistema posibilitará una mejor coordinación entre las distintas figuras que intervienen en su explotación, instalaciones, equipos, la coordinación espacial e interferencias con el túnel y la solución de problemas en cuanto a tareas rutinarias, emergencias, etc. Se pretende obtener una única herramienta inteligente (SISTEMA DE GESTIÓN DE TÚNELES BIMEXTUNEL) que comprenda toda la información relevante para la gestión de los túneles en servicio permitiendo realizar una toma de decisiones rápida y eficaz por cada uno de los agentes implicados en dicha gestión:

- Inventario completo del túnel.
- Información recogida en la BIT
- Plan de mantenimiento (GMAO).
- Alarmas y reportes del SCADA.
- GIS y modelo digital BIM (2D/3D).
- Documentación del túnel.
- Registro de incidencias y accidentes.

El desarrollo propuesto busca facilitar la interoperabilidad en tiempo real entre todas las figuras que participan en la explotación y mantenimiento del túnel, así como responsabilidades y gestión de la información, estructurando los procesos entre ellos y su implicación en los mismos. Además, este sistema de gestión deberá servir de base para futuros proyectos de adecuación o de innovación dentro del túnel: Estudios de ventilación y simulacros de incendio, análisis de la efectividad del sistema DAI (Detección Automática de Incidentes), seguridad vial en los puntos conflictivos, iluminación y eficiencia energética, etc

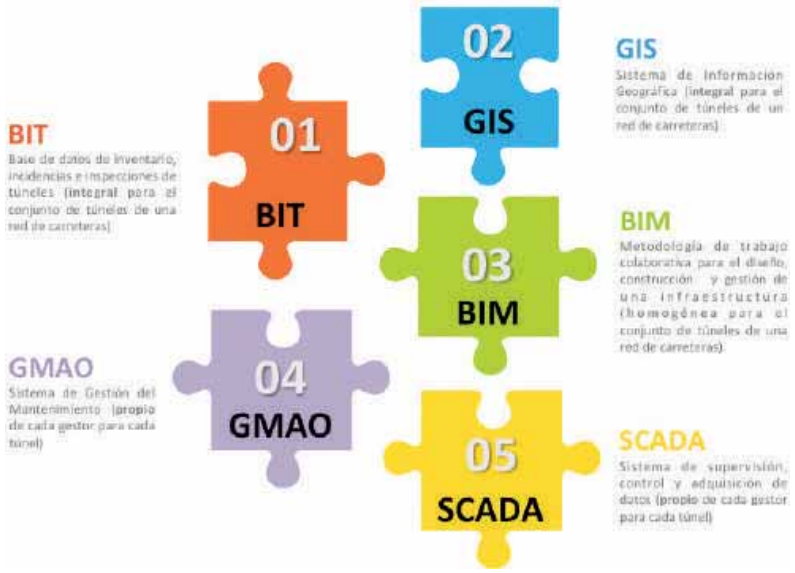


Ilustración 1 Sistemas Principales integrarán BIMEXTUNEL

El nuevo Sistema de Gestión BIMEXTUNEL se virtualiza sobre la base de datos de un elemento real, de forma que sea extrapolable a otros túneles en servicio y a la red de túneles completa y con posibilidades de ampliación del uso del sistema a los procesos de diseño y construcción de túneles.

Las premisas generales sobre las que se asienta el sistema son:

- Debe realizar un proceso de forma más rápida que el proceso actual.
- Debe reducir posibles errores y pérdidas de información de los procesos basados en la transmisión del papel.
- Debe ser compatible con el sistema de calidad pre-existente en la infraestructura.
- No debe aumentar, sino reducir la carga de trabajo, nuevas funciones o roles sin aumentar el personal.
- Los datos deben ser interoperables de modo que puedan ser incorporados e integrados de forma automática.
- Los procesos deben ser lo más simples posibles y la información fiable.
- No debe ser un agente añadido a la explotación de la infraestructura, sino que debe estar integrado en todos los roles tradicionales.
-
-

1.2 Objetivos técnicos específicos.

Para la consecución de los objetivos generales anteriormente descritos, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Definición de estructura jerárquica de los datos (elementos) que deben incorporarse al Sistema de Gestión de túneles en servicio y en particular al modelo BIM.
- Definición de los diccionarios de datos asociados con los atributos del apartado anterior.
- Análisis y desarrollo de la estructura de usuarios/roles del sistema BIM para la gestión de túneles en servicio.
- Estudio del formato de intercambio de datos (IFC) para túneles, para cumplir con el objetivo de normalización y estandarización que persigue la Administración pública.
- Definición de un modelo de "Procedimiento de Trabajo" (BEP) que pueda ser extrapolable al desarrollo de un modelo BIM para todos los túneles de la RCE (Red de Carreteras Españolas).
- Diseño y desarrollo de una maqueta digital lo más completa posible, valorando qué métodos de modelización digital son los más adecuados para el caso de un túnel en servicio.
- Desarrollo de una herramienta basada en GIS como base de acceso al nuevo Sistema de Gestión BIMEXTUNELque permita ubicar los túneles, realizar mediciones, geoposicionar planos, etc.
- Desarrollo de los protocolos de vinculación entre todas las herramientas que formarán parte del Sistema de Gestión durante toda la vida/explotación del túnel: BIT evolucionada, SCADA, GMAO, GIS y maqueta digital.
- Diseño y desarrollo de una herramienta de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO) específico para túneles.
- Diseño y desarrollo una herramienta de gestión documental y otra de gestión y registro de incidencias.
- Desarrollar una herramienta que permita la comunicación e interacción entre los diferentes agentes que intervienen en la operación de un túnel.
- Desarrollo de los algoritmos de cálculo del Índice de Riesgo Dinámico de un túnel.

Adicionalmente:

- Definición de los requerimientos a incorporar en pliegos futuros del Ministerio de Fomento relacionados con la gestión de túneles en servicio (inspección, conservación, etc.) con el fin de implementar/escalar los resultados del presente proyecto sobre un túnel al nivel de la red de túneles de carreteras del Estado.
- Analizar las diferentes fuentes de información y aplicaciones utilizadas habitualmente por la Dirección General de Carreteras, con el fin de detectar información duplicada relacionada con túneles (ejemplo: señalización vertical).
- Analizar la conveniencia de tratar los túneles por tubo de forma independiente o como un único conjunto de los dos tubos junto con las galerías de evacuación.
- Analizar las ventajas, inconvenientes y dificultades que se encontrarán en la transición de pasar de un método de trabajo en el que gran parte de la información referente a los elementos e instalaciones que conforman el túnel se utiliza en formato impreso o utilizando únicamente la BIT, a un método de trabajo basado en un modelo digital del túnel conectado a bases de datos digitales fiables y disponibles de manera inmediata.

2. NECESIDAD Y ANTECEDENTES.

2.1 Necesidad del proyecto.

La necesidad de llevar a cabo el ambicioso y complejo desarrollo que presenta el proyecto está basada fundamentalmente en 2 componentes:

- 1. Infraestructuras inteligentes: la dotación de inteligencia a las infraestructuras se encuentra dentro de la ruta de estrategia de todas las empresas del sector, promoviéndose desde las administraciones el impulso en actividades I+D para poner al servicio de la sociedad novedosas soluciones. Entre estas se encuentra el Observatorio es.BIM, que viene analizando a nivel nacional la inclusión del BIM (Building Information Modeling) en la Administración Pública.
- 2. Singularidad de túneles: los túneles son elementos singulares de la carretera, tanto por sus características físicas como por su normativa, que requieren de una mayor atención en cuanto a su explotación. Esa singularidad hace que en la explotación del túnel aparezcan figuras desconocidas en el resto de la carretera, como, por ejemplo: el director de explotación del túnel, el responsable de seguridad o el inspector. Asimismo, aparecen reglados en la normativa procesos o requerimientos que no se prescriben para ningún otro elemento de la carretera: análisis de riesgo, simulacros periódicos, planes de emergencia, manuales de explotación, etc.

La metodología BIM ha supuesto una verdadera revolución tecnológica para la cadena de producción y gestión de la edificación (y está tratando de serlo para las infraestructuras), estando implementada a nivel mundial. Esta herramienta permite construir de una manera más eficiente, reduciendo costes al tiempo que permite a proyectistas, constructores y demás agentes implicados trabajar de forma colaborativa.

Sin embargo, aunque por definición esta metodología se aplica a todo el ciclo de vida de la infraestructura, en los últimos años, el desarrollo de esta tecnología se ha centrado fundamentalmente en la construcción obviando las fases de explotación y/o conservación y, más concretamente, en la construcción de edificaciones. Por lo que las infraestructuras, y sobre todo las que están en fase de explotación son las que cuentan con un nivel más bajo de madurez de la tecnología. Siendo la visualización, documentación y coordinación 3D los usos BIM más requeridos y siempre, en obra nueva (carreteras).

En este contexto, los túneles aparecen como un elemento de la infraestructura muy crítico en cuanto a la seguridad y a la necesidad de invertir en su mantenimiento, tal y como se ha comentado anteriormente. Están perfectamente localizados e inventariados y presentan unas características bastante similares entre todos ellos, pero con la particularidad de emplear distintos sistemas de monitorización y gestión, que representan una incertidumbre a superar para poder extrapolar al resto el know how que se adquiera en este proyecto.

Aparte, las administraciones responsables de la conservación de este tipo de infraestructuras, en su afán de optimizar e incrementar la eficiencia en la gestión de las mismas, así como su seguridad, tienen la imperante necesidad de que se desarrollen soluciones integrales de gestión que evolucionen la tecnología BIM.

Dentro de este entorno colaborativo, el Director de Explotación, el responsable de seguridad, los inspectores, los servicios de emergencia, etc., son figuras que, en nuestras carreteras, sólo aparecen en los túneles y cuyo trabajo coordinado es fundamental. Deben disponer siempre de información veraz y actualizada, entre la que se debe encontrar los análisis de riesgo, los simulacros periódicos, las inspecciones de seguridad, los manuales de explotación, etc., documentos hasta ahora exclusivos de los túneles.

Es por ello por lo que el trabajo colaborativo y contar siempre con información actualizada y disponible cobra especial importancia en los túneles.

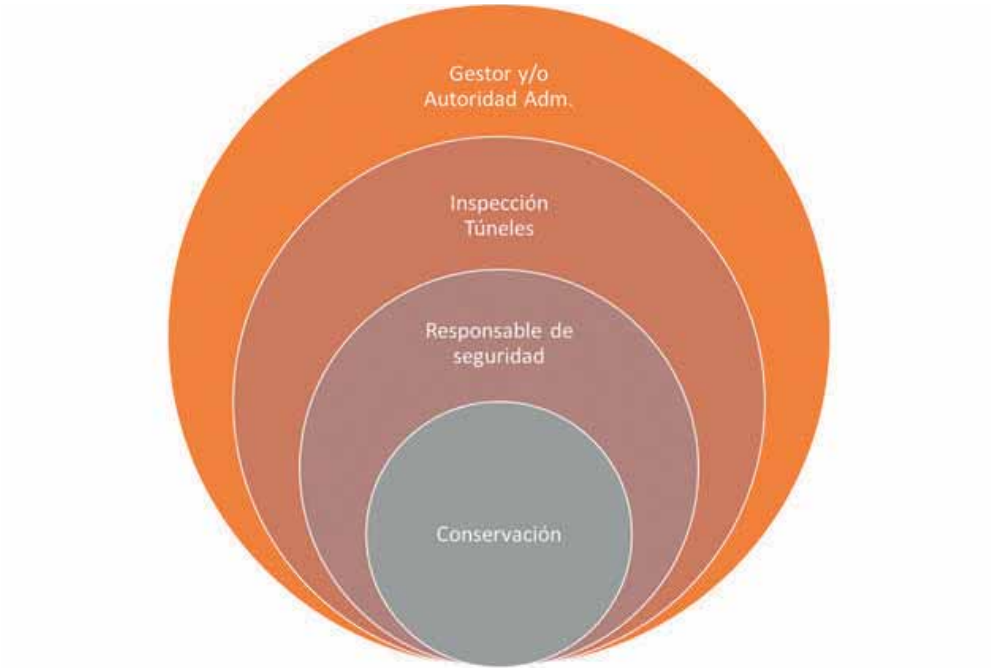


Ilustración 2 Figuras relevantes en la explotación de un túnel

Además, es imprescindible garantizar que la documentación e información almacenada es la última existente y que se ajusta fehacientemente a la realidad del túnel. El presente proyecto, que propone el desarrollo del sistema BIMEXTUNEL, nace para tratar de dar solución a todas estas necesidades y problemáticas presentes en la gestión de la explotación de túneles.

2.2 Antecedentes.

Algunas de las herramientas independientes que actualmente se disponen para la gestión de los túneles son:

2.2.1 Base de datos de inventario, incidencias e inspecciones (BIT)

BIT es una aplicación web destinada a facilitar la explotación y gestión de la información a nivel de datos de Inventarios, Incidencias e Inspecciones de los túneles de la Red de Carreteras del Estado Español

En esta aplicación, que en su versión actual se denominada BIT 2.1, se incluye un inventario completo de cada uno de los túneles, los datos relevantes de todas las incidencias significativas que se producen en los mismos, los informes y datos de avance de las inspecciones periódicas, así como documentación específica de cada túnel (manual de explotación, plan de autoprotección, proyectos, informes, fotos, videos, etc.). En la siguiente ilustración se muestra una vista de la aplicación en la que se muestran todas sus funcionalidades.

Los usuarios que mantienen actualizada la BIT 2.1 son tanto los organismos de inspección, que introducen los datos e informes de las inspecciones, como los responsables de seguridad de los túneles, que mantienen al día el inventario y el registro de incidencias ocurridas en colaboración con el personal de conservación y explotación de las carreteras.

La base de datos es consultable, además de por los anteriores, por todos los técnicos de conservación y explotación de los túneles de la Dirección General de Carreteras, tanto en la Subdirección General de Conservación como en las Demarcaciones de carreteras del Estado, de las empresas explotadores y de las sociedades concesionarias.

2.2.2 Sistema de gestión/control de las actividades de mantenimiento (GMAO)

La Gestión de mantenimiento asistido por computadora u ordenador, también conocida por las siglas GMAO, es una herramienta de software que puede ayudar en la gestión de los servicios de mantenimiento de cualquier empresa. Básicamente es una base de datos que contiene información sobre la empresa y sus operaciones de mantenimiento. Esta información sirve para que todas las tareas de mantenimiento se realicen de forma más segura y eficaz. También se emplea como herramienta de gestión para la toma de decisiones.

De esta forma, las plataformas de gestión del mantenimiento asistido por computadora pueden ser utilizadas por cualquier empresa o instalación que necesite gestionar el mantenimiento de sus equipos, activos y propiedades, siendo muy apropiadas para su aplicación en los túneles y sus instalaciones.

Sin embargo, no existe una herramienta GMAO estandarizada de aplicación a los túneles en la actualidad y, la gestión del mantenimiento de muchos de ellos se sigue realizando a través de utilidades como el Excel o el Access o sistemas de gestión muy sencillos.

2.2.3 Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA)

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) es un sistema de supervisión y control de instalaciones que realiza las funciones de adquisición de datos, control de equipos, e integración de sistemas, con una interfaz gráfica hombre - máquina, adaptada al entorno de instalaciones en túneles.

El objetivo es que el Operador del Centro de Control del Túnel pueda siempre conocer el estado de la instalación de un vistazo y actuar fácilmente sobre el sistema. Existen diferentes proveedores de esta herramienta no estando normalizado, a nivel de toda la red de túneles del Estado, las necesidades y funcionalidades que deben cubrir.

Por tanto, la misión de la nueva herramienta que propone ALAUDA será una mejora sustancial en su utilidad, al conectar los distintos sistemas a este sistema centralizado, que proporcionará nuevas funcionalidades, por lo que no sería necesario cambiar los sistemas SCADA ya presentes en los túneles, lo cual supone una eficiencia económica muy importante.

3. DESCRIPCIÓN TÉCNICA.

Este proyecto pretende diseñar y desarrollar un Sistema de Gestión de Túneles en servicio (BIMEXTUNEL), que permita compartir a través de esta herramienta colaborativa toda la información necesaria, actualizada, ordenada y accesible, así como la información generada en fases anteriores (proyecto y obra), ofreciendo nuevas funcionalidades a sus gestores.

Para ello se ha diseñado una herramienta de entorno colaborativo para gestionar las relaciones e interacciones entre los distintos agentes, así como los sistemas que vinculen la maqueta digital con la documentación que se tiene que incorporar a las aplicaciones de uso común, así como el resto de las herramientas de gestión existentes en la explotación de túneles.

En la actualidad, no existe ningún modelo o herramienta que trate de desarrollar no sólo la modelización digital, sino que aborde el trabajo colaborativo entre las distintas partes que intervienen en la gestión de un túnel, así como alcanzar un nivel de automatización y aprendizaje predictivo de cara a obtener un modelo inteligente a través del cual, tomar y ejecutar las decisiones más adecuadas a cada escenario.

Se pretende por tanto integrar en una única herramienta (SISTEMA DE GESTIÓN DE TÚNELES BIMEXTUNEL) toda la información relevante para la gestión del túnel permitiendo realizar un análisis de ésta y facilitando una toma de decisiones rápida y eficaz incluso priorizando las actuaciones a realizar durante la explotación del túnel. Este sistema debe ser capaz de aprender a lo largo del ciclo de vida del túnel, ayudando a predecir el comportamiento del mismo para facilitar el proceso de toma de decisiones).

El desarrollo propuesto busca facilitar la interoperabilidad en tiempo real entre todas las figuras que participan en la explotación y mantenimiento del túnel, así como responsabilidades y gestión de la información, estructurando los procesos entre ellos y su implicación en los mismos.

El proyecto pretende además la definición del BIM de un túnel en servicio. No obstante, y dado que el BIM es potencialmente escalable, se pretende que el mismo pueda extenderse también al resto de túneles en servicio y ampliado a los procesos de diseño y construcción de túneles.

La metodología BIM requiere el compromiso y la implicación de todos los agentes que intervienen en la explotación y mantenimiento de los túneles en servicio (suministradores de equipos, subcontratistas, empresas de conservación, responsables de seguridad, organismos de inspección, etc.).

El Sistema de Gestión de Túneles BIMEXTUNEL integra toda la información existente actualmente, desarrollando los módulos necesarios y las conexiones para vincular la maqueta digital generada con la documentación que se incorpora actualmente en la aplicación BIT y otras aplicaciones de uso común en los túneles, tal y como se explica más adelante.

Así mismo, se desarrollarán unos algoritmos que permitan predecir el comportamiento del túnel a lo largo de su ciclo de vida y calcular el Índice de Riesgo Dinámico.

3.1 Estructura general del sistema

Actualmente para la gestión de una red de túneles se utilizan tanto herramientas de alcance global (información de síntesis para toda la red de túneles) como la plataforma BIT y otras herramientas de uso localizado para la gestión de la explotación y el mantenimiento (como sistemas SCADA o GMAO) propios de cada túnel o sector de conservación.

En el Sistema de Gestión de Túneles BIMEXTUNEL, se analizan y mejoran estas herramientas existentes (BIT y SCADA), y se desarrollan otras nuevas (GMAO específico túneles, GIS y Maqueta Digital basada en BIM), realizando una integración de todas ellas que permita una mejor gestión e interpretación del conjunto de información relacionado con la gestión de la explotación de una red de túneles de carreteras, siempre teniendo como base la aplicación de la metodología BIM que permitirá, entre otras cosas, establecer roles y responsabilidades de cada interviniente en la gestión de una red de túneles e identificar y localizar inequívocamente los elementos que componen cada túnel.

Véase a continuación un esquema simple con las vinculaciones de los elementos que deberá disponer el sistema:

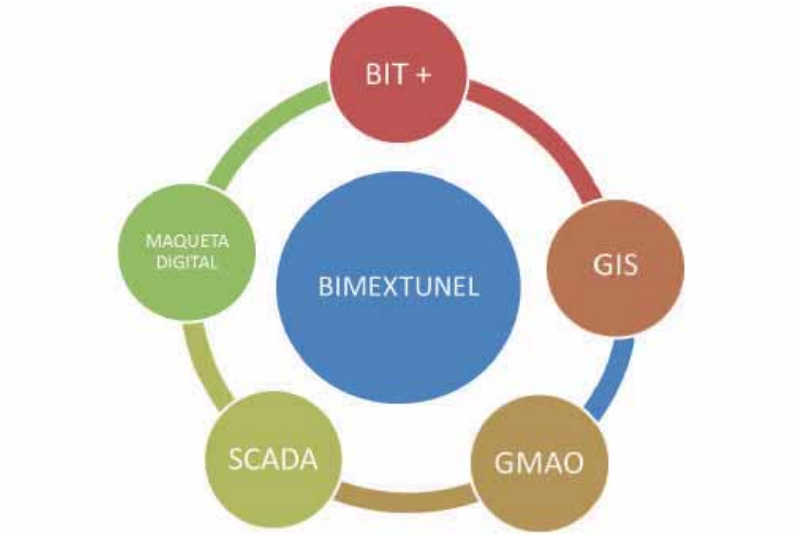


Ilustración 3 Esquema preliminar del sistema BIMEXTUNEL

Tal y como se observa en la Ilustración 3 Esquema preliminar del sistema BIMEXTUNEL, la información que debe contener y gestionar el nuevo Sistema debe ser, como mínimo, toda la relevante incluida actualmente en los siguientes componentes:

- BIT: inventario actualizado del túnel, registro de incidencias, registro de las inspecciones, base de datos actualizada y gestor documental, proyectos, informes, etc.
- SCADA: visualización de cierto datos relevantes en tiempo real y alarmas, exportación de incidencias, etc.

Además, explícitamente para el proyecto, se ha desarrollado una nueva herramienta de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO) específica para túneles que incluye toda la información necesaria para planificar y controlar el funcionamiento de un túnel y todas las funcionalidades que se describirán más adelante, como comunicaciones a través de la propia aplicación y la gestión de avisos y alarmas.

El cuarto elemento indispensable para el Sistema es el desarrollo de una herramienta basada en GIS, que constituye la base de la interface del Sistema en su parte más visual con la ubicación de los túneles, herramientas de medición, geoposición de planos, etc.

El quinto componente del esquema lo formará la Maqueta Digital de cada túnel, que será desarrollada basándose en la metodología BIM y que contendrá todos los elementos indispensables en la gestión del túnel con su codificación, tal y como se recoge en el BEP desarrollado en el proyecto (Procedimiento de Trabajo válido para el desarrollo del BIM en cualquier túnel en servicio).

Todos estos elementos deben configurar la base para el desarrollo de los algoritmos de cálculo del Índice de Riesgo para cada túnel en tiempo real, de forma que se facilite la toma de decisiones en cada uno de los túneles en explotación.

3.1.1 Condicionantes para la definición de la estructura del sistema

En el análisis inicial para la definición del sistema se identificaron las siguientes premisas que determinaron el planteamiento de la estructura global del sistema desarrollado:

- Algunas de las herramientas a integrar o compatibilizar son heterogéneas y dependientes de los criterios de gestión y explotación de cada "conservador" de un determinado túnel. Este es el caso habitual tanto de las herramientas de gestión del mantenimiento (GMAO) como de los sistemas de visualización en tiempo real y registro de la información de los sensores de la infraestructura (sistemas SCADA)
- Las herramientas existentes son utilizadas por distintos usuarios con muy distintos perfiles profesionales, y los permisos de acceso (posibilidad de consultar o de editar información de cada uno de dichos sistemas) son también muy distintos.
- La jerarquización y nomenclatura para la identificación de los diversos elementos que componen un túnel es variable y función de los criterios establecidos en cada sector de explotación. Esto dificulta la vinculación de los diversos sistemas.
- La información existente se almacena en "silos" independientes en formatos propietarios de cada plataforma y con criterios heterogéneos en cuanto a parámetros/indicadores y frecuencias de registro.
- Existen diferentes criterios para agrupar los perfiles de usuarios. A modo de ejemplo: los usuarios pertenecientes a la administración generalmente se agrupan en base a dos criterios (independientes): teniendo en cuenta la organización/división geográfica de la red en Demarcaciones y Unidades de carreteras por un lado o bien en base al tipo de trabajo desempeñado (gestión del túnel o responsables de su seguridad). Análogamente para otros actores (externos a la administración) las agrupaciones de usuarios pueden ser por distintos criterios: sector de conservación para el caso de los trabajos de conservación y explotación; o contratos de inspección para los inspectores externos.

3.1.2 Integración de los sistemas (modular vs monolítico)

Dada esta heterogeneidad en sistemas y usuarios se planteó que la integración debía pasar por disponer las piezas de manera que sean:

- Conectables unas con otras.
- Reemplazables sin afectar al resto del sistema.
- También deben permitir/facilitar el almacenamiento de un conjunto de datos mínimos para posibilitar los análisis a nivel de conjunto de información, ahora mismo muy dispersa.

Con estas premisas se planteó desarrollar un sistema modular frente a uno monolítico donde las piezas encajen entre sí de acuerdo con unos protocolos de comunicaciones y criterios de nomenclatura y jerarquización permitiendo a la vez la autonomía de funcionamiento de las distintas piezas.

La elección de enfocar el sistema como un sistema modular (loosely coupled) frente a uno monolítico (tightly coupled) plantea ventajas e inconvenientes; pero en un entorno muy distribuido, tanto geográficamente como desde el punto de vista de organismos (con sus subdivisiones) y de agentes (empresas de conservación, responsables de seguridad e inspección, etc.) que interactúan con los distintos sistemas, se considera imprescindible la capacidad de trabajar con herramientas que sean independientes pero que igualmente se puedan integrar o vincular para poder utilizarlas de manera racional pudiéndose acceder de un sistema a otro manteniendo la máxima coherencia en la organización de la información en los distintos sistemas.

Para poder disponer de un sistema modular fue fundamental la definición de:

- Diccionarios de datos que definan la información que debe estar accesible en cada sistema y como se clasifica ésta.
- Protocolos de comunicaciones/acceso de unas plataformas a otras.
- Requisitos de datos mínimos a suministrar por cada sistema y a proveer por cada sistema.
- Definición de permisos de usuarios y roles para los sistemas transversales.

3.1.3 Almacenamiento de información compartida

Independientemente de que cada sistema (de manera especial los sistemas de gestión propios de cada túnel) dispongan de sus sistemas propios de almacenamiento de la información, fue objeto principal del proyecto la definición de un Repositorio de Información Básica, es decir, un conjunto de esta información se almacena en un silo compartido por todos los sistemas.

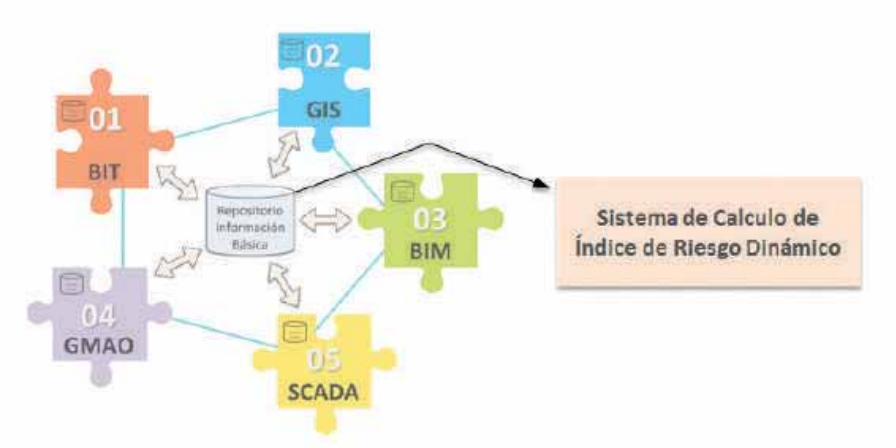


Ilustración 4 Repositorio central de información de BIMEXTUNEL

La información propia de cada sistema se almacenada por cada sistema localmente de manera independiente con el nivel de detalle requerido por el propio sistema. Pero cada sistema (o tipo de sistema) es el encargado de almacenar un subconjunto de elementos en el repositorio principal haciendo esta información disponible para su uso por el resto de los sistemas.

De igual modo este repositorio común permite escalar el sistema global de manera modular añadiendo nuevas herramientas de análisis y explotación como pueden ser el Sistema de Cálculo de Índice de Riesgo Dinámico, que puede acceder a la información almacenada de una forma homogénea para toda la red de túneles.

3.1.4 Jerarquía de los sistemas

Desde un punto jerárquico en relación con el nivel de agregación (consolidación) de la información se puede establecer el siguiente orden de información de más agregada a menos según se muestra en la siguiente ilustración.

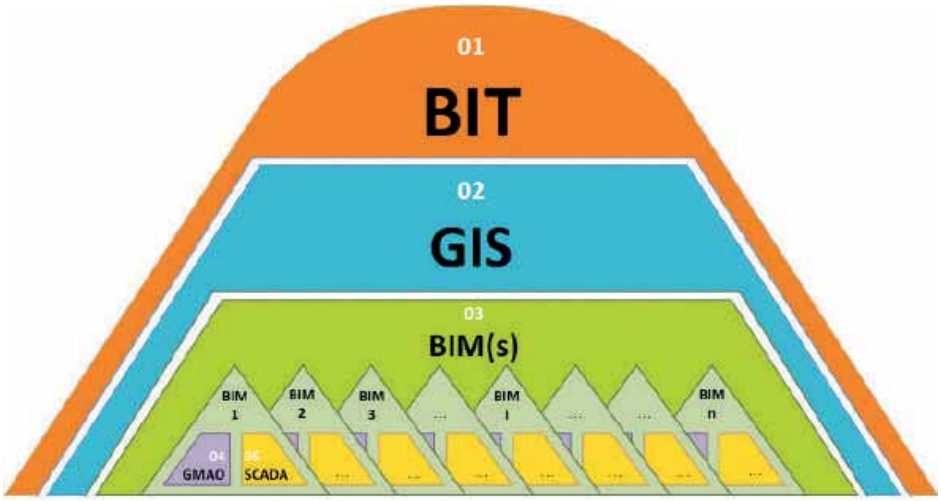


Ilustración 5 Jerarquía de los sistemas en BIMEXTUNEL

Algunos de los módulos o sistemas anteriores son transversales (se usará un mismo sistema para el conjunto de túneles de la red) y otros serán de uso específico de cada túnel o conjunto de túneles (normalmente todos los túneles asociados a un centro de control).

Los módulos transversales son: la BIT Evolucionada (datos globales de cada túnel y vínculos con herramientas); GIS (datos de detalle vinculados con GMAO y/o SCADA) y BIM (datos de detalle vinculables con GMAO y/o SCADA con visualización independiente para cada túnel pero con diccionarios estándar). Los módulos específicos serían los sistemas GMAO y SCADA.

Los sistemas anteriores almacenan y gestionan diversos tipos de información y responden a distintos usos:

- En el nivel de mayor agregación de la información se encontraría la 01. BIT: actualmente dispone de la información más agregada incluyendo las características básicas de inventario, así como el resultado de las inspecciones (informes de inspección) y otros documentos como manuales de seguridad y explotación de cada túnel. También dispone, de un registro de incidencias. Se organiza esta información relacionada con el inventario dentro de las herramientas GIS y BIM, y se independiza el análisis de dicha información desarrollando dos módulos independientes (aunque vinculados): uno de gestión documental con los resultados de inspecciones y documentos y otro de gestión y registro de incidencias.

- En segundo lugar, desde el punto de vista jerárquico se encuentra el sistema de información geográfico (02.GIS) con el inventario detallado que se vincula con los elementos gestionados a nivel de túnel mediante los sistemas locales GMAO y/o SCADA. Este sistema está íntimamente ligado al sistema de tercer nivel (03.BIM) que incluye el modelo 3D de cada uno de los túneles y es de uso transversal para todos los túneles de la red; aunque a efectos de uso y explotación se plantea que existirá un modelo BIM independiente definido para cada túnel (compartiendo criterios de diseño). En el modelo de datos del sistema de información geográfica se dispone tanto de la información básica del túnel que se transmitirá hacia la BIT como los identificadores únicos de los elementos (y su clasificación) para la conexión con los sistemas de gestión de nivel inferior jerárquicamente.
- Por último, a nivel de uso por cada gestor de cada túnel, se utilizan de manera general dos sistemas: un módulo de gestión del mantenimiento (04.GMAO) y uno de visualización/información en tiempo real (05.SCADA), cuyos protocolos de vinculación se han definido. En la actualidad, estos dos módulos son muy heterogéneos y variables existiendo diversas implementaciones para los distintos túneles. Dentro del presente proyecto se ha definido un sistema GMAO especialmente adaptado para la gestión del mantenimiento de túneles; que permite definir los protocolos de las comunicaciones entre dicho sistema "tipo" y el resto de los sistemas del proyecto BIMEXTUNEL.

3.2 Modelo de datos, categorización elementos y definición de diccionarios

Dentro de este proyecto uno de los objetivos fundamentales y a la vez uno de los retos más importantes, fue determinar el modelo de datos en el que incorporar la información mínima necesaria a compartir de los distintos sistemas. Esto implica el estudio de las necesidades de los distintos actores, y la creación de una categorización y nomenclatura de los elementos y documentos que se manipulan en la gestión de una red de túneles para definir la estructura del repositorio general.

Este modelo de datos, junto con la nomenclatura consensuada y la jerarquización de los elementos estándar para los diversos túneles de la red permitirán identificar elementos análogos en túneles gestionados con distintos criterios a la hora de realizar un análisis integral de la red gestionada.

3.3 Comunicaciones

Para poder realizar una gestión eficiente donde se mejore el flujo de información y el conocimiento sobre el funcionamiento de la infraestructura y las posibilidades de optimizar los recursos destinados a su gestión, y debido a la existencia de herramientas heterogéneas en algunos de los módulos/sistemas, se considera fundamental el definir unos protocolos de comunicación para poder vincular unos sistemas con otros.

Para la realización de las comunicaciones se definieron unas APIs de acceso tanto de lectura como de escritura de la información al repositorio general que permiten tanto la ingesta como el consumo de la información por los distintos sistemas.

Igualmente, y para poder vincular unos sistemas con otros se definieron unas nomenclaturas de URIs (uniform resource identifier) que permiten el salto de unos a otros sistemas. Estos vínculos se pueden realizar a nivel de túnel o tubo como a nivel de detalle de elementos o documentos propios de cada túnel en función de cómo requiera cada aplicación acceder a los otros sistemas vinculados.

3.4 Usuarios y control de accesos

Con carácter general se planteó que las aplicaciones/módulos más transversales (BIT, BIM y GIS) puedan compartir el sistema de control de accesos y roles para facilitar el tránsito entre uno y otro módulo sin ser necesaria la validación entre cada uno de ellos.

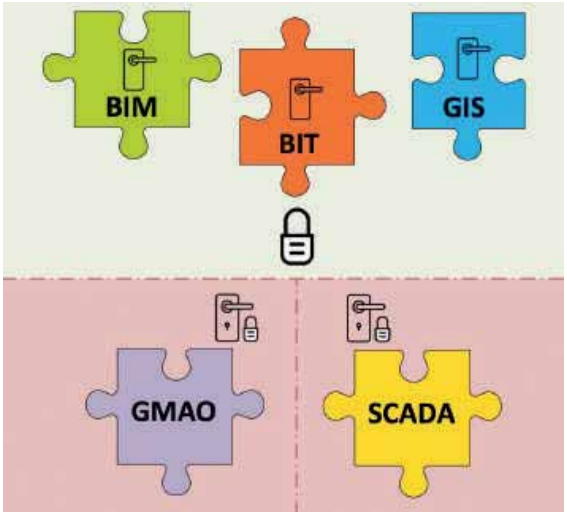


Ilustración 6. Control acceso BIM+BIT+GIS independiente de GMAO y de SCADA

Igualmente se quiere destacar, que dada la heterogeneidad de los sistemas GMAO y SCADA (que serán función de cada túnel; o sector de conservación) para el acceso a estos sistemas se dispone de una gestión de usuarios y roles propia en cada sistema y en el acceso a dichos sistemas el usuario tendrá que validarse según defina cada herramienta particular. Esto permite que la seguridad de cada sistema de gestión (GMAO) o de control de elementos (SCADA) de cada túnel esté siempre controlada por el personal más directamente involucrado en su gestión.

En el caso de los permisos y roles para el acceso a los módulos más transversales (BIT, BIM y GIS) se dispone de un sistema de usuarios con "tres dimensiones". Así se tiene:

01) Una primera "dimensión" (localización) que permite crear grupos de túneles de acuerdo a distintas agrupaciones de usuarios (normalmente ámbitos geográficos). Estos grupos pueden solaparse unos con otros (ej.: en el caso de existir túneles en el sector de Segovia SG-1, estos túneles serán también de la unidad de carreteras de Segovia y también de la Demarcación de Carreteras de Castilla y León Oriental). Inicialmente dentro de esta dimensión se plantean al menos cuatro "métodos" de agrupación:

- por Demarcaciones de Carreteras.
- por Unidades de Carreteras.
- por Sectores de Conservación.
- Otros (acceso por personal con ámbitos distintos de los anteriores).

02) Una segunda "dimensión" que define qué tipo de acceso (de lectura, de edición o de administración) se tiene en los ámbitos anteriores (ámbitos geográficos).

03) Por último se dispone de una tercera "dimensión" que define a cuáles de los sistemas se tiene acceso:

- BIT
- BIM
- GIS
- Conexión SCADA: solo se definen que vínculos existirán de un sistema a otro (pasarelas) ya que los permisos serán definidos en cada sistema para permitir/denegar el acceso.

- Conexión GMAO: al igual que con los sistemas SCADA en este caso solo se definen qué vínculos existirán de un sistema a otro (pasarelas) ya que los permisos serán definidos en cada sistema para permitir/denegar el acceso.

Con el sistema de permisos matricial; puede darse el caso de que algunos usuarios tengan, para un mismo túnel, distintos niveles de acceso (si pertenecen a varios grupos). En estos casos los permisos que prevalecerán serán aquellos que permitan mayor control (administración sobre edición y edición sobre lectura) en cada caso.

3.5 Plataforma de desarrollo y pruebas

Se describen en este apartado las diversas herramientas que se han utilizado para el desarrollo de los módulos de este proyecto.

Se han agrupado los sistemas en la plataforma software, detallando las herramientas que se utilizan en estos desarrollos; y en los requisitos hardware iniciales (estos sistemas podrán escalarse en función del volumen de la información a medida que el proyecto evolucione y se plantee la implementación a escala de red de túneles).

3.5.1 Plataforma software

Respecto del diseño del software se distinguen tres apartados fundamentales. Así, se utilizaron diversas herramientas para el:

1. Diseño de los protocolos de comunicaciones entre los módulos.
2. Diseño de los sistemas servidor (para almacenamiento de la información).
3. Diseño de la interfaz de usuario (análisis y visualización de la información).

Estos elementos/sistemas fundamentales se complementaron con el uso de otras herramientas software como las usadas para el diseño de modelos 3D o las de autenticación y autorización de usuarios.

1. Comunicaciones

Dado el carácter heterogéneo de los módulos que se integran en el presente proyecto, parte fundamental del mismo es la integración o interacción entre los diversos componentes.

Esta integración se basa en el establecimiento de unas APIs de comunicaciones que permiten enviar y recibir datos por los diversos módulos desarrollados (BIT/BIM/GIS/GMAO) y por aquellos externos (módulos SCADA y GMAO desarrollados por terceros).

Para estas comunicaciones se definen un conjunto de RESTful APIs, con unas URIs que permiten la definición de unos protocolos de intercambio claramente establecidos.

La utilización de estas APIs es internamente implementada por los diversos módulos en los lenguajes de programación en que estén desarrollados cada uno de ellos. Los que son objeto directo de este proyecto se realizan utilizando la librería KoaJS [https://koajs.com/].

2. Gestión y almacenamiento de información (servidor)

Respecto del servidor y para el almacenamiento de datos se utilizaron las siguientes plataformas software:

- Para el almacenamiento de los datos alfanuméricos de los sistemas GIS, BIM, BIT y GMAO se utiliza un gestor de base de datos relacional estándar como POSTGRESQL [https://www.postgresql.org].
- Para el almacenamiento de datos GIS se utilizará POSTGIS (extensión de POSTGRES específica para la manipulación de datos geográficos) que permite una más sencilla integración con la información alfanumérica descrita anteriormente [https://postgis.net].

- Para el almacenamiento de los modelos BIM se utilizarán directamente los ficheros estándar IFC mediante una plataforma de gestión desarrollada ad-hoc aprovechando la funcionalidad de la librería de código abierto IFC.js [https://ifcjs.github.io/info/].
- Para los datos masivos (registros de estado de sensores y/o de datos de tráfico, consumo eléctrico, etc.) que se almacenarán en el repositorio central se estudiaron varias alternativas de bases de datos para datos temporales (time series databases: TSDB) como son:
    - o TimescaleDB [https://github.com/timescale/timescaledb],
    - o InfluxDB [https://github.com/influxdata/influxdb],
    - o Prometheus/VictoriaMetrics https://github.com/VictoriaMetrics/VictoriaMetrics]
- Finalmente se utilizó TimescaleDB, que al ser una extensión de POSTGRESQL facilita la integración de las diversas herramientas y permite almacenar y gestionar en una base de datos los volúmenes de datos que pueden generar los sensores existentes en una red de túneles.
- Para el almacenamiento de datos obtenidos por sensores que generen nubes de puntos se utiliza un servidor que almacena los datos en formato piramidal como el denominado Entwine Point Tile (EPT) [https://entwine.io].

La lógica de los módulos/aplicaciones en su parte servidor se desarrolla en el lenguaje Typescript/Javascript haciendo uso de "framework" de desarrollo como Koajs.

3. Interfaz de usuario

La visualización y análisis de la información se realiza mediante aplicaciones cliente web para permitir el uso de las herramientas desarrolladas con el "mínimo coste" de instalación de aplicaciones por los usuarios. Igualmente, esto permite tener la certeza de que todos los usuarios utilizan la versión más actualizada del sistema sin necesidad de tener un control de versiones instaladas por cada cliente.

Para el desarrollo de la interfaz de usuario se desarrollaron un conjunto de módulos/aplicaciones web que permiten tanto la entrada de datos como la visualización y consulta de la información de los diversos módulos.

Estos módulos están desarrollados en javascript (haciendo uso del framework Vue.js [https://vuejs.org/]).

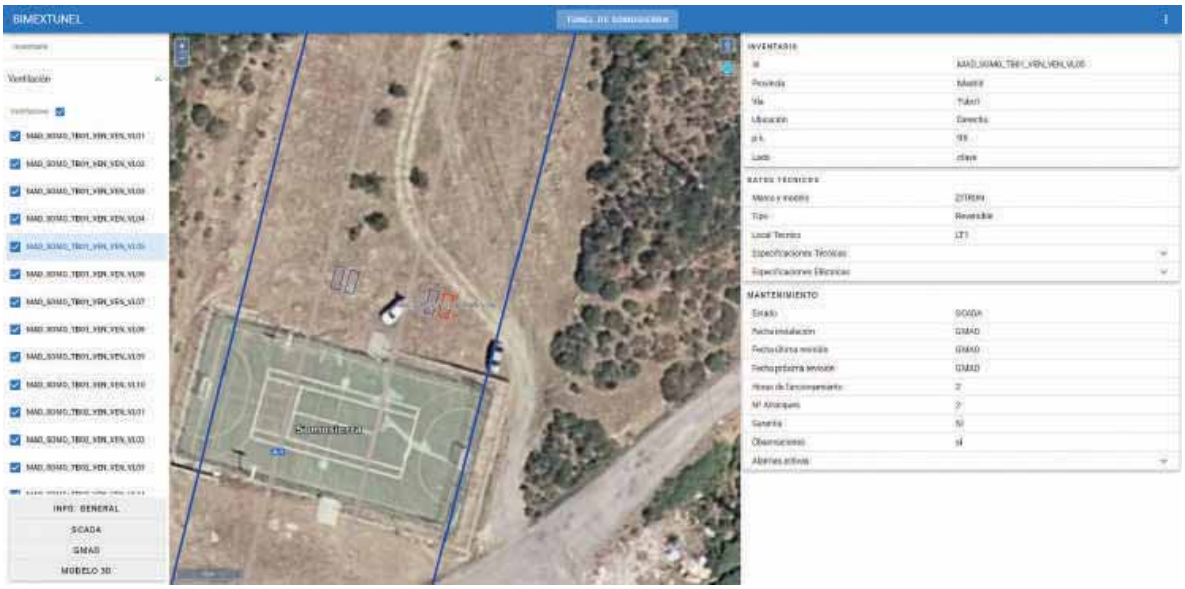


Ilustración 7. Desplegable de características de un ventilador en BIMEXTUNEL

Como herramientas específicas para estos desarrollos se utilizaron las siguientes:

- Para la visualización de los modelos BIM por los usuarios y para facilitar el vínculo desde el lado cliente se utiliza como base la librería de visualización de datos 3D THREE.JS [https://threejs.org] que permite incorporar diversos tipos de datos (modelos 3D de objetos, nubes de puntos, etc.).
- En algunos casos para visualizar información específica como nubes de puntos se utilizan herramientas como POTREEE [http://potree.org] específicamente desarrollada para la visualización de nubes de puntos y que permite la ingesta de datos almacenados en un servidor de datos EPT.
- Para la visualización de datos GIS se utilizan librerías de gestión de información geográfica OPENLAYERS [https://openlayers.org] que permiten leer datos de fuentes diversas entre ellas datos almacenados en bases de datos POSTGIS.
- Para el análisis y la visualización de los datos temporales se incorporan una herramienta específica para el análisis de series temporales de datos, GRAFANA [https://github.com/grafana/grafana].

Otros sistemas. Gestión de usuarios y diseño BIM

Para la gestión de usuarios se ha optado por el desarrollo de un sistema de gestión de usuarios, roles y permisos específico para este proyecto que permite administrarlos con la granularidad necesaria.

Igualmente, para el desarrollo del proyecto se ha empleado una herramienta software de diseño BIM que permite la generación de modelos BIM y elementos 3D. Para ello se utiliza la aplicación comercial ALLPLAN [https://www.allplan.com].

Ilustración 8. Nube de puntos y modelado 3D de elementos del túnel de Somosierra en BIMEXTUNEL

3.5.2 Plataforma Hardware

Respecto de la configuración del hardware los módulos descritos anteriormente son en general escalables a distintas configuraciones hardware en función del nivel de uso de estos.

Durante el desarrollo del sistema se han utilizado máquinas alojadas en un proveedor de sistemas/equipo en la nube que permiten la ampliación de los recursos hardware en función de las necesidades (demanda) del proyecto.

3.6 Desarrollo del Sistema de cálculo del Índice de Riesgo Dinámico

Con base en la Metodología de Análisis de Riesgo en Túneles de la Red de Carreteras del Estado (MARTE), se han desarrollado los algoritmos de cálculos necesarios para la obtención en tiempo real del Índice de Riesgo (IR) del túnel.

El IR asociado a un túnel se define como el cociente entre el Coeficiente de Riesgo del túnel Real y el Coeficiente de Riesgo del túnel virtual.

El algoritmo tiene en cuenta los escenarios más desfavorables de incendio (mayor distancia entre salidas de emergencia, mayor pendiente, etc.). Durante el proyecto se analizaron las diferentes variables que puedan intervenir, pero, finalmente, se valoró realizar la ponderación entre:

Túnel virtual

- Cumpliendo todo lo requerido en el Real Decreto 635/2006 para un túnel de sus características.
- Todos los equipos se encuentran operativos
- Para la estimación de tráfico de proyecto. Tráfico fijo
- Con condiciones atmosféricas fijas en el exterior de las bocas:
    - Viento fijo
    - Presión fija
    - Sin considerar lluvia
    - Sin considerar niebla

Túnel real

- Pudiendo no cumplir todo lo requerido en el Real Decreto 635/2006 para un túnel de sus características.
- Ciertos equipos pueden estar averiados según el reporte del SCADA o del personal de mantenimiento (GMAO)
- Tráfico en tiempo real a través de las espiras de conteo.
- Condiciones atmosféricas reales:
    - Viento variable en intensidad y sentido.
    - Presión variable
    - Se tiene en cuenta la lluvia como factor de riesgo
    - Se tiene en cuenta la niebla como factor de riesgo.

Calculado el IR, y mediante el sistema de comunicación entre los componentes de BIMEXTUNEL, se notifica este valor para hacerlo disponible a los otros sistemas. Así, por ejemplo, el sistema SCADA podrá reflejar en tiempo real esta información, realizando una labor predictiva que facilite que el operador del centro de control obtenga una percepción (lo más objetiva posible) del nivel de seguridad del túnel que le permita adelantar y asegurar la toma de decisiones.

Un valor próximo o inferior a la unidad será indicativo de que el túnel reúne unas condiciones similares a las del túnel virtual y, por tanto, aceptables. Por el contrario, un valor elevado del índice de riesgo (superior a la unidad) determinará un Coeficiente de Riesgo superior para el túnel objeto de estudio que, para el túnel virtual, que será consecuencia de unas condiciones del túnel analizado alejadas de las establecidas como seguras en la normativa aplicable.

De igual forma, según los umbrales de riesgo que se programen, se podrán elaborar, en los planes y reglas del SCADA, diferentes automatizaciones en la señalización variable, en los algoritmos de ventilación, avisos, etc., pudiendo ser ponderadas con las alarmas de otros equipos ya instalados en el túnel (DAI, detección de incendios, opacímetros…).

3.7 Selección del túnel de prueba

Para el proyecto, se marcó la premisa de que las condiciones que debería cumplir el túnel piloto para el proyecto fueran las siguientes:

- Túnel representativo de la Red de Carreteras del Estado: Interurbano.
- No debe pertenecer a ninguna concesión, es decir, que sean gestionados directamente por la DGC, puesto que así son la gran mayoría de los túneles de esta Red.
- Conviene que sea de reciente construcción, con el fin de tener acceso al proyecto as built y a toda la documentación generada desde su puesta en servicio, que servirá como fuente de información para el proyecto.
- Debe estar comprendido entre 500 y 1.000 metros de longitud para que disponga de una serie de equipamientos mínimos según Real Decreto 635/2006, que permitan validar la metodología BIM con los mismos:
    - Ventilación, Alumbrado y Suministro de energía
    - Sistemas de protección contra incendios
    - CCTV, megafonía, Centro de Control y Comunicaciones
    - Postes SOS y radiocomunicaciones
    - Señalización variable, semáforos y barreras
- Debe tratarse de un túnel de autovía (dos tubos unidireccionales), para poder dar cumplimiento a uno de los objetivos planteados (analizar la conveniencia de tratar los túneles por tubo de forma independiente o como un único conjunto de los dos tubos junto con las galerías de evacuación).

Por ello, se escogió el túnel de Somosierra en la autovía A-1, que dispone de 2 tubos unidireccionales de 620 metros de longitud cada uno y que ha sido propuesto por la Dirección General de Carreteras por su complejidad, lo que favorecerá la construcción de un modelo robusto y extrapolable.

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El proyecto se inició en febrero de 2021, desarrollándose durante 18 meses, siendo las fases en las que se dividió el proyecto las siguientes:

Actividad 1: Definición de Usos y necesidades
Tarea 1.1. Identificación de los agentes
Tarea 1.2. Identificación de las necesidades y definición USOS BIM
Tarea 1.3. Análisis y definición de datos necesarios y existentes
Tarea 1.4. Identificación y validación de herramientas existentes (modelado y gestión)
Tarea 1.5. Selección del túnel de prueba
Actividad 2: Análisis y selección de la estructura del sistema
Tarea 2.1. Definición de estructuras y módulos del Sistema
Tarea 2.2. Definición de los protocolos de comunicación entre módulos
Tarea 2.3. Diseño y establecimiento de requisitos del Repositorio de datos centralizado
Tarea 2.4. Definición del BEP (Procedimiento de trabajo en BIM) normalizado
Actividad 3: Desarrollo del Sistema de Gestión de Túneles BIMEXTUNEL
Tarea 3.1. Repositorio de datos centralizado
Tarea 3.2. Diseño y desarrollo del módulo GIS
Tarea 3.3. Análisis de requerimientos y desarrollo de la maqueta digital (BIM)
Tarea 3.4. Desarrollo de una BIT evolucionada
Sub-Tarea 3.4.1 Desarrollo de la Herramienta de Gestión de Incidencias
Sub-Tarea 3.4.2 Desarrollo de la herramienta de Gestión Documental
Tarea 3.5. Diseño y desarrollo del GMAO específico de túneles
Tarea 3.6 Desarrollo del prototipo funcional de los protocolos de comunicación entre módulos
Tarea 3.7. Diseño y desarrollo de un Workflow Management System
Tarea 3.8. Diseño y desarrollo de la interfaz y gestión de usuarios
Actividad 4: Análisis predictivo de datos
Tarea 4.1. Análisis de información
Tarea 4.2. Definición de la estrategia de evaluación del Índice de Riesgo
Tarea 4.3. Desarrollo de los algoritmos de cálculo
Actividad 5: Evaluación del sistema
Tarea 5.1. Validación de los desarrollos
Tarea 5.2. Análisis de la extrapolación de los resultados

Todos los desarrollos llevados a cabo en el proyecto se han implementado y evaluado simulando las condiciones de un túnel real (túnel de Somosierra), en su gestión y explotación habitual, verificando que los resultados obtenidos se ajustan a los objetivos del proyecto. En concreto se ha comprobado:

- La agilidad y efectividad del sistema independientemente del número de elementos de un túnel.
- La conexión entre los diferentes módulos.
- La existencia y accesibilidad de toda la información identificada como necesaria.
- La facilidad de acceso y representación del módulo GIS.
- La capacidad del GMAO para servir de herramienta a la ejecución de mantenimiento preventivo.
- La rapidez de conexión y capacidad de extraer los datos relevantes seleccionados del SCADA a través de los sistemas de comunicación desarrollados.
- La eficacia del gestor documental y de la herramienta de gestión de incidencias.
- El funcionamiento del Workflow Management System
- Validación de los algoritmos para el cálculo del Índice de Riesgo Dinámico.

Tras los resultados satisfactorios obtenidos en el proyecto BIMEXTUNEL, se considera que la solución desarrollada es replicable, mediante los patrones identificados que permitan extrapolar la metodología a cualquier túnel en servicio y a cualquier red de túneles de una Administración. Estos patrones y conclusiones obtenidas con BIMEXTUNEL, pueden ser el punto de partida a los requerimientos necesarios a incluir en pliegos futuros de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, relacionados con la gestión de túneles en servicio (pliegos de conservación integral, responsables de seguridad e inspecciones periódicas.) con el fin de implementar/escalar los resultados del presente proyecto sobre un túnel al nivel de la red de túneles de carreteras del Estado.

La necesidad de contar con una metodología de trabajo colaborativo que englobe todas las actividades y agentes involucrados en la explotación de un túnel, con figuras desconocidas en el resto de la carretera (director de explotación, responsable de seguridad, inspector, etc.) así como otros elementos también distintos de la carretera como análisis de riesgos, simulacros periódicos, etc. ha motivado el planteamiento de la presente propuesta. La cual, tiene como principal objetivo mejorar la gestión, seguridad y eficiencia de los túneles de la Red de Carreteras del Estado mediante el estudio, análisis y desarrollo de diferentes soluciones, dentro de la metodología BIM, en la explotación de los mismos e integración en un único sistema de gestión de toda la información relevante para la gestión del túnel permitiendo realizar una toma de decisiones rápida y eficaz por cada uno de los agentes implicados en dicha gestión. De esta forma, se espera obtener un salto tecnológico significativo que nos acerque al concepto de "Gestión inteligente de infraestructuras".

La metodología que actualmente se emplea en la explotación y conservación de túneles de la red de carreteras sigue siendo muy "manual", con mucha impresión de documentación, comunicaciones vía personal, telefónica y mail, así como herramientas de trabajo basada en documentos muy básicos (como, por ejemplo, hojas Excel). Dada la complejidad comentada, esta metodología plantea problemas e ineficiencias en la coordinación de los diferentes agentes y manejo de la información actualizada. Es por ello, que se pretende con este proyecto crear un sistema que integre un modelo digital del túnel y un entorno colaborativo común que redunde en una mejora muy significativa de la metodología de trabajo hasta ahora empleada. Con la creación de este modelo BIM de explotación de túneles, se pretende dar un importante paso hacia la digitalización del mantenimiento de los túneles, beneficiándose de centralizar toda la información y disponer de ella de forma mucho más accesible, siempre actualizada y fiable, lo que redundará en una mayor eficiencia en la gestión de los recursos públicos.

¿ESTÁN LOS TÚNELES PREPARADOS PARA EL TRÁNSITO DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS Y CONECTADOS?

Vicente Sebastián Alapont
Director de Ingeniería y Proyectos
ETRA

La llegada de los vehículos autónomos y conectados es una realidad, y es necesario establecer las bases o el marco en el que se pueda establecer una cooperación entre el túnel como infraestructura, y el vehículo conectado.

Pese a que las tecnologías se van consolidando, todavía parece temprano establecer especificaciones concretas para el contexto de los túneles, cuando todavía no están completamente normalizados ni los sistemas a desplegar en las infraestructuras, ni las tecnologías a incorporar en los vehículos.

Debemos asumir en cualquier caso que el túnel es un elemento que forma parte de una red viaria, y por tanto las tecnologías que se implanten en él, deberían estar en armonía con las de dicha red. Sin embargo, también se da la circunstancia de que el túnel es un tramo con unas características constructivas bien conocidas, altamente sensorizado a partir de ciertas longitudes, con equipamientos de seguridad y control normalizados, y con infraestructuras de comunicaciones que dan conectividad a todos estos elementos; lo que facilitará sin duda el despliegue de servicios cooperativos.

En este artículo, se analiza el estado del arte de los sistemas cooperativos desde la parte de las infraestructuras y sistemas de control de los túneles, así como las tecnologías que incorporan los vehículos para la conducción autónoma y conectada.

ARE TUNNELS READY FOR THE TRANSIT OF AUTONOMOUS AND CONNECTED VEHICLES?

The advent of the autonomous and connected vehicles is a fact, and it is necessary to establish the framework to establish the cooperation of the tunnel, as infrastructure, and the connected vehicle.

Although the technologies are consolidating, it still seems early to establish specific specifications for the tunnel context, when neither the systems to be deployed in the infrastructures nor the technologies to be incorporated in the vehicles are yet fully standardized.

We must assume in any case that the tunnel is an element that is part of a road network, and therefore the technologies that are implemented in it, should be in harmony with those of said network. However, there is also the circumstance that the tunnel is a section with well-known construction characteristics, highly sensorised from certain lengths, with standardized safety and control equipment, and with communications infrastructures that provide connectivity to all these elements. This will certainly facilitate the deployment of cooperative services.

This paper analyses the state of the art of the cooperative systems both from the infrastructure and tunnel' control systems, but also from the technologies the vehicles incorporate for autonomous and connected driving.

LES TUNNELS SONT-ILS PRÉPARÉS AU TRANSIT DES VÉHICULES AUTONOMES ET CONNECTÉS?

L'arrivée des véhicules autonomes et connectés est une réalité, et il est nécessaire d'établir les bases dans lequel la coopération entre le tunnel en tant qu'infrastructure et le véhicule connecté pourra s'établir.

Si les technologies se consolident, il semble encore trop tôt pour établir un cahier des charges spécifique au contexte des tunnels, alors que ni les systèmes à déployer dans l'infrastructure ni les technologies à intégrer dans les véhicules ne sont encore complètement standardisés.

Dans tous les cas, nous devons supposer que le tunnel est un élément faisant partie d'un réseau routier, et donc les technologies qui y sont mises en œuvre doivent être en harmonie avec celles dudit réseau. Cependant, il y a aussi la circonstance que le tunnel est une section aux caractéristiques de construction bien connues, hautement sensorielle après certaines longueurs, avec des équipements de sécurité et de contrôle standardisés, et avec des infrastructures de communication qui assurent la connectivité à tous ces éléments. ; ce qui facilitera sans aucun doute le déploiement des services coopératifs.

Dans cette communication, l'état de l'art des systèmes coopératifs est analysé du point de vue des infrastructures des tunnels et des systèmes de contrôle, ainsi que des technologies que les véhicules intègrent pour la conduite autonome et connectée.

INTRODUCCIÓN

La digitalización de la sociedad es un hecho indiscutible y está introduciendo nuevos paradigmas en todos los sectores, tanto a nivel personal como profesional. Esto se aprecia de forma muy clara en lo referente a la movilidad de las personas y las mercancías. Se están adoptando nuevas formas de movilidad personal, hay una tendencia de cambio hacia formas de propulsión con menor impacto ambiental, y las tecnologías emergentes están ya presentes en todas las etapas de la movilidad, desde la planificación de los desplazamientos, la información en tiempo real durante los mismos, la operación y gestión de las infraestructuras, y la explotación de toda la información generada.

En este contexto, este artículo invita a reflexionar sobre si los túneles están preparados para la circulación de los vehículos autónomos y conectados a través de ellos, y las posibles formas de interacción entre los vehículos y la infraestructura.

Pese a que las tecnologías en torno a los vehículos autónomos y conectados se van consolidando, todavía parece temprano establecer especificaciones concretas para su interacción en el contexto de los túneles, cuando todavía no están completamente normalizados ni los sistemas a desplegar en las infraestructuras, ni las tecnologías a incorporar en los vehículos.

Debemos asumir en cualquier caso que el túnel es un elemento que forma parte de una red viaria, y por tanto las tecnologías que se implanten en él, deberían estar en armonía con las de dicha red. Sin embargo, también se da la circunstancia de que el túnel es un tramo con unas características constructivas bien conocidas, altamente sensorizado a partir de ciertas longitudes, con equipamientos de seguridad y control normalizados, y con infraestructuras de comunicaciones que dan conectividad a todos estos elementos; lo que facilitará sin duda el despliegue de servicios cooperativos.

ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS COOPERATIVOS Y LA CONDUCCIÓN AUTÓNOMA

Existe una bibliografía muy extensa sobre los sistemas cooperativos y los vehículos autónomos y conectados, fruto del trabajo que se está realizando por parte de todos los actores interesados. Dada la complejidad de este asunto, existen muchas líneas de actividad que se centran en aspectos tanto tecnológicos como políticos, operacionales o sociales. Instituciones públicas y privadas están dedicando gran cantidad de recursos a definir los marcos regulatorios que faciliten la llegada al mercado de los vehículos autónomos y conectados (en adelante VAC), y el desarrollo de las tecnologías que lo hagan posible, tanto en el lado del vehículo como en el de las infraestructuras.

En particular, en el ámbito de la conducción autónoma en túneles, existe gran cantidad de material de base para analizar, en el contexto de las vías a cielo abierto, y será necesario especificar los requerimientos básicos que habría que tener en cuenta a la hora de desplegar soluciones para la comunicación entre los vehículos que circulan por un túnel y los sistemas de gestión de esta infraestructura.

Este material está formado por documentos, en su mayoría provenientes de grupos de estandarización y de consorcios que están desarrollando o han desarrollado proyectos de investigación y desarrollo, y pruebas piloto en el ámbito del vehículo conectado.

Pero antes de entrar en el componente técnico, es importante identificar los grandes grupos de interés implicados. En el lado de las instituciones públicas, organismos como la Unión Europea, Agencias Gubernamentales de diferentes países, organizaciones internacionales como PIARC, universidades e institutos de investigación, han dedicado y dedican recursos a proyectos, grupos de trabajo y estudios. Por su parte el sector privado, liderado indiscutiblemente por el sector de la automoción, ha creado consorcios y alianzas centradas principalmente en el desarrollo de las tecnologías que doten a los vehículos con la capacidad de circular de

forma autónoma, así como de las tecnologías de comunicaciones que faciliten la interacción de esos vehículos con su entorno de forma segura, ya sean infraestructuras u otros vehículos.

Como cualquier tecnología que se encuentra en desarrollo, existen unas líneas de actividad que se van consolidando y otras que no llegan a resultados aplicables, pero en cualquier caso todas contribuyen a la generación de lecciones aprendidas que culminarán en el despliegue de entornos maduros y seguros de conducción autónoma.

La Asociación Mundial de la Carretera, PIARC, en su informe "Vehículo Conectado. Desafíos y oportunidades para los operadores de tráfico y carretera" [1] realiza un análisis de las implicaciones del despliegue de las tecnologías que permitan interconectar los vehículos con las infraestructuras, considerando aspectos como la seguridad vial, las obras en las infraestructuras, la comunicación con el usuario, los factores que afectan al diseño de las carreteras, incluso con análisis coste-beneficio para acometer estos despliegues, llegando a la conclusión de que la mejor manera de empezar a implementar este tipo de soluciones es hacerlo de forma gradual a través de proyectos piloto que vayan validando las tecnologías y servicios disponibles, para poder tomar decisiones y continuar avanzando.

Un aspecto fundamental para el despliegue del VAC es la conectividad, donde el intercambio de datos entre los vehículos y con las infraestructuras, se realice de forma segura. Para ello ya se han desarrollado marcos normativos para, por ejemplo, definir el uso armonizado del espectro radioeléctrico que utilizan todos los equipamientos involucrados para intercambiar información. En este sentido, la Comisión Europea publicó la Decisión de Ejecución (UE) 2020/1426 de la comisión de 7 de octubre de 2020 relativa al uso armonizado de espectro radioeléctrico en la banda de frecuencias 5 875-5 935 MHz para aplicaciones relacionadas con la seguridad de los sistemas de transporte inteligentes (STI) y por la que se deroga la Decisión 2008/671/CE [notificada con el número C(2020) 6773] [2].

Así mismo, con el objeto de establecer un marco en apoyo de la implantación y el uso coordinados y coherentes de sistemas de transporte inteligentes (STI) en la Unión Europea, la Comisión publicó em 2010 la Directiva Europea sobre Sistemas Inteligentes de Transporte [3] prestando atención específica a la conexión del vehículo a la infraestructura de transporte. Directiva que fue complementada en 2019 con seis anexos que la complementan y amplían.

En este sentido, la DG MOVE publicó el año 2016, un informe que contiene un estudio y análisis a través de casos concretos sobre la forma en que los sistemas cooperativos pueden contribuir a alcanzar los objetivos de mejora de la eficiencia del transporte de la Comisión Europea [4].

En lo referente a la conectividad, el consorcio CAR 2 CAR publicó en 2020 un documento "Position Paper on Road Safety and Road Efficiency Spectrum Needs in the 5.9 GHz for C-ITS and Cooperative Automated Driving" [5] que expresa su postura en cuanto a las necesidades de los sistemas cooperativos para soportar la conducción automatizada. CAR 2 CAR es una asociación no comercial impulsada por la industria, que fue fundada en 2002 por fabricantes de vehículos que trabajan en el desarrollo de comunicaciones de vehículo a vehículo (V2V) y vehículo infraestructura (V2I). Actualmente está compuesto por 73 miembros, con 12 fabricantes de vehículos, 33 proveedores de equipos y 28 organizaciones de investigación.

Una contribución muy importante para definir el marco de los sistemas cooperativos proviene, como ya se ha mencionado, de proyectos de Investigación y Desarrollo financiados por la Unión Europea y otras administraciones públicas.

A nivel Europeo las Plataformas C-ITS y C-ROADS son las que han jugado un papel más determinante.

La Plataforma C-ITS desarrolló recomendaciones y propuestas de políticas de actuación de la Comisión, así como de otros actores relevantes en la cadena de valor de C-ITS. En su informe final [6] desarrolló una visión compartida sobre el despliegue interoperable de Sistemas de Transporte Inteligente Cooperativos (C-ITS) hacia la cooperación, conectada y movilidad automatizada (CCAM) en la Unión Europea.

El informe aborda los marcos técnicos y legales necesarios para el despliegue de C-ITS y que se agrupan en el apoyo para el despliegue de C-ITS por una parte y en las necesidades y posibilidades de niveles superiores de automatización por otra parte, para ir más allá de C-ITS, hacia la Movilidad Conectada, Cooperativa y Automatizada (CCAM).

Por su parte, la Plataforma C-ROADS, formada por los Estados Miembros de la UE, trabaja en el despliegue de C-ITS armonizados e interoperables en Europa. La Plataforma C-ROADS busca la cooperación entre los Estados Miembros para cuestiones relacionadas con la armonización en el despliegue de los servicios C-ITS, así como compartir experiencias y conocimientos o su aceptación por parte del usuario.

Atendiendo a los diferentes aspectos que intervienen y deben tenerse en cuenta para garantizar una implantación consistente de estos sistemas, en el marco de C-ROADS se ha elaborado la definición de los servicios y casos de uso [7], las especificaciones funcionales para la comunicación entre los equipos de campo y los vehículos [8], el análisis de las estructuras legales y organizacionales necesarias para dar soporte a estos servicios [9], la forma en la que deben estructurarse los mensajes para el intercambio de información [10], las especificaciones para las comunicaciones móviles [11], así como la implementación de una serie de Pilotos que han validado diferentes servicios.

Si bien el foco de estas plataformas es generalista a nivel de servicios C-ITS y de aplicación a las redes viarias a cielo abierto, o al menos sin particularizar al ámbito de los túneles, si que es posible utilizarlas como marco general y punto de partida para identificar y diseñar las especificaciones particulares para poder implementar los servicios C-ITS en el contexto de los túneles.

En el caso concreto de los túneles, el documento "Cooperative ITS for Safer Road Tunnels: Recommendations and Strategies. Final Report" [12], realizado en el contexto del proyecto "ITS Solutions for Safe Tunnels" desarrollado por la administración sueca y cofinanciado por la red transeuropea de transporte (TEN-T), contiene un estudio sobre el impacto que el uso de sistemas cooperativos puede tener en la mejora de la seguridad en los túneles del Bypass de Estocolmo que se encuentran en fase de construcción.

Otro aspecto en el que también se han desarrollado proyectos, es el de la clasificación de las infraestructuras viales en función de su capacidad para soportar la circulación de vehículos autónomos y conectados. El proyecto INFRAMIX (Road INFRAstructure ready for MIXed vehicle traffic flows) postula la necesidad de disponer de una clasificación de infraestructuras (tipos de vías) en función de su capacidad para interactuar con vehículos y usuarios, y propone una clasificación en función de dicha capacidad [13]. Esta clasificación se reconoce bajo el nombre ISAD (Infrastructure Support for Automated Driving) y establece cinco niveles en función del nivel de digitalización de las vías o sus tramos:

ISAD E. Son las carreteras convencionales, sin datos digitales que puedan ofrecer soporte a la circulación del vehículo autónomo, de manera que éste debe circular en base a la información que pueda captar él mismo sobre las condiciones de la vía y su señalización, a través de sus propios sensores.

ISAD D. Son aquellas vías o tramos sobre los que existe un mapa en formato digital, con información de la sección de la vía y de la señalización vertical y horizontal fijas, y que puede ser descargado al vehículo con antelación a su tránsito por la vía. Aquí el vehículo seguirá necesitando detectar situaciones dinámicas por sus propios medios, como el estado de los semáforos, la señalización variable, el estado del tráfico o las condiciones meteorológicas.

ISAD C. En este nivel, la vía o el tramo son capaces de ofrecer información digital de manera dinámica y en tiempo real. Por ejemplo, información de incidentes, condiciones meteorológicas, etc., que está disponible para ser recibida por los vehículos, utilizando el estándar DATEX II.

ISAD B. Cuando la vía está suficientemente equipada para detectar y evaluar las condiciones del tráfico a nivel microscópico y trasmitirlas a los vehículos. En este tipo de vías deben existir sistemas ITS suficientemente avanzados para permitir que la misma infraestructura pueda reaccionar y adaptarse a las condiciones del tráfico y a su vez transmitirlas a los vehículos a través de infraestructuras de comunicación infraestructura-vehículos (I2V) mediante protocolos estándar.

ISAD A. Se trata del nivel más avanzado de digitalización, en el que la infraestructura es capaz de organizar y guiar el flujo de los vehículos. Para ello debe disponer de un catálogo de servicios avanzados y las infraestructuras de comunicación deben ser capaces de soportar el intercambio de información necesario.

Avanzando en esta misma línea, PIARC lanzó en el año 2021 el Proyecto Especial en Clasificación de Carreteras Inteligentes [14] para la definición de una metodología que permita la clasificación de las carreteras (incluidas vías urbanas), de manera que se tengan en cuenta, además de las características relativas a la infraestructura, su capacidad para recibir los nuevos vehículos conectado y autónomos.

Por otra parte, en el proyecto CAPITAL (Collaborative cApacity Programme on Its Training-educAtion and Liaison) [15] se realizó una recopilación del conocimiento de los sistemas ITS y C-ITS desde ocho perspectivas:

- Servicios a usuarios ITS y C-ITS.
- TMC y tecnologías para equipos de campo ITS.
- Tecnologías de comunicación para ITS y C-ITS, incluidos los estándares pertinentes.
- Evaluación del impacto de sistemas ITS y C-ITS .
- Incentivos financieros, modelos de negocio y modelos de adquisiciones para el despliegue de C-ITS.
- Análisis de costo-beneficio de los servicios ITS.
- Orientación en la implementación de ITS y C-ITS.
- Protección de datos y privacidad.

El factor humano también ha sido objeto de análisis en el proyecto TransAID, implementado en el Programa H2020, y que aborda la problemática de los vehículos autónomos cuando por razones operativas o de infraestructura, deben pasar a un modo de operación manual por parte de un humano o bien a un modo seguro de operación de mínimo riesgo. En esas situaciones, en las que existe un impacto sobre el resto de vehículos, e incluso muchos vehículos autónomos cambiando de estado, se requieren una serie de medidas especiales de intercambio de información entre los vehículos y la infraestructura [16].

Adicionalmente, organismos de normalización como ISO o ETSI, están trabajando en esta línea. En el caso de ISO, ha publicado un documento [17] que proporciona información actualizada sobre la estandarización e implementación global en el dominio de los sistemas de transporte inteligentes (ITS), con un enfoque en los sistemas de transporte inteligentes cooperativos (C-ITS), que sirve como guía para los diseñadores de sistemas C-ITS y para la implementación de C-ITS. Además, existe un grupo de documentos de trabajo confeccionados conjuntamente con el CEN sobre aspectos como la clasificación y gestión de aplicaciones ITS [18], los roles y responsabilidades en los sistemas cooperativos [19] o los requisitos que deben cumplir los interfaces de comunicación [20].

Por su parte ETSI ha publicado especificaciones de los servicios ITS relacionados con la infraestructura para respaldar la comunicación entre los equipos ITS y los usuarios de estos, ya sean vehículos, peatones, etc. [21], especificaciones para las aplicaciones de riesgo de colisión en intersección [22], o diccionarios de datos para las capas de aplicación e instalaciones [23].

CONSIDERACIONES SOBRE LOS SERVICIOS ITS COOPERATIVOS

Tras el análisis del estado del arte de los sistemas cooperativos, es evidente que, aunque existen soluciones tecnológicas, normativas y organizacionales que permiten su aplicación en casos puntuales, todavía queda un proceso de desarrollo y armonización para su despliegue a gran escala.

Se han definido tres grupos de servicios que facilitan el desarrollo de pilotos para su validación y consolida-

ción. Por una parte, están los llamados servicios de Día 1, que se centran en el intercambio de información que mejoren la conducción. Los servicios de Día 2 mejoran la calidad del servicio y comparten información de percepción y toma de decisiones. Por último, los servicios de Día 3 añaden servicios más sofisticados como compartir intenciones, apoyo a la negociación y la cooperación que facilite el camino hacia una conducción automatizada cooperativa y sin accidentes.

Actualmente los servicios de Día 1 son los que están siendo implementados y validados en pilotos, mientras que los servicios de Día 2 y Día 3 todavía se encuentran en fase de investigación y desarrollo.

Dentro de los servicios Día 1, se ha producido una segmentación, entre los que se denominan servicios de Día 1 y servicios de Día 1.5. Los de Día 1 están más relacionados con alertas y sistemas de seguridad, mientras que los de Día 1.5 ya incorporan información relacionada con servicios de movilidad.

La siguiente tabla muestra los servicios de ambos tipos.

Servicios Día 1	**Servicios Día 1.5**
• Vehículos lentos o parados y advertencia de retenciones próximas. • Aviso de obras en la carretera. • Condiciones climatológicas. • Luz de frenado de emergencia. • Aviso de aproximación de un vehículo de emergencia. • Notificaciones de otros peligros. • Señalización del vehículo. • Límites de velocidad del vehículo. • Incumplimiento de señal / seguridad en Intersección. • Solicitud de prioridad semafórica por parte de los vehículos autorizados. • Advertencia de velocidad óptima de semáforo en verde (GLOSA. Green Light Optimal Speed Advisory) • Sondeo de datos del vehículo (PVD. Probe Vehicle Data)	• Información de estaciones de repostaje y de carga para vehículos de combustible alternativo • Gestión e información de aparcamiento On Street. • Información de aparcamiento Off Street. • Información Park & Ride. • Navegación conectada y cooperativa dentro y fuera de la ciudad. • Información de tráfico y Smart routing.

Como ya se ha indicado, estos servicios tienen un planteamiento generalista, con lo que, para el caso de implementar servicios de este tipo en el contexto de los túneles, lo primero que habría que hacer es seleccionar aquellos que sean de aplicación en el contexto de un túnel y sean específicos de para facilitar la conducción a través de él.

En principio se podría pensar en que los servicios de Día 1 relacionados con las alertas y la seguridad, podrían ser los candidatos a ser implementados, sin embargo, los de Día 1.5 también podrían ser de interés en redes de túneles (urbanos) en los que esta información puede ser de utilidad para el viajero.

CONSIDERACIONES SOBRE LA CONDUCCIÓN AUTÓNOMA

Los vehículos autónomos se han venido desarrollando de forma independiente de las infraestructuras, hasta que los sistemas ITS y los de telecomunicaciones han alcanzado las prestaciones necesarias para facilitar la circulación de este tipo de vehículos por las vías públicas.

En entornos industriales y mineros ya operan vehículos autónomos en entornos controlados y con funciones muy concretas. Sin embargo, en el sector del transporte y la circulación por vías urbanas e interurbanas, el hecho de que los vehículos autónomos puedan circular libremente se encuentra en una fase muy temprana.

La Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE por sus siglas en inglés) ha definido una clasificación asociada a la capacidad de conducción autónoma de los vehículos, asignando el nivel 0 a los vehículos que únicamente pueden ser conducidos manualmente, y el nivel 5 a los que tienen una capacidad de conducción autónoma completa:

Nivel 1: Conducción asistida. El vehículo incorpora sistemas de ayuda a la conducción que pueden actuar longitudinal (por ejemplo, velocidad de crucero dinámica) o lateralmente (por ejemplo, mantenimiento de carril), pero no de forma simultánea, debiendo el conductor mantener el control de la conducción.

Nivel 2: Conducción autónoma parcial. En este nivel el vehículo incorpora sistemas que controlan el movimiento del vehículo longitudinal y lateralmente de forma simultanea, aunque sigue requiriendo el control por parte del conductor.

Nivel 3: Conducción autónoma condicionada. Aunque se sigue requiriendo la presencia del conductor, el vehículo incorpora sistemas que permiten automatizar más tareas además del control longitudinal y lateral como, el control de la dirección o la respuesta ante la detección de objetos.

Nivel 4: Conducción autónoma alta. El vehículo es capaz de circular sin ningún tipo de intervención humana, incorporando todos los sistemas necesarios para la navegación y la seguridad de la conducción, y de los procedimientos para pasar el control al conductor cuando esto sea necesario.

Nivel 5: Conducción autónoma completa. En este nivel los vehículos pueden circular de forma completamente autónoma, incluso prescindiendo de los elementos de control tradicionales como los pedales o el volante.

Un factor que hay que tener en cuenta es que todavía es muy reducido el número de tipos de vehículos que alcanzan los niveles 4 y 5 de conducción autónoma. De hecho, el informe Litman sobre las predicciones de implementación de los vehículos autónomos [24], estima que la penetración de los vehículos autónomos tardará varias décadas hasta alcanzar un grado de saturación en el que cualquiera que lo desee pueda tener un vehículo autónomo, tal y como recoge la siguiente tabla extraída del informe.

Estado	Década	Nuevas ventas	Flotas	Transporte
Desarrollo y pruebas	2020s	0%	0%	0%
Disponible con un precio elevado en gamas altas	2030s	2-5%	1-2%	1-4%
Disponible con un precio moderado en gamas altas	2040s	20-40%	10-20%	10-30%
Disponible con un precio mínimo en gamas altas	2050s	40-60%	20-40%	30-50%
Funcionalidad estándar incluida en la mayoría de los vehículos	2060s	80-100%	40-60%	50-80%
Saturación (asequible para quien lo desee)	2070s	?	?	?
Requisito para todos los vehículos nuevos y en operación	?	100%	100%	100%

Es importante matizar que existen dos tipos de conducción autónoma: la conducción autónoma libre, que utiliza exclusivamente los sensores que incorpora el vehículo, y la conducción autónoma centralizada, que en base a la ubicación del vehículo y la información proporcionada por las infraestructuras y sistemas de gestión de la movilidad, se va enviando información al vehículo quien toma las decisiones correspondientes.

En ambos casos el hecho de disponer de infraestructuras viales inteligentes y bien acondicionadas, puede acelerar el despliegue de estos vehículos, ya que aunque dispongan combinaciones de tecnologías avanzadas para el posicionamiento del vehículos en la vía (GPS, lidar, analítica de video,…), lectura de las señales, o incluso comunicaciones con otros vehículos, el disponer de información local y en tiempo real del estado de la infraestructura y del tráfico, puede contribuir sin duda a mejorar la eficiencia y seguridad de sus desplazamientos. Esto implica evidentemente realizar una modernización de las infraestructuras viales para convertirlas en carreteras, túneles o calles inteligentes.

En lo referente a la relación entre los vehículos autónomos y las infraestructuras existe un aspecto a tener en cuenta: aunque el vehículo tenga la capacidad de circular de forma autónoma, si la infraestructura no lo permite, el vehículo deberá pasar el control al conductor (en los niveles SAE más bajos) o detenerse de forma segura en los espacios habilitados para ello. En el caso de infraestructuras inteligentes, deberán tener la capacidad de comunicar esas situaciones a los vehículos, y cuando éstos circulen por vías convencionales, dependerán de sus propios sistemas de sensorización o de recibir información desde sistemas centralizados.

CONSIDERACIONES SOBRE LA CONDUCCIÓN AUTÓNOMA EN TÚNELES

Los túneles son infraestructuras viales con características singulares tanto a nivel constructivo como de equipamiento, gestión, operación y mantenimiento. Como infraestructuras viales les aplican todas las consideraciones relativas a los servicios ITS y a la conducción autónoma y conectada. Sin embargo, es posible identificar restricciones y ventajas derivadas de sus singularidades.

En lo relativo a las restricciones, la principal es la dificultad para geoposicionar con exactitud el vehículo dentro del túnel, por la falta de señal GPS directa. Sin embargo, esta limitación ya ha sido resuelta en proyectos piloto que han probado diferentes soluciones como el uso del cable de telefonía radiante, telefonía 5G o radiobalizas.

En lo referente a las ventajas, los túneles cuentan con trazados bien definidos por lo general, las condiciones ambientales y de iluminación en su interior son normalmente constantes, a partir de ciertas longitudes e IMDs, están equipados con sistemas ITS gestionados por sistemas centralizados, lo que implica que disponen de infraestructuras de comunicaciones IT.

En este contexto se podría afirmar que los túneles son infraestructuras inteligentes con capacidad de monitorizar y ofrecer información sobre el estado de sus propias instalaciones, así como de las condiciones del tráfico, ambientales y de visibilidad en su interior. Actualmente esta información se gestiona de forma centralizada en los centros de control y se publica por los canales de señalización variable, bandas de radio propias y/o medios de comunicación a los usuarios. De esta forma, dotando a los túneles de los equipos de campo dedicados al intercambio de información entre los vehículos y las infraestructuras (denominados RSU – Road Side Units por sus siglas en inglés), estarían en posición de intercambiar información con los vehículos.

Por su parte, los vehículos conectados disponen de la capacidad de transmitir información sobre su estado y alarmas, en la línea de los servicios Día 1, y que al ser recibida por los equipos RSU instalados en el túnel, pasaría a ser gestionada de forma integrada con el resto de datos de la operación y difundirla adecuadamente.

Técnicamente parece posible implementar servicios Día 1 y Día 1.5 en túneles para facilitar la circulación del vehículo conectado. Sin embargo, esta asunción tiene sus restricciones, ya que actualmente el número de vehículos "cliente" de estos servicios es reducido, pero dado que estos servicios requieren de muy bajas latencias, el dimensionar las infraestructuras de comunicación con los vehículos para que pueda atender a un gran

número de ellos puede conllevar unas inversiones importantes.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista estrictamente tecnológico, los túneles equipados con sistemas ITS avanzados se pueden considerar como infraestructuras inteligentes, en posición de intercambiar información con los vehículos, de forma que se optimice el tránsito de éstos a través del túnel.

Sin embargo, existen otros aspectos que influyen en el proceso de despliegue como el presupuestario para dotar a los túneles con las RSU para el intercambio de información vehículo – infraestructura, o los operativos para decidir qué información/servicios puede ofrecer el túnel a los vehículos que están circulando, y qué información pueden ofrecer los vehículos al túnel que pueda redundar en un beneficio colectivo al resto de vehículos que circulan por el túnel.

Tal y como se desprende del estado del arte, si bien los diferentes elementos, sistemas, tecnologías, … pueden encontrarse en grado de desarrollo avanzados, el despliegue completo se producirá en el medio-largo plazo. Entre tanto se irán desarrollando pilotos, cada vez más complejos, en los que se irán probando y validando las tecnologías. En este punto es importante utilizar los estándares ya definidos, de manera que los resultados puedan ser comparables y compartidos, pero también para alcanzar los correspondientes consensos en marcos tecnológicos y regulatorios.

En el corto plazo, desplegar proyectos piloto de servicios de conectividad que permitan intercambiar información entre los vehículos y las infraestructuras parece una tarea factible.

A nivel de vehículo autónomo, además de que todavía no está completamente desarrollada la tecnología, dadas las implicaciones que tienen estos sistemas en el entorno de la seguridad, es necesario evaluar los escenarios más desfavorables, como por ejemplo que fallen los sistemas de iluminación del túnel, se incremente la opacidad por cualquier motivo, gestionar de forma segura el paso de conducción autónoma a conducción manual o simplemente detención segura de los vehículos.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

[1] «Vehículo Conectado. Desafíos y oportunidades para los operadores de tráfico y carretera,» Asociación Mundial de la Carretera (PIARC), 2019.

[2] Comisión Europea, «DECISIÓN DE EJECUCIÓN (UE) 2020/1426 DE LA COMISIÓN de 7 de octubre de 2020 relativa al uso armonizado de espectro radioeléctrico en la banda de frecuencias 5 875-5 935 MHz para aplicaciones relacionadas con la seguridad de los sistemas de transporte inte,» Comisión Europea, 2020.

[3] Comisión Europea, «DIRECTIVA 2010/40/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO por la que se establece el marco para la implantación de los sistemas de transporte inteligentes en el sector del transporte por carretera y para las interfaces con otros modos de transporte,» 2010.

[4] N. Asselin-Miller, M. Biedka, G. Gibson, F. Kirsch, N. Hill, B. White y K. Uddin, «Study on the Deployment of C-ITS in Europe: Final Report,» DG MOVE, 2016.

[5] Car 2 Car Consortium, «Position Paper on Road Safety and Road Efficiency Spectrum Needs in the 5.9 GHz for C-ITS and Cooperative Automated Driving,» 2020.

[6] C-ITS Platform, «Final report Phase II,» 2017.

[7] C-ROADS Platform, «Common C-ITS Service and Use Case Definitions. Definitions,» 2020.

[8] C-ROADS Platform, «C-ITS Infrastructure Functions and Specifications,» 2019.

[9] C-Roads Platform, «Report on Legal and Organisational Structures for C-ITS Operation,» 2018.

[10] C-ROADS Platform, «C-ITS Message Profiles and Parameters,» 2020.

[11] C-Roads Platform, «Mobile Roadside ITS G5 System Profile,» 2020.

[12] A. Habibovic, M. Amanuel, L. Chen y C. Englund, «Cooperative ITS for Safer Road Tunnels: Recommendations and Strategies. Final Report,» 2017.

[13] Project: INFRAMIX – Road INFRAstructure ready for MIXed vehicle traffic flows, «D.5.4 Infrastructure Classification Scheme,» 2019.

[14] A. García, F. Camacho-Torregrosa, D. llopis-Castelló y J. Monserrat, «Smart Roads Classification. Special Project.,» Asociación Mundial de la Carretera (PIARC).

[15] CAPITAL Project, «D.3.2 ITS Knowledge Database,» 2018.

[16] TransAID Project, «D5.1 Definition of V2X message sets,» 2019.

[17] ISO / CEN, «Cooperative intelligent transport systems (C-ITS) Guidelines on the usage of standards.,» 2020.

[18] ISO, «Technical Specification ISO/TS 17419. Intelligent transport systems - Co-operative systems - Classification and Management of ITS applications in a global context,» 2013.

[19] ISO, «Technical Specification. ISO/TS 17427 Intelligent transport systems - Co-operative systems - Roles and responsibilities in the context of co-operative ITS based on architecture(s) for co-operative systems.,» 2013.

[20] ISO, «Technical Report. ISO/TR 17423. Intelligent transport systems - Co-operative systems - ITS application requirements and objectives for selection of communication profiles.,» 2013.

[21] ETSI Technical Committee Intelligent Transport Systems, «Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Facilities layer protocols and communication requirements for infrastructure services,» ETSI, 2018.

[22] ETSI, «Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 2: Intersection Collision Risk Warning (ICRW) application requirements specification,» ETSI, 2018.

[23] ETSI, «Intelligent Transport Systems (ITS); Users and applications requirements; Part 2: Applications and facilities layer common data dictionary,» ETSI, 2018.

[24] T. Litman, «Autonomous Vehicle Implementation Predictions. Implications for Transport Planning.,» Victoria Transport Policy Institute, 2022.

COOPERATIVE SYSTEMS IN ROAD TUNNELS - POTENTIALS FROM THE USE OF C2X COMMUNICATION FOR TUNNEL MONITORING

Georg Mayer
BUNG GmbH

In future, our transport system will increasingly consist of networked, intelligent and automated vehicles. They will be part of an intelligent overall system characterized by a seamless interaction between vehicles and infrastructure. It is based on C2X communication which allows data exchange between individual vehicles (Car to Car or C2C) and between vehicles and infrastructures (Car to Infrastructure or C2I). The required specifications for individual functions, radio interfaces, communication protocols, IT security solutions as well as in-vehicle and infrastructure-side communication units were developed within the framework of the SIM-TD[1] research project. First road sections have been equipped with so-called Roadside Units (RSU[2]). They facilitate communication between vehicles and infrastructure. In addition, as standard more and more manufacturers are equipping their vehicles with the corresponding transmission units (CCU[3]) to exchange data and messages directly from vehicle to vehicle (C2C) and from vehicle to infrastructure (C2I). Road tunnels, however, have not yet been equipped with corresponding communication facilities. The use of vehicle-generated data and messages for tunnel monitoring, the possibilities of direct traffic control as well as innovative methods of data analysis and evaluation open up completely new perspectives to improve safety in road tunnels. The present paper shows the potentials arising from C2X technology used in road tunnels, the necessary technical requirements and the current state of research.

1 SIM-TD: Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland (safe and intelligent mobility – field trial in Gemany), (BMWi, BMBF, BMVBS, 2008-2013)

2 RSU: Roadside unit to communicate via W-LAN and LAN/WAN

3 CCU: Communication control unit to communicate via cellular radio and W-LAN

SISTEMAS COOPERATIVOS EN TÚNELES DE CARRETERA: POTENCIAL DEL USO DE LA COMUNICACIÓN C2X PARA LA VIGILANCIA DE TÚNELES

En el futuro, nuestro sistema de transporte estará compuesto -cada vez con mayor frecuencia- por vehículos conectados en red, inteligentes y automatizados. Éstos formarán parte de un sistema global inteligente caracterizado por la interacción continua entre vehículos e infraestructura. Aquello se basa en la comunicación C2X, que permite el intercambio de información entre vehículos individuales (coche a coche o C2C) y entre vehículos e infraestructuras (coche a infraestructura o C2I). Las especificaciones necesarias para las funciones individuales, así como las interfaces de radio, los protocolos de comunicación, las soluciones de seguridad informática y las unidades de comunicación del lado del vehículo y de la infraestructura han sido desarrollados dentro del marco del proyecto de investigación SIM-TD1. Los primeros tramos de carretera al aire libre han sido equipados con las llamadas "Unidades de carretera" (o "RSU"2 por sus siglas en inglés), que permiten la comunicación entre los vehículos y la infraestructura (C2I). Además, cada vez más fabricantes de la industria automotriz equipan los vehículos con las correspondientes unidades de transmisión (o "CCU"3 por sus siglas en inglés) para intercambiar datos y mensajes directamente entre vehículos individuales (C2C) y entre vehículos e infraestructuras (C2I). Sin embargo, este servicio de comunicación aún no se encuentra disponible en los túneles de carretera. El uso de datos y mensajes generados por los vehículos en la vigilancia de los túneles y las posibilidades de control directo del tráfico, así como los métodos innovadores de análisis y evaluación de datos, proporcionan nuevas perspectivas para mejorar la seguridad en los túneles de carretera. El presente artículo muestra los potenciales de la tecnología C2X en los túneles de carretera, cuales son requisitos técnicos necesarios, y el estado actual de la investigación.

SYSTÈMES COOPÉRATIFS DANS LES TUNNELS ROUTIERS - POTENTIEL DE L'UTILISATION DE LA COMMUNICATION C2X POUR LA SURVEILLANCE DES TUNNELS

À l'avenir, notre système de transport sera de plus en plus composé de véhicules connectés, intelligents et automatisés. Ils feront partie d'un système global intelligent caractérisé par une interaction parfaite entre les véhicules et l'infrastructure. La base de ce processus est la communication C2X, qui permet l'échange d'informations entre les différents véhicules (Car to Car ou C2C) et entre les véhicules et les infrastructures (Car to Infrastructure ou C2I). Les spécifications nécessaires à cet effet concernant les différentes fonctions, les interfaces radio, les protocoles de communication, les solutions de sécurité IT ainsi que les unités de communication côté véhicule et côté infrastructure ont été élaborées dans le cadre du projet de recherche SIM-TD1. Les premiers tronçons de route sont équipés de Roadside Units (RSU2) qui permettent une communication entre les véhicules et l'infrastructure (C2I). En outre, de plus en plus de constructeurs automobiles équipent leurs véhicules en série de dispositifs de transmission (CCU3) permettant d'échanger directement des données et des messages entre les différents véhicules (C2C) et entre les véhicules et les infrastructures (C2I). Cependant, les tunnels routiers n'ont pas encore été équipés de telles possibilités de communication. L'utilisation de données et de messages générés par les véhicules dans la surveillance des tunnels, les possibilités d'influencer directement le trafic, mais aussi les méthodes innovantes d'analyse et d'évaluation des données ouvrent de toutes nouvelles perspectives pour améliorer la sécurité dans les tunnels routiers. Dans le cadre de cet article, il sera montré quels sont les potentiels de l'utilisation de la technologie C2X dans les tunnels routiers, quelles sont les conditions techniques nécessaires et quel est l'état actuel de la recherche à ce sujet.

1. INTRODUCTION

The safe operation of road tunnels requires comprehensive and detailed information about the processes of the traffic area in order to be able to react quickly and appropriately in case of danger. Up to now, exclusively sensors installed on the infrastructure side have provided information. Depending on the necessary technical equipment of a tunnel, sensors recording air quality, luminance, road conditions, traffic data and traffic conditions, fire events, etc. are required. Mainly via the automation level, these sensors are connected to the system control level (tunnel operating centre) or the higher-order control level of a 24-hour manned tunnel control centre and, thus, allow drawing conclusions about irregularities in the traffic area. Events requiring intervention by control technology or by operators are, for example: stopped traffic, traffic jams, slow vehicles, stranded vehicles, vehicles in breakdown bays, use of emergency lanes, wrong-way driving, objects or people on the carriageway, slippery road, accidents, vehicle fires, release of hazardous materials, any exceeded threshold values (visibility, CO, NOx), etc.

In many cases, data are recorded selectively and allow only indirect conclusions to be drawn about a triggering event, e.g. accidents which can be detected by a tailback, fires by a rise in temperature or the detection of smoke.

When using systems with automatic image evaluation (video detection systems), more detailed information about the situation inside a tunnel can be provided faster if the cameras are arranged appropriately to monitor the full traffic area and if appropriate image analysis tools are used.

Since 2016, additionally an Acoustic Tunnel Monitoring System (AKUT) has been installed in Austrian tunnels. It uses noise analysis to detect accidents. Experience has shown that this can lead to a significant improvement in the detection of accidents.

In order to be able to detect and stop overheated vehicles before entering a tunnel, various thermal scanners are used that analyse vehicles for temperature anomalies by a combination of laser scanner and thermal imaging camera (infrared camera). Currently, such a system is being applied during modernization measures of Engelberg tunnel (A81, near Stuttgart) to check dangerous goods transports.

To identify dangerous goods transports and their goods, procedures were developed within the framework of the SKRIBT/SKRIBT+ [4] joint research project. They use stationary cameras to detect and read out dangerous goods signs on passing vehicles.

Due to their measuring principles, all sensors have different advantages and disadvantages, which may lead to problems such as non-detection of events, long detection times and/or false alarms. In the TSFu [5] research project, a method was developed and implemented to solve these problems. It increases the reliability and speed of detection through the intelligent fusion of selected sensors. However, the basic problem remains that the detection systems on the infrastructure side can only detect the effects/consequences but not the cause of an event.

Modern vehicles are already collecting a series of data required for tunnel monitoring by in-vehicle sensors and evaluating them by on-board systems. For example, information on the vehicle's current position, speed, direction of travel, lane changes, distance to the vehicle in front, longitudinal and lateral acceleration, road conditions (dry, wet, slippery), outdoor temperature, lighting conditions, airbag status, etc. is collected and processed. If an airbag is triggered, for example, an accident can be concluded directly and immediately. A broken-down vehicle can be identified by the speed at which it is travelling and the activation of the hazard

[4] SKRIBT / SKRIBT(+): Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen (BMBF, 2009-2011 / 2012-2015)

[5] TSFu: Tunnelsicherheit durch intelligente Sensor-Fusion (bmvit, FFG, ASFINAG, 2014-2015, realization in pilot project: ASFINAG, 2016-2017)

warning lights. The use of breakdown bays or emergency lanes can be determined by speed and lane data. A vehicle fire can be detected, for example, by the temperature in the engine compartment or inside the vehicle.

With the help of new communication technologies, it will be possible to directly exchange data and messages between individual vehicles (car to car or C2C) and between vehicles and infrastructures (car to infrastructure or C2I). Communication between the vehicles and the road infrastructure (such as tunnel operating centres, tunnel control centres, traffic control centres, etc.) takes place via so-called roadside units (RSU). These units are the interface between airborne and wired transmission.

The basic principles for communication between individual vehicles (C2C) and between vehicles and infrastructures (C2I) were developed within the framework of the SIM-TD research project. The aim of the research project was to achieve standardisation of C2X technology. In cooperation with automobile manufacturers and suppliers, research institutes and planners of traffic engineering facilities, the following was specified:

- Car2X functions,
- Radio interfaces (WLAN, mobile radio),
- Communication protocols,
- IT security solutions,
- Vehicle subsystems,
- Communication Unit (CCU),
- Human Machine Interface (HMI),
- Infrastructure subsystems
- Road Side Units (RSU)
- Traffic control centre.

The system architecture developed in SIM-TD was implemented and tested in a large-scale field trial near Frankfurt. It included the A5 federal motorway between Wetterau service station and interchange Frankfurt-West as well the B 3 and B 455 federal roads and several surrounding state roads.

Through the Cooperative ITS Corridor (C-ITS[6]) project, C2X technology is being applied in a larger spatial context for the first time. In 2013, the Ministries of Transport of the Netherlands, Austria and Germany agreed to set up cooperative systems in the Rotterdam - Frankfurt/Main - Vienna corridor. The focus here is on communication between vehicles and infrastructure facilities. The communication between vehicles and infrastructures is based on the WLAN standard 802.11p.

The objective of the research project is to increase road safety and improve traffic flow through cooperative systems (C2I). A system architecture including data model and interface requirements was developed in order to be able to early warn of daily road works and to enable improved traffic management using vehicle-based data in traffic control centres (TCC). The cross-border cooperation is intended to create a European standard for C2X communication that is open for the integration of further cooperative services and which contributes to the harmonisation of C2X technology. However, events in road tunnels have not been considered and subject of the developments neither in SimTD nor C-ITS.

Several vehicle manufacturers are now equipping their vehicles with appropriate components for C2X communication, e.g. Volkswagen since 2019. The VW Golf VIII is the first vehicle with such components being standard equipment. Communication with the infrastructure takes place via the WLAN 802.11p standard. Presu-

[6] C-ITS: Cooperative Intelligent Transport Systems and Services

mably, other vehicle manufacturers will follow suit with comparable equipment. Since C2X communication is considered one of the basic requirements for autonomous driving, this will also lead to a further spread of C2X technology.

2. VEHICLE SUBSYSTEMS

The in-vehicle computer, the so-called Application Unit (AU), analyses data provided by the vehicle sensors or messages received via a Communication Unit (CCU) in real time. If necessary, control commands are sent to the vehicle actuators or messages are transmitted to the driver or the communication unit. The exchange of information between the individual control units and detectors/sensors within a vehicle takes place via standardised data bus systems such as Controller Area Network (CAN) and Flexray. For C2X communication, the Communication Unit (CCU) and a Human Machine Interface (HMI) are essential.

2.1 Communication Unit (CCU)

The communication unit is used for radio-based communication between a vehicle and its environment. It processes information incoming via cellular radio or WLAN, reads, and processes vehicle data for the communication with the outside world. For this purpose, the CCU has read access to the vehicle data bus, for example, to obtain the status of the indicators, the rain sensor or the fog lights. Typically, the electronics required fit in a casket of lunch box dimensions. Figure 1 below shows an example of a communication unit.

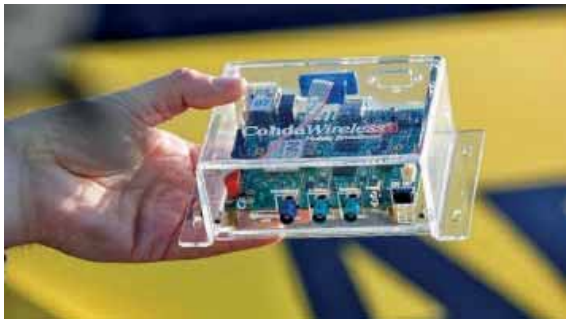


Figure 1:Example of a Communication Unit (CCU) (source: ADAC)

2.2 Human Machine Interface (HMI)

Communication with the driver requires a Human Machine Interface (HMI) that can transmit messages and information both visually and acoustically. Possible warning messages are, for example:

- End of traffic jam in x m
- Stationary vehicle ahead
- Stranded vehicle ahead
- Emergency vehicle from the right, from the left, from behind
- Emergency braking of a vehicle ahead
- Road works (communication via mobile warning trailer)

Figure 2 below shows an example of a dashboard-integrated display system.

Figure 2: Human Machine Interface (HMI) (Source: ADAC)

3. SUBSYSTEMS ON THE INFRASTRUCTURE SIDE

On the infrastructure side, technical equipment is required to send and receive data and information to and from the vehicles as well as for monitoring and situation assessment. The exchange of data and information between infrastructure and vehicles can take place via cellular radio or special transmitting and receiving equipment, the so-called Road Side Units (RSU). In the following, transmission by RSU is discussed in more detail. On the infrastructure side, the RSU are connected to the traffic control centres or tunnel control centres via wired networks.

3.1 Road Side Units (RSU)

On the infrastructure side, RSU are the vital element for wireless communication with vehicles. They can be placed at the roadside on poles and walls or across the road above lanes on gantries, road bridges, tunnel ceilings, etc. Their purpose is to collect from and provide data and information for vehicles. They are the link between the road users and stationary C2X elements (infrastructure, traffic control centres, tunnel control centres, etc.). As the communication unit on board vehicles, the RSU consists of a CCU (WLAN receiver) and an AU.

Between RSU and other stationary elements, data is transmitted via cable-bound networks (LAN, WAN) at high bandwidth in order to be able to forward the data stream generated by the vehicles immediately. A fibre-optic connection can provide a sufficient bandwidth. Besides forwarding them, the RSU also pre-processes the data. The functions transmitted to the RSU are only limited by the hardware resources (memory, CPU, etc.) and the finite data bandwidth. Communication between the vehicles and the RSU is very limited in time; therefore, the transmittable data volume is limited, too. For parameterisation and maintenance purposes, the control centre (traffic control centre / tunnel control centre) has full access to the RSU. Figure 3 shows an example of the design of an RSU and its arrangement above a carriageway.

Figure 3: RSU (Source: Siemens)

3.2 Traffic control centre / tunnel control centre

The control centres (traffic control centre / tunnel control centre) use the data and information collected in the RSU as a basis for assessing the current situation. They gather and compile the data to get an overall picture. The data are the basis for various management systems (e.g. failure management, strategy management, traffic incident management, traffic information management, road works management, etc.). The aim is to ensure a high level of traffic safety, to keep traffic flowing, to inform road users about incidents and to initiate the necessary measures. Information provided by the control centre for the road users reaches the vehicles/road users directly via the RSU.

In contrast to open sections, in case of an incident in a tunnel (fire, release of hazardous materials) particular hazards can arise for the road users as well as for the structure itself. To minimise the effects on users and structure, a clear identification and immediate detection of dangerous situations are of major importance. Therefore, tunnels with a length of 400 m or more are monitored by a 24-hour manned station. This is where all information on the current traffic and operating conditions is collected. In case of incident, appropriate measures are initiated to protect road users and structure and emergency services are coordinated to provide support. As an example, Figure 4 below shows of the planned design of the Hamburg tunnel control centre.

Figure 4: Planned tunnel control centre Hamburg (Source: PTV)

4. RADIO INTERFACES (MOBILE RADIO, WLAN)

Communication between the vehicles and the control centres can take place both via a mobile radio connection and via a WLAN connection.

4.1 Cellular radio

In the case of communication via mobile radio, transmission takes place via transmitting and receiving units (base stations) of mobile network operators, with the end user being charged fees for network access.

The ranges and data transmission rates of cellular radio depend on the radio frequency used. With lower radio frequencies, greater ranges are achieved, but lower data transmission rates. Conversely, with higher radio frequencies, shorter ranges but better data transmission rates are possible. The 3rd generation (3G) cellular radio standard, Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), will no longer supported by network operators beyond 2021.Support for the Long Term Evolution (LTE) standard, also known as 3.9G, will continue. The LTE standard enables a data rate of 0.3 Gbit/s and a latency of 10 ms to 40 ms. The cellular radio standard of the 4th generation (4G), Long Term Evolution - Advanced (LTE-A or LTE+), is currently widely used. It reaches data rates of up to 1 Gbit/s and a latency of 10 ms. Table 1 below gives a rough overview of the ranges and data transmission rates achievable with LTE, depending on the frequency.

Table 1: Characteristics of the 4th generation mobile radio standard (4G) (Source: Telekom, Vodafone)

Frequency	Range	Data transmission rate
800 MHz	≤ 10 km (max. 15 km)	≤ 75 Mbit/s
1,8 GHz	≤ 4 km	≤ 150 Mbit/s
2,1 GHz	≤ 3 km	≤ 150 Mbit/s
2,6 GHz	≤ 2 km	≤ 150 Mbit/s

The mobile communications standard of the 5th generation (5G) is under development. This standard allows data rates of up to 10 Gbit/s and latencies of less than one millisecond to five milliseconds. Due to the short latency times, real-time communication is possible with 5G. Table 2 contains a summary of the parameters for the 5th generation cellular radio standard.

Table 2: Characteristics of the mobile radio standard of the 5th generation (5G) (Source: Telekom, Vodafone)

Frequency	Range	Data transmisson rate
700 MHz	≤ 10 km (max. 20 km)	≤ 200 Mbit/s
2,0 GHz	≤ 3 km	≤ 500 Mbit/s
3,6 GHz	≤ 1 km	≤ 1.000 Mbit/s
26 GHz	≤ 0,3 km (≤ 1 km mit beam forming)	≤ 10.000 Mbit/s

4.2 WLAN

The specifications in the IEEE 802.11 standards for communication in radio networks constitute the basis for a WLAN connection. It is a proven and widespread radio wave standard for wireless network communication. The IEEE 802.11p standard contains special specifications for use in communication between individual vehicles (C2C) and between vehicles and infrastructure (C2I). In contrast to the other elements of the 802.11 family of standards, the initial handshake and the time required for association processes are kept to a minimum. Authentication, encryption and complete identification are shifted to higher protocol levels.

This enables immediate exchange of essential data between individual vehicles and between vehicle and RSU (≤ 1 ms). [9] Dedicated Short-Range Communication (DSRC), developed in the USA for communication between vehicles and subscribers in the immediate vicinity, is based on the IEEE 802.11p standard. In Europe, this short-range communication is based on the ITS-G5 standard of the ETSI, which is basically a version of the 802.11p standard adapted for the European market. Both standards (DSRC, ITS-G5) operate in very similar frequency ranges, reserved for exclusive use in co-operative systems. This avoids conflicts with other WLAN-capable devices of the consumer sector, such as mobile phones, notebooks, etc. In the USA, frequencies between 5.850 and 5.925 GHz are allocated to this purpose, in the EU frequencies between 5.875 and 5.905 GHz. DSRC and ITS-G5 allow very effective communication between fast-moving vehicles. Even at relative speeds of 400 km/h, an automatic exchange of information between transmitter and receiver is possible. [7] The range covers at least 300 m in the open field; the data can be transmitted between the participants at a rate of 3 to 27 Mbps.

A significant advantage of WLAN over cellular radio technologies, such as the widespread LTE, is that no costs of data transmission incur for the user. From a technical point of view, the lower latency times, i.e. the shorter period it takes to establish a connection between transmitter and receiver, are an advantage.

The disadvantage of WLAN is that the network is locally limited and has a smaller range than the WWAN (Wireless Wide Area Network) of mobile phone operators. Therefore, a dense arrangement of transmitting and receiving units is necessary to establish the same availability as with LTE. However, if the range is exceeded, other vehicles can act as intermediate nodes in the so-called multi-hopping to ensure the data connection. Alternatively, the distance between the roadside units is reduced to such an extent that they can exchange information directly with the CCUs of the vehicles using the single-hop method. [6]

The 5th generation of mobile radio standard, however, provides for latency times that correspond to those of WLAN. At the same time, significantly higher data transmission rates are achieved than with WLAN.

Regardless of the underlying transmission technology, however, the basic structure of communication paths will not change. Figure 5 below shows the basic transmission options alternatives.

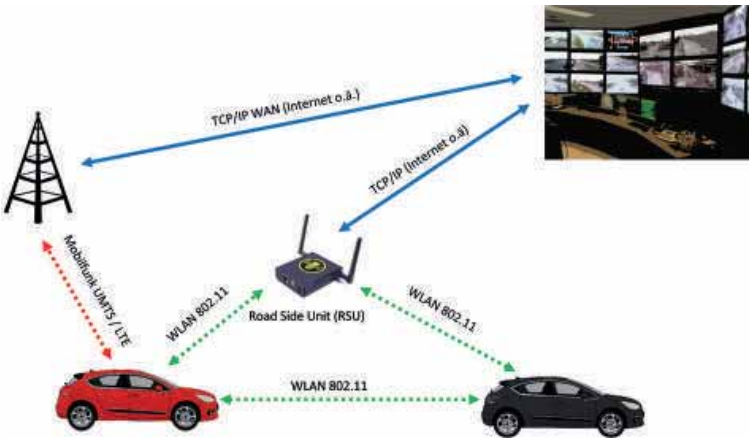


Figure 5: Transmission options (source: [8])

5. COMMUNICATION PROTOCOLS

The specifications in the OSI layer model[7] are the basis for the description of communication processes. According to this, DSCR and C-ITS (ITS-G5) are similar at the lower levels of the OSI model, the physical layer and data link layer level, which control access to a communication. In the subsequent higher network and transport levels, however, they differ significantly from each other. Both support TCP[8]/UDP[9]-over-IPv6[10] but use their own specialised low overhead data transfer standards for time sensitive functions.

DSRC uses the WAVE[11] Short Message Protocol (WSMP), which is part of IEEE 1609. C-ITS uses the GeoNetworking (GN) and Basic Transport Protocol (BTP) protocols, which were specified by ETSI in the EN 302 636 series of standards [9].

In C-ITS, the session and presentation layers are combined to the facility layer. Messages such as Cooperative Awareness Messages (CAM) and Decentralised Environmental Notification Messages (DENM) are defined here. Table 3 provides a survey of the DSCR and ITS-G5 protocol stacks in comparison to the ISO/OSI model.

7 OSI: Open Systems Interconnection

8 TCP: Transmission Control Protocol

9 UDP: User Datagram Protocol

10 Internet Protocol Version 6

11 WAVE: Wireless Access for the Vehicular Environment

Table 3: DSCR/ITS-G5 protocol stacks compared to the ISO/OSI model

No	ISO/OSI model	DSCR / WAVE			ITS-G5/C-ITS			
		Protocol stack		Standard		Protocol stack		Standard
7	Application layer	WAVE Resource Manager		IEEE 1609.1 SAE J2735	Applications			
6	Presentation layer				Facilities	CAM		ETSI EN 302 637-2
5	Session layer					DENM		ETSI EN 302 637-3
4	Transport layer	WSMP	TCP / UDP	IEEE 1609.3	Networking & Transport	BTP	TCP / UDP	ETSI EN 302 636-5-1
3	Network layer		IPv6	IEEE 1609.2		GN	IPv4 / IPv6	ETSI EN 302 636-6-1
2	Data link layer	LLC		IEE 802.2	Access	LLC		ETSI EN 302 663 / IEEE/ISO/IEC 8802-2
		Multi-channel operation		IEEE 1609.4		-		-
		WAVE MAC		IEEE 802.11p		MAC		ETSI EN 302 663 / IEEE 802.11p
1	Physical layer	WAVE PHY		IEEE 802.11p		PHY		ETSI EN 302 663 / IEEE 802.11p

The following is a description of the protocol stacks defined in C-ITS.

5.1 Access

The Access layer takes over the tasks of the physical and data link layer of the ISO/OSI model. It is based on the specifications for wireless communication in the ITS-G5 standard. According to this, data and information are sent and received via 2 transceivers and 6 transmission channels. The first transceiver serves a control channel for the transmission of messages concerning traffic safety or traffic flow. The second transceiver serves 5 service channels, two of which are available for traffic safety or traffic flow applications and three for user applications.

5.2 Networking & Transport

The Networking & Transport layer defines the standards. It corresponds to the network and transport layers of the ISO/OSI model. Besides standard network protocols, such as the Transmission Control Protocol (TCP), the User Datagram Protocol (UDP) and the Internet Protocol (IP), this layer also provides for the use of the GeoNetworking (GN) and Basic Transport Protocol (BTP) protocols. They have been developed specifically for mobile ad-hoc networks, in which the vehicles constitute the network nodes. The protocols can be assigned to the layers in the OSI model as follows:

5.2.1 GeoNetworking

By means of the GeoNetworking protocol, messages can be addressed geographically and forwarded. This allows information to be sent within a geographically limited area. The network architecture is not relevant here, so that the exchange of information can take place both within an infrastructure-free network and within an infrastructure-based network or even in a mixed network. [3]

5.2.2 Basic Transport Protocol (BTP)

Within a mobile ad hoc network, the Basic Transport Protocol enables connectionless end-to-end communication. For this purpose, messages from the facility layer (CAM, DENM) are processed by the Basic Transport Protocol by means of multiplexing in such a way that they are transmitted via geo-networking and at the destination can be further processed by de-multiplexing. The packets of the Basic Transport Protocol are composed of the following elements:

- MAC[12] header
- GeoNetworking header
- GeoNetworking security header (optional)
- BTP header
- Payload (e.g. CAM, DENM)

The MAC header is the first sublevel of the data link layer in the OSI model. Here, the method of access, in this case ITS-G5, is defined. Headers for geo-networking follow the MAC header. The BTP header (BTP protocol) determines the handling of data between the facility level and the geo-networking.

The BTP header (BTP protocol) determines the handling of data between the facility layer and the GeoNetworking. It contains the corresponding source and destination port and is only 4 bytes in size. The actual payload from CAM and DENM then follows the BTP header. [2]

5.3 Facilities

In the OSI model, the facility layer is located between the application and transport layers. It defines the formats for transmitting messages such as Cooperative Awareness Messages (CAM) and Decentralised Environmental Notification Messages (DENM).

5.3.1 Cooperative Awareness Message (CAM)

The Cooperative Awareness Messages are sent within the mobile ad hoc network by the vehicles integrated. They contain information about the position and status of the sending vehicle. The CAM sent by a vehicle is received by the stations (vehicles, RSU) within range. However, an incoming CAM is not forwarded to other participants. Therefore, information is exchanged only directly between the participants within range (single-hop distance). Each receiver decides for itself on the relevance of the bit of information and the reactions that to be derived. A detailed description of the structure and content of a CAM can be found in ETSI TS 102 637-2 [4]. Figure 6 below shows a simplified CAM structure and the associated data [10].

The CAM Protocol Data Unit (PDU) includes the objects PDU Header and CAM. The PDU header contains the basic information on the CAM like the protocol version, message ID and generation time. The CAM object contains the ID of the station participating in the communication as well as the objects Station Characteristics, CAM Parameters and Reference Position.

The Station Characteristics provide information on whether the station is a mobile or a stationary one, for example. The CAM Parameters object provides specific information on the vehicles, e.g. vehicle type, speed, etc. The Reference Position object provides information on the position of the vehicle. It contains information on the position, such as longitude, latitude and direction of travel. [10]

[12] MAC: Media Access Control

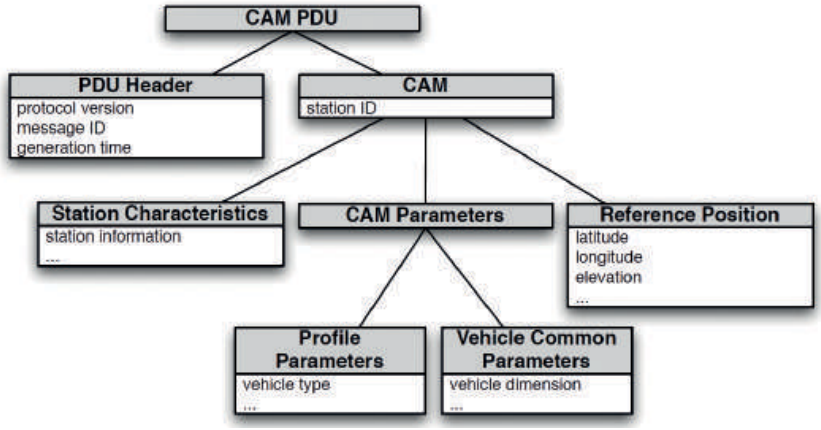


Figure 6: CAM structure (source: [10])

5.3.2 Decentralized Environmental Notification Message (DENM)

Decentralized Environmental Notification Messages are used to notify road users. Message transmission is event-based, i.e. no permanent transmission, only in case of an incident. In contrast to the CAM, DENMs are not only sent by vehicles, but also by stationary ITS stations, such as RSU. The structure and content of a DENM is described in detail in ETSI TS 102 637-3 [5]. Figure 7 below shows the basic structure of a DENM and the associated data.

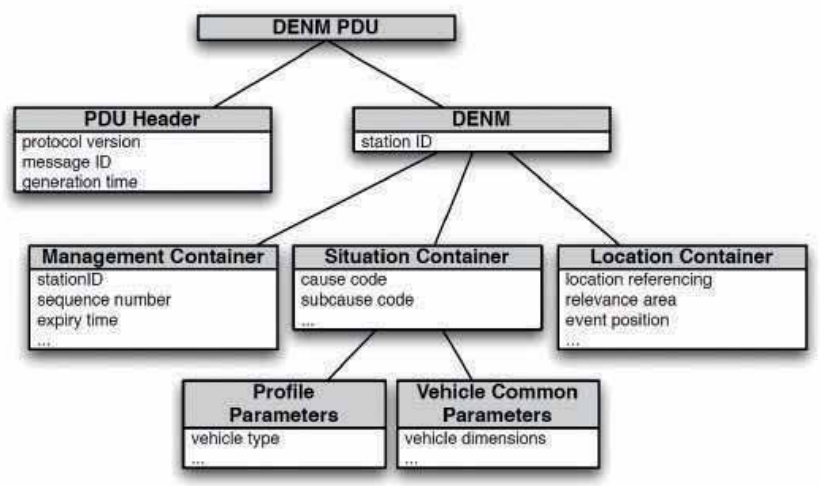


Figure 7: DENM structure (source: [10])

The DENM Protocol Data Unit (PDU) consists of the objects PDU Header and DENM. The DENM header corresponds to the CAM header. The DENM object includes the Management, Situation and Location containers.

The Management container provides the ID of the participating station, the sequence number and the duration for the validity of the message. In the cause code and sub-cause code the Situation container has information about what triggered a message. The associated objects Vehicle common parameters and Profile parameters correspond to the CAM objects of the same name. The Location container provides information on the location of the incident. In addition to the coordinates (longitude, latitude) it also includes information on the local extent of the incident.

6. CAR2X FUNCTIONS

Within the framework of SIM-TD, a comprehensive survey and description of the functions considered relevant for C2X communication with regard to driving and traffic safety as well as traffic efficiency was undertaken. The C2X functions were allocated to the following areas (categories):

1. Traffic
2. Driving and safety
3. Complementary services

6.1 Traffic

The category of traffic comprises the functions that serve the enhancement of traffic data acquisition and incident detection, thus contributing to a more precise and up-to-date determination of the traffic situation in the entire road network and supporting the derivation of traffic control strategies and the emission of traffic messages. Distinction is made between the following main functions:

- Survey of the traffic situation and provision of complementary information
- Traffic information and navigation
- Traffic control

6.1.1 Survey of the traffic situation and complementary information

This main function is used to determine the traffic situation based on data collected from the infrastructure and the vehicle. The data determined also serve as input for processing in the other main functions. Therefore, the functions assigned to this main function are also dependent on the requirements of the other main functions.

6.1.2 Traffic information and navigation

This main function provides information on traffic incidents, the traffic situation and the road weather for display in the vehicle or for dynamic route planning. Special consideration is given to road works. Their handling is based on data provided via the main function for "Survey of the traffic situation and complementary information".

6.1.3 Traffic control

This main function uses the data collected on the infrastructure and the vehicle side to determine traffic-dependent strategies for diversion management or traffic signal control in areas of high traffic volume.

6.1.4 Summary of C2X functions in the traffic category

Table 4 below lists the individual functions and use cases of the traffic category.

Table 4: C2X functions in the traffic category

No.	C2X function	Provision / application
1.1. Survey of traffic situation and complementary information		
1.1.1	Data collection on infrastructure side	- Data collection - Infrastructure data
1.1.2	In-Vehicle data collection	- Floating Car Data (FCD) - Destinations
1.1.3	Determination of traffic weather situation	- Traffic weather data
1.1.4	Determination of traffic situation	- Overall traffic situation - Travel times
1.1.5	Identification of traffic events	- Planned traffic events - Unplanned traffic events
1.2. Traffic information und navigation		
1.2.1	Traffic forecast	Route-related display of: - Travel time information - Average speed Route-related display of: - Obstacles - Road weather
1.2.2	Road works information system	- Route geometry - Traffic situation
1.2.3	Advanced navigation	Route-related - Travel time information - Dynamic route planning
1.3. Traffic control		
1.3.1	Diversion management t	- Diversion recommendation
1.3.2	Network control (traffic signal control)	- Optimisation of signal-controlled traffic flow
1.3.3	Local traffic-dependent traffic signal control	- Prioritisation of public transport - Prioritisation of emergency vehicles - Reduction of waiting times for private traffic
1.3.4	Incident management	- Protection of incident sites

6.2 Driving and Safety

The Driving and safety category comprises various functions: functions that send vehicle-generated data to other vehicles and to the infrastructure (RSU), functions that detect local hazards and traffic conditions on site and inform other vehicles, functions. It also includes functions that display local hazard messages provided by other vehicles or infrastructure as well as messages about current traffic regulations to the driver and functions that assist in avoiding collisions in longitudinal and oncoming traffic. The individual functions are assigned to the following main functions: Local hazard warning and Driver assistance

6.2.1 Local hazard warning

This main function combines the functions that serve to warn the driver of local hazards detected both by vehicles and by the infrastructure. Depending on the situation, it sends corresponding hazard messages to inform a driver.

6.2.2 Driver assistance

This main function combines assistance functions that serve to support a driver in his driving tasks, e.g. the reaction to ahead vehicles suddenly braking heavily, crossing vehicles at junctions and intersections, traffic signs, traffic lights, etc. In case of an impending collision or imminent offence, the driver can be warned.

(Table 5)

6.3 Complementary services

This category covers services accessed via Internet or mobile phone connections. Distinction is made between:

- Internet access and local information services
- Remote maintenance services
- Access control and payment services
- Emergency call services

6.3.1 Internet access and local information services

This main function provides Internet access in the vehicle. It can be used to access traffic data, information of the local community, parking information, etc. online.

6.3.2 Remote maintenance services

This main function provides for remote access to the vehicle control system, e.g. to perform remote diagnostics, maintenance work, software updates, etc.

6.3.3 Access control and payment services

By means of this main function, access to an access-restricted area can be granted after successful identification. If fees are charged (tolls, parking, etc.), payment can be made automatically by a vehicle.

6.3.4 Emergency call services

This function is used to trigger an emergency call automatically or manually in case of accident.

(Table 6)

Table 5: C2X functions of the Driving and Safety category

No.	C2X function	Provision / application
2.1 Local hazard warning		
2.1.1	Obstacle warning	Warning of: - Risk of collision - Stranded vehicle - Slow vehicle - Road works - Obstacles on carriageway
2.1.2	End of traffic jam warning	Warning of: - End of traffic jam
2.1.3	Road weather warning	Warning of: - Weather hazards
2.1.4	Emergency vehicle	Warning of - Approaching emergency vehicle - Parked emergency vehicle
2.2 Driver assistance		
2.2.1	Traffic sign assistant/Warning	Traffic sign display - In the vehicle - Warning in case of non-observance of traffic signs
2.2.2	Traffic light phases assistant/warning	- Green wave - Time to green (TTG) - Warning of red light violation
2.2.3	Longitudinal guidance assistance	- Collision avoidance - Brake assist - Automatic emergency braking - Electronic brake light - Pre-crash data exchange - Cooperative distance control
	Crossing/Cross Traffic	- Cross traffic assist - Left-turn assist - Right-turn assist
	Lateral guidance assistance	- Lane change assist - Merging assist
	Route-dependent speed and driver performance assistance	Route-dependent speed and driver performance assist
	Automated cooperative guidance of vehicle convoys	Automated cooperative driving
	Cyclist/pedestrian protection	Cyclist/pedestrian protection - Warning - Reacting

Table 6: C2X functions of the complementary services category

No.	C2X function	Provision / application
3.1. Internet access and local information services		
3.1.1	Internet-based services	- AV streaming - Instant messaging - Interactive city tour - Mobile PIM - Push services - Community aspects
3.1.2	Location information services	- Tourist Information - Event notes - Community information - Parking situation - Petrol station information - Transmission of traffic data
3.1.3	Parking space detection	- Transmission of vacant parking space
3.2. Remote access services		
3.2.1	Remote access	- Remote diagnosis - Vehicle software update - Wireless diagnostic interface
3.2.2	Garage services	- Recall campaign - Service information
3.3. Access control and payment services		
3.3.1	Access control	- Automatic access control - Exit from parking facility
3.3.2	Payment services	- Parking management - Electronic toll
3.3. Emergency call services		
3.3.1	e-Call	Emergency call by: - User activity - Vehicle activity

7. INTEGRATION OF C2X FUNCTIONS INTO TUNNEL OPERATION TECHNOLOGY

On the infrastructure side the necessary conditions taking into account both expected or required functional scopes and technical restrictions, e.g. the radio range, have to be created first to be able to integrate C2X functions into tunnel operation technology.

Within the tunnel system architecture, C2X technology and RSU required to communicate with the vehicles are located at field level. As part of the traffic system (functional block 2 of the field level according to EABT [13]), the connection to the system control level and the automation level should be realized via a sub-centre. This allows actions to be triggered based on predefined automated schemes, e.g. the automatic closing of a tunnel in the event of a collision detected via C2X. TCP/IP (e.g. IPv6) is suggested for data transmission bet-

ween RSU and tunnel operating technology. [12] also recommends TCP/IP (e.g. IPv6) since it allows using standardised or marketable products both as regards communication hardware and application software.

The distances at which the RSU are arranged along the tunnel inner section depend, on the one hand, on the tunnel geometry and the course of the route and, on the other hand, on the transmission and reception power of the RSU. Using DSRC or ITS-G5, ranges of 300 m are possible. This means that a maximum distance of 600 m could be reached. However, it may make more sense to reduce the distance to 300 m in order to achieve good coverage with WLAN.

8. POTENTIALS OF C2X COMMUNICATION

For both tunnel users and tunnel operators, monitoring the traffic situation and providing supplementary information is of great importance. For example, infrastructure data such as tunnel length and position of the nearest emergency exit or emergency niche can be provided to the user. Equally important is the detection of planned and unplanned traffic incidents based on the traffic situation. In case of incidents inside a tunnel, the traffic control system can then be used to transmit rerouting recommendations to the road users and to ensure that they are safeguarded. By a local hazard warning, slow or even stranded vehicles or obstacles on the carriageway can be adverted to in order to prevent follow-up events like collisions. In case of a tunnel closure, road users can be prevented from entering the tunnel by means of an access control system. For this purpose, stopping vehicles via remote access may also conceivable in the future.

Via e-Call, the emergency call service, a connection to the nearest emergency call centre is established automatically as soon as in-vehicle sensors have registered a serious collision. Established via mobile radio the connection allows recording a call as well as transmitting data on the accident, like the time of the accident, the location of the incident and the number of vehicle occupants. [1] Since vehicles involved in an accident are located via GPS and the reception of GPS signals in tunnels may be limited, the vehicle position has to be determined by the last GPS position as well as the number of wheel revolutions and the steering angle.

This kind of communication can also be used to send instructions to individual vehicles and their occupants. However, the instructions transmitted can only be heard inside the vehicle via the vehicle's own loudspeaker system. It cannot replace the loudspeaker system of the tunnel.

Table 7 below provides an overview of the incidents conventional operational equipment can detect directly or indirectly and the potential for incidents to be detected, communication and warning possibilities of C2X technology.

(Table 7)

The above matrix illustrates the possible applications of C2X communication technologies for the (preventive) detection of events or critical traffic conditions as well as the potential for rapid communication and information on incidents to road users.

Table 7: Event and detection matrix according to [8] and [14]

Events	Conventional detection systems						C2X		
	Inductive loops	Fire detection system	Visibility sensor	CO sensor	Removal of fire extinguisher	Door contact emergency cabin	C2C	C2I	I2C
Fire		x	x	x	o			x	x
Fire involving hazardous goods		x	x	x	o			x	x
Overheat of vehicle parts					o			x	x
Wrong-way driver	x						x	x	x
Slow-moving vehicle	x						x	x	x
Traffic jam	x						x	x	x
Persons/animals in tunnel					o	o			x
Hazardous site in tunnel							x		x
Broken down vehicle					o	o	x	x	x
Stop-and-go traffic	x						x	x	x
Accident							x	x	x
Accident involving hazardous goods							x	x	x
Occupancy of emergency bay	x							x	x
Vehicle with overheight								x	
Slippery road							x	x	x
Emergency call		o			o	o		x	
Release of hazardous goods					o				x
Malfunction/failure of tunnel equipment									x
Speeding								x	

x = direct detection and message o = indirect detection

9. SUMMARY AND OUTLOOK

The developments in the field of digitisation are going to influence transport behaviour and the management of transport infrastructure strongly. It is foreseeable that the way data are gained and exchanged is subject to change. Besides the challenges road users and infrastructure operators have to face, C2X communication opens up potentials that can contribute to improving road safety. As regards tunnel monitoring, targeted data fusion and plausibility checks may achieve a better incident prevention. At the same time, incident management and particularly road users' self-evacuation can be enhanced if individual addressing is possible.

In case of an incident in a tunnel, its rapid and unambiguous detection is of major importance in order to be able to activate safety systems immediately and automatically and, thus, effectively counteract the escalation of damage. Conventional detection systems only recognise the effects but not the causes of an event. With the help of C2X technology, it partly becomes possible to recognise the causes directly and therefore to shorten significantly the time until measures are initiated. The basic functionalities developed by previous research projects should be expanded for use in tunnel operation technology. Due to the modular system structure, such expansions are possible at any time.

In the course of the research project "Artificial Intelligence to Improve the Safety of Tunnels and Tunnel Control Centres (KITT)", which started in April 2021 and is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), corresponding basic principles for the use of C2X technology in tunnels are being developed. Its focus lies a.o. on the handling of mass data and its analysis using artificial intelligence as well as the assessment of the safety situation using C2I data to support operators in incident management.

10. REFERENCES

[1] Communication Department of the European Commission: eCall: Automatic emergency call for traffic accidents mandatory in cars from 2015, press release, 13 June 2013.

[2] ETSI TS 102 636-5-1: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular communications; Geonetworking; Part 5: Transport protocols; Sub-part 1: Basic transport protocol.

[3] ETSI TS 102 636-6-1: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular communications; Geonetworking; Part 6: Internet integration; Sub-part 1: Transmission of IPv6 packets over geonetworking.

[4] ETSI TS 102 637-2: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic set of applications; Part 2: Specification of cooperative awareness basic service.

[5] ETSI TS 102 637-3: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular communications; Basic set of applications; Part 3: Specification of decentralized environmental notification basic service.

[6] Laglstorfer, R. J.: The future of the intelligent car: Economic market introduction scenarios using the example of Audi. Hamburg: Diplomica Verlag GmbH, 2012.

[7] Lübcke, A.: Car-to-Car Communication - Technological Challenges. Berlin, s.n., 2004.

[8] Mayer, G., Badocha, C., Norkauer, A.: Potentials of Integrating C2X Communication into Tunnel Operations Control Technology, Tunnel Safety and Ventilation Conference, Graz, 2018.

[9] Patrick M., Kirchbeck, B.: V2X Communication: LTE vs. DSRC, Next Mobility, 2018 https://www.next-mobility.de/v2x-kommunikation-lte-vs-dsrc-a-699809/ [Accessed 14.05.2021].

[10] Payerl, C.: Integration of Car-to-X Communication into the E/E Architecture of Vehicles, TU Graz, 2013.

[11] RABT 2006: Guidelines for the equipment and operation of road tunnels; Technical regulations; FGSV No.:

339, ISBN 3-937356-87-8.

[12] Zumbroich, M. et al.: Zukünftige Kommunikationstechniken und Integration von Straßentunneln im Bereich der TLS, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Urban Development, 2007.

[13] EABT 80/100: Recommendations for the equipment and operation of road tunnels with a design speed of 80 km/h or 100 km/h. Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen e.V. (Research Association for Roads and Traffic). (FGSV 339/1), FGSV-Verlag, edition 2019.

[14] Lehan, A.: Influence of digital transformation on the interaction between tunnel infrastructure and road user - opportunities and risks, In: Proceedings from the Ninth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Munich, Germany March 11-13, 2020, pp. 13-22.

FERROPISTA EN LA CORDILLERA CENTRAL DE LOS ANDES, COLOMBIA.

José Pedro Alba García
Ingeniero de caminos, canales y puertos, España

Hernán Otoniel Fernández Ordóñez
Ingeniero civil, Colombia

La FERROPSITA es un sistema de transporte multimodal para el paso bajo la Cordillera Central de los Andes en Colombia. Se trata de diseñar, construir y operar un proyecto de infraestructura para el transporte de nivel mundial, que aporta innovación, sostenibilidad e impacto social y económico.

Requiere la construcción de una autopista ferroviaria de 60 km bajo la Cordillera Central de los Andes, entre Armenia (Quindío) e Ibagué (Tolima), para dar continuidad a las autopistas al encontrar esta barrera física. Se sitúa en el corredor Bogotá – Buenaventura, principal eje de comercio exterior del país. Es necesario un túnel de base de 44 km, un segundo túnel de 8 km, y dos grandes estaciones para la transferencia de vehículos a las plataformas ferroviarias, manejados por los propios conductores.

Inicialmente sólo sería utilizable por vehículos de carga (1,5 mill. de camiones/año), operando unos 100 trenes al día, incrementándose según aumente la demanda y se amplíe la capacidad del sistema.

La Ferropista será un sistema innovador que generará grandes beneficios al país. Las reducciones en tiempo de recorrido y costos de transporte incrementarán las oportunidades de comercio con el exterior.

Se prevén distintos métodos de excavación atendiendo a la geología del macizo rocoso, apoyándose en galerías transversales para posibilitar hasta 12 frentes de ataque simultáneos. También garantizarán la seguridad durante la explotación y facilitarán el acceso para futuras ampliaciones.

La Ferropista reduce en hasta un 90% las emisiones de gases contaminantes y el consumo de combustibles, contribuyendo a los compromisos de Colombia en la lucha contra el cambio climático.

El proyecto generará impactos positivos en la productividad y competitividad de la economía nacional, en el medio ambiente y en la seguridad y fiabilidad del transporte de carga, ofreciendo una solución moderna de amplias prestaciones y máxima eficiencia al paso a través de la Cordillera Central de Colombia.

FERROPISTA IN THE CORDILLERA CENTRAL OF THE ANDES, COLOMBIA

FERROPSITA is a multimodal transport system for the passage under the Central Cordillera of the Andes in Colombia. It is about designing, building and operating a world-class transport infrastructure project that provides innovation, sustainability and social and economic impact.

It requires the construction of a 60 km railway highway under the Central Cordillera of the Andes, between Armenia (Quindío) and Ibagué (Tolima), to give continuity to the highways upon encountering this physical barrier. It is located in the Bogotá – Buenaventura corridor, the main axis of foreign trade in the country. A base tunnel of 44 km, a second tunnel of 8 km, and two large stations for the transfer of vehicles to the railway platforms, managed by the drivers themselves, are necessary.

Initially it would only be usable by cargo vehicles (1.5 mill. trucks/year), operating about 100 trains a day, increasing as demand rises and the system's capacity is expanded.

La Ferropista will be an innovative system that will generate great benefits for the country. Reductions in travel time and transportation costs will increase foreign trade opportunities.

Different excavation methods are planned based on the geology of the rock mass, relying on transverse galleries to enable up to 12 simultaneous attack fronts. They will also guarantee safety during operation and facilitate access for future expansions.

La Ferropista reduces polluting gas emissions and fuel consumption by up to 90%, contributing to Colombia's commitments in the fight against climate change.

The project will generate positive impacts on the productivity and competitiveness of the national economy, on the environment and on the safety and reliability of cargo transportation, offering a modern solution with extensive features and maximum efficiency when passing through the Central Mountain Range of Colombia.

FERROPISTA DANS LA CORDILLÈRE CENTRALE DES ANDES, COLOMBIE.

Le FERROPSITA est un système de transport multimodal pour le passage sous la Cordillère Centrale des Andes en Colombie. Il s'agit de concevoir, construire et exploiter un projet d'infrastructure de transport de classe mondiale qui offre innovation, durabilité et impact social et économique.

Il nécessite la construction d'une autoroute ferroviaire de 60 km sous la cordillère centrale des Andes, entre Armenia (Quindío) et Ibagué (Tolima), pour offrir continuité aux autoroutes lorsqu'elles rencontrent cette barrière physique. Il est situé dans le corridor Bogota – Buenaventura, le principal axe du commerce extérieur du pays. Un tunnel de base de 44 km, un second tunnel de 8 km, et deux grandes gares de transfert des véhicules vers les quais ferroviaires, prises en charge par les chauffeurs eux-mêmes, sont nécessaires.

Au départ, il ne serait utilisable que par des véhicules de fret (1,5 million de camions/an), exploitant environ 100 trains par jour, augmentant à mesure que la demande augmente et que la capacité du système est étendue.

La Ferropista sera un système innovant qui générera de grands avantages pour le pays. La réduction du temps de déplacement et des coûts de transport augmentera les opportunités de commerce extérieur.

Différentes méthodes d'excavation sont prévues en fonction de la géologie du massif rocheux, s'appuyant sur des galeries transversales permettant jusqu'à 12 fronts d'attaque simultanés. Ils garantiront également la sécurité pendant l'exploitation et faciliteront l'accès pour les extensions futures.

La Ferropista réduit les émissions de gaz polluants et la consommation de carburant jusqu'à 90 %, contribuant ainsi aux engagements de la Colombie dans la lutte contre le changement climatique.

Le projet générera des impacts positifs sur la productivité et la compétitivité de l'économie nationale, sur l'environnement et sur la sécurité et la fiabilité du transport de marchandises, offrant une solution moderne avec des fonctionnalités étendues et une efficacité maximale lors du passage à travers la chaîne de montagnes centrale de Colombie.

1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO.

El proyecto Ferropista pretende ofrecer una solución moderna de transporte seguro y sostenible de máxima eficiencia que permita el paso a través de la Cordillera Central de Colombia, entre las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca, en la zona central del país, y, en particular, en el eje Bogotá-Buenaventura, sobre el que gravita la parte más importante del tránsito de cargas y el comercio de importación y exportación de Colombia. Es un proyecto de carácter multimodal, que incluye los modos vial y férreo en una solución integradora que optimiza el servicio en el corredor logístico Bogotá - Buenaventura.

La solución que se propone consiste en la realización de un sistema férreo innovador y eficiente para el trasbordo de vehículos de carga entre los bordes occidental y oriental de la Cordillera Central, conectando Quindío (Armenia) y Tolima (Ibagué), y evitando así el paso por el Alto de La Línea. Los camiones y tractomulas se trasladarán sobre vagones plataforma que se integrarán en trenes movidos por locomotoras eléctricas.

La realidad actual, con muy serias insuficiencias en el funcionamiento de este eje vial, y las previsiones de desarrollo de las demandas como consecuencia del avance social y económico, apoyan la necesidad de plantear nuevas y más amplias soluciones, que aporten al mismo tiempo un valor agregado de beneficios adicionales en lo ambiental y en la integración social del país. Las mejoras que cabe esperar de la ejecución de una doble calzada entre Armenia e Ibagué se verán reforzadas en su servicio como consecuencia del complemento que plantea la Ferropista al evitar el tránsito de camiones por la carretera.

La Cordillera Central de los Andes es la gran barrera que se interpone y separa las dos amplias cuencas fluviales del Magdalena y del Cauca, con un ancho que oscila entre 50 km y 100 km, correspondiendo el valor mínimo precisamente a la zona por la que surca la carretera entre Armenia e Ibagué. Esta importante vía alcanza en la actualidad su cota máxima en el Alto de La Línea, con 3.300 msnm., mientras que su cota en Armenia es de 1.450 m. y de 950 m. en Ibagué. Dicha vía discurre por abruptas e inestables laderas de la Cordillera, siguiendo en buena parte de su recorrido los cursos de los ríos Santo Domingo, Coello y Combeima, con un trazado con cerradas curvas y fuertes pendientes.

Se conoce que ya en la época precolonial existía un Camino Inca que desde Perú, pasando por Popayán, se dirigía hacia las tierras de Venezuela, superando la Cordillera Central a través del Paso del Quindío, coincidente con el actualmente identificado como Alto de La Línea.

La reducida participación del modo férreo deriva hacia el carretero toda la responsabilidad de dar respuesta al transporte de cargas, especialmente concentrado en el Paso de La Línea.

Las mallas viales que a lo largo de la historia se han ido configurando en las amplias cuencas del Magdalena y del Cauca confluyen en el Paso de la Línea como único enlace entre ellas que reúne condiciones suficientes, por cuanto no existe ningún otro paso vial pavimentado en unos 500 km hacia el sur (Ecuador), mientras que en unos 200 km hacia el norte sólo se encuentra el paso del Alto de Las Letras (3.750 m) en la ruta a Manizales, que sirve a una carretera de muy reducidas prestaciones y posibilidades.

Se deduce, pues, la total dependencia de las comunicaciones entre los valles citados respecto del Paso de La Línea, que al enlazar las ciudades de Armenia (Quindío) e Ibagué (Tolima) sirve al transporte de todo el país como ruta obligada en las relaciones Occidente - Oriente y viceversa, y entre la costa del Océano Pacífico (puerto de Buenaventura) y el área central que incluye el Distrito Capital Bogotá y el Departamento de Cundinamarca.

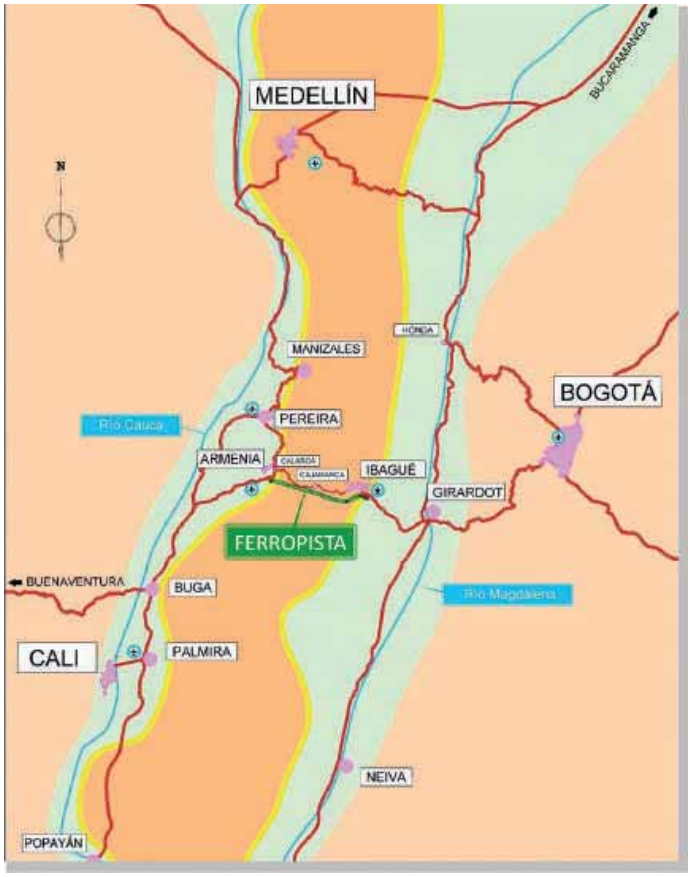


Fig. nº 1: Emplazamiento del Proyecto en la Cordillera Central.

Tabla nº 1: Tránsito promedio diario en la vía Armenia - Ibagué (Fuente: INVIAS, 2017).

	Autos	Buses	Camiones	TOTAL
TPD	2.011	644	3.795	6.450
%	33%	8%	59%	100%

Puede observarse que la vía actual, como parte importante del eje Bogotá - Buenaventura, está sometida a unas intensidades de uso vehicular pesado de gran importancia tanto en términos absolutos como relativos, pues este tipo de usuarios no tienen otra alternativa. Es una vía utilizada, fundamentalmente, para viajes de largos recorridos, salvo en lo que sirve para relacionar Cajamarca con Ibagué y el Departamento de Tolima, y viceversa.

El uso de transporte de personas a medias y largas distancias se hace en Colombia generalmente en avión, pues las vías terrestres no ofrecen costos y tiempos competitivos como consecuencia de sus notables limitaciones técnicas y del predominio de los camiones de todo tipo.

2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA VÍA POR EL ALTO DE LA LÍNEA.

La carretera Ruta 40 entre Armenia e Ibagué es un vial de una sola calzada de unos 7 m de anchura normal, que discurre apoyada en las laderas de los valles que conducen hasta el Alto de La Línea con un trazado muy

sinuoso de reducidos radios en planta, y con valores importantes de las pendientes y rampas, que llegan en algún punto al 18%, superando en buena parte del recorrido el valor del 10%, incluso contando con su continuada adaptación al terreno. Atraviesa la población de Cajamarca y discurre próxima a diversas edificaciones y explotaciones con accesos directos al vial.

Se ha ejecutado el Túnel de La Línea, de unos 8,65 km y a la cota 2500 msnm. aproximadamente, que funciona para canalizar el tránsito en el sentido único descendente hacia Calarcá (Armenia) una vez que también se ha terminado la doble calzada en construcción por INVIAS. También continúan las obras de una doble calzada entre Ibagué y Cajamarca mediante concesión a empresa privada. Según los plazos publicados se espera que en unos cuatro años se pueda llegar a circular con doble calzada para sentidos separados entre Calarcá e Ibagué, con un sentido de tránsito utilizando el nuevo túnel y el otro ascendiendo, como hasta ahora, al Alto de La Línea. La nueva calzada será utilizada por un sentido del tránsito y la carretera actual soportará el otro. No está programada una vía de evitamiento de Cajamarca, cuestión que presenta notables dificultades técnicas, ambientales y sociales.

La vía, incluso con las más recientes actuaciones ejecutadas, presenta serios problemas de funcionalidad, principalmente ocasionados por las deficiencias en seguridad vial derivadas de las fuertes pendientes y reducidos radios en planta, pero también por las inestabilidades de ladera propias de las elevadas pendientes transversales. Son habituales los cortes en la vía ocasionados por accidentes que involucran a las grandes tractomulas o por deslizamientos o hundimientos que requieren de actuaciones de emergencia para restaurar la funcionalidad viaria.

Por otra parte, la vía se enmarca en un entorno de elevado valor ambiental, que soporta significativos volúmenes de emisiones de gases de efecto invernadero, generación de ruido y el efecto barrera ocasionado por la infraestructura.

Sin embargo, como ya se ha explicado y se muestra en la siguiente figura, la vía es parte fundamental del principal corredor de transporte de Colombia, que soporta casi el 50% del comercio exterior de la Nación.

Fig. nº 2: Localización del Proyecto en relación con la red principal de infraestructuras.

3. COLOMBIA, PLANES DE INVERSIÓN Y DESARROLLO.

Colombia es el cuarto país de América del Sur en extensión, con amplias costas sobre los océanos Atlántico y Pacífico. Presenta un relieve muy heterogéneo. La región andina, que ocupa la mayor parte de su sector occidental, está compuesta por tres grandes ramales que atraviesan el territorio de Norte a Sur: la Cordillera Occidental, de menor altura, que corre paralela al litoral pacífico (nevado de Chumbal), la Cordillera Central, entre los ríos Cauca y Magdalena (nevado del Huila, de 5.750 m; nevado del Ruiz y nevado del Tolima, que superan los 5.200 m), y la Cordillera Oriental, entre el valle del Magdalena y Los Llanos (sierra Nevada de Cocuy, de 5.400 m de altitud).

Este accidentado relieve ha condicionado históricamente el desarrollo de infraestructuras en el país, que cuenta con una población de más de 48 millones de habitantes. Las principales aglomeraciones urbanas del país son las de Bogotá -el Distrito Capital-, Medellín, Cali, Barranquilla y Cartagena, que suponen casi el 50% de la población del país, con unos 19 millones de habitantes. En el área del triángulo que conforman las principales ciudades del país, Bogotá, Medellín y Cali, distanciadas en línea recta unos 300-350 km, se concentra el 65% de la población del país, con más de 30 millones de habitantes.

El GDP per Cápita del año 2019 fue de 6.420 US$ (FMI) habiendo sido sus incrementos anuales superiores a la media latinoamericana. Según datos del Banco de la República correspondientes al año 2019, la tasa de desempleo en se situó en el 9,53%. Las exportaciones en el año 2019 crecieron un 24,3% respecto a las del año 2016, con un crecimiento de la inversión extranjera directa (IED) del 22% de 2015 a 2019 (Banco de la República).

De acuerdo con el World Economic Forum (2018), Colombia ocupa el puesto 104 sobre 141 en Calidad General de Infraestructuras terrestre. En el siguiente gráfico, se recoge la comparación con otros países de referencia.

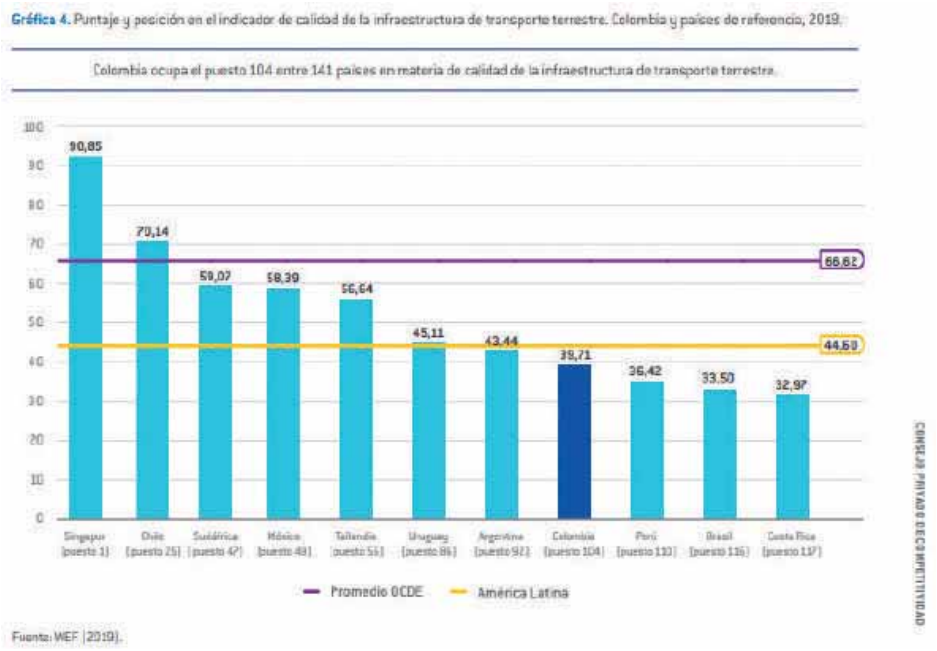


Figura nº 3: Calidad de la infraestructura en países de referencia. Año 2018 (Fuente: Informe Nacional de Competitividad)

Según se refleja en las Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2018 - 2022 (www.dnp.gov.co), que se denominó "Pacto por Colombia. Pacto por la Equidad", en Colombia "persisten un conjunto de factores y de restricciones que de no enfrentarse exitosamente comprometerán la continuidad del cambio social y la posibilidad de lograr un país con mayor equidad y calidad de vida para todos". Entre estas restricciones, el PND 2018-2022 cita, entre otras, el estancamiento de la productividad, las grandes disparidades regionales, la vulnerabilidad frente a riesgos de desastres y al cambio climático, entre muchas otras. Según se indica, "el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 trazará el curso de acción para remover dichos obstáculos y transformar las condiciones que hagan posible acelerar el crecimiento económico y la equidad de oportunidades".

En las Bases del Plan Nacional de Desarrollo se incluye un Capítulo VI "Pacto por el transporte y la logística para la competitividad y la integración regional", en el que se señala como premisa inicial que la reducción de costos de transporte, mediante la reducción de los tiempos de viaje, es condición para exportar e integrar a millones de ciudadanos a mercados y servicios, nacionales y extranjeros, contando con modos de transporte competitivos.

El Plan Maestro de Transporte Intermodal (PMTI 2015-2035) es una apuesta del Estado colombiano para organizar en forma eficiente y estratégica el crecimiento del país, a través de una red de infraestructura que logre conectar a las ciudades, las regiones, las fronteras y los puertos, priorizando los proyectos que mayor impacto tendrán sobre la economía de Colombia.

De acuerdo con el Plan Maestro de Transporte Intermodal, los costos de transporte en Colombia son los más altos de los países de referencia:

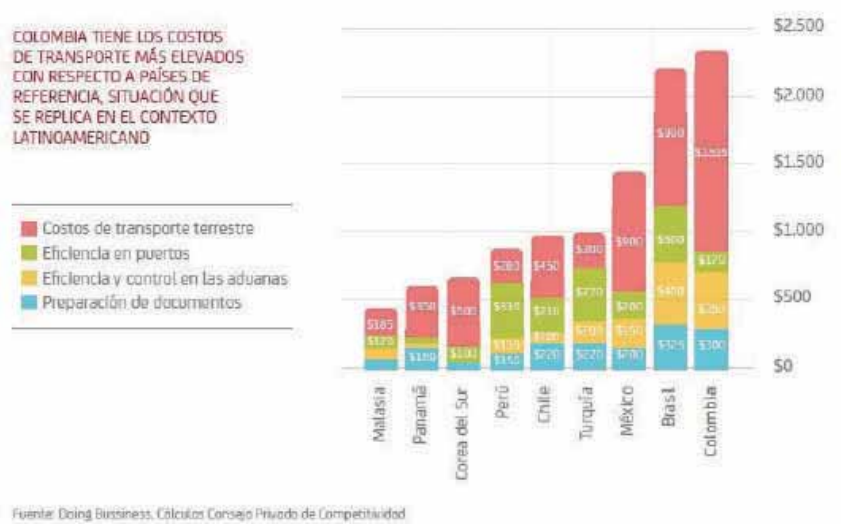


Figura nº 4: Costos de transporte en Colombia. Fuente: PMTI.

El Proyecto Ferropista queda identificado en este Plan Maestro como una posible "alternativa para cruzar la Cordillera Central mediante un túnel por La Línea".

4. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN: CONTINUIDAD A LA AUTOPISTA.

Como se ha indicado, la dependencia de las comunicaciones entre los valles del Magdalena y del Cauca respecto del Paso de La Línea, que enlazando las ciudades de Armenia (Quindío) e Ibagué (Tolima) sirve al transporte de todo el país como ruta obligada en las relaciones Occidente - Oriente y viceversa, y entre la costa del Océano Pacífico (puerto de Buenaventura) y el área central que incluye el Distrito Capital Bogotá y el Departamento de Cundinamarca, es absoluta.

La ausencia de vías alternativas en el corredor Bogotá - Buenaventura hace necesaria la implantación de este nuevo modo de transporte intermodal, que permita dar continuidad a la red de autopistas cuando estas enfrentan el macizo montañoso de la Cordillera Central. Se evita así el ascenso a cotas elevadas de los transportes de cargas que sirven de manera fundamental a la economía de Colombia, eliminando efectos ambientales negativos, colaborando en la integración social y en la equidad, y asegurando la fiabilidad de las vías que soportan una gran parte del comercio exterior del país.

Fig. nº 5: Esquema funcional de comunicaciones en la Región Central.

El servicio se orienta en su fase inicial al transporte de cargas, mediante la transferencia de camiones sobre plataformas ferroviarias, de forma similar a los sistemas ya operativos bajo los Alpes suizos o bajo el Canal de La Mancha.

Los casos que se exponen a continuación coinciden con la Ferropista en el concepto básico: aportan solución a la continuidad de las comunicaciones terrestres, en condiciones de eficiencia económica y calidad ambiental.

- Eurotúnel entre Francia (Calais) y Reino Unido (Folkestone). Con una longitud total de 50,5 km, de ellos 38 km a 40 metros bajo el lecho marino del Canal de la Mancha. Permite servicios ferroviarios de trenes de pasajeros, mercancías y shuttle de camiones. Transporta más de 1,5 millones de camiones al año. En servicio desde 1994.
- Túnel de Base de Lötschberg. Longitud del túnel principal: 34,6 km. Funciona con tubo para vía única, más un segundo tubo en el 30% de su longitud. En servicio desde 2007, lo operan más de 120 trenes de todo tipo al día, con velocidades de hasta 220 km/h. Transporta camiones sobre plataformas ferroviarias que evitan así circular por las autopistas suizas.
- Túnel de Base de San Gotardo. Inaugurado en 2016, tiene una longitud de 57 km, en doble tubo. El 80% de su longitud se ha excavado con TBM. Montera de hasta 2.300 metros. Se prevé el paso de hasta 250 trenes diarios de todo tipo, pudiendo alcanzar velocidades de hasta 250 km/h. Función similar al caso anterior.

- Túnel de Base de Brennero, entre Austria e Italia. Se encuentra en construcción, con una longitud de 55 km. Doble tubo en toda su longitud. Se prevé alcanzar el 70% de la excavación con TBM. Permitirá velocidades de hasta 250 km/h. Circularán trenes trasladando camiones entre Alemania e Italia.
- Túnel de Seikan (Japón). Túnel bajo el mar, con casi 54 km de longitud. Entró en servicio en 1988 y se excavó íntegramente por métodos convencionales. Circulan unos 50 trenes diarios, incluido el tren bala, aunque a velocidades máximas de 140 km/h. Todo tipo de usuarios.

La combinación de las ideas conceptuales que fundamentan los túneles ferroviarios de base y el objetivo principal de dar continuidad a las autopistas, mediante el trasbordo del camión al tren, tiene como resultado la implantación de un sistema del tipo de la Ferropista, que presenta los siguientes impactos positivos sobre el transporte y la logística:

- Reduce los costos operacionales y los tiempos de viaje.
- Optimiza la eficiencia, la sostenibilidad, la fiabilidad y la seguridad del transporte.
- Mejora el servicio y la seguridad en la carretera actual por el Paso de La Línea.
- Contribuye a la preservación ambiental gracias a la muy considerable reducción de emisiones de gases contaminantes y a la disminución del consumo de combustibles fósiles.
- Función complementaria con la carretera: especialización por usuarios.

Las muy importantes demandas que sobre este corredor recaen – 1,5 millones de camiones/año – y su papel estratégico para la economía y articulación social en Colombia, así como su insoslayable función en el desarrollo futuro de las comunicaciones terrestres aconsejan ofrecer una solución de largo alcance que resuelva para el largo plazo este problema tradicional de la Nación colombiana.

5. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO FERROPISTA.

Se ofrece una solución innovadora y de gran alcance para las comunicaciones Oriente-Occidente y viceversa en la zona central de Colombia, orientada a dar servicio a todo el país pero, en especial, a los 30 millones de personas (más del 60% del total) que habitan dicho espacio, equivalente a solamente el 7% del territorio de la Nación. La carretera por el Alto de La Línea es la vía que sirve, prácticamente en exclusiva, a este eje logístico principal, que dispone hoy de una infraestructura de limitadas prestaciones, aun cuando se han llevado a cabo significativas actuaciones para mejorarla. Múltiples dificultades geográficas afectan a esta vía, entre las que destaca la barrera física que supone la Cordillera Central de los Andes, según ya se ha expuesto con anterioridad.

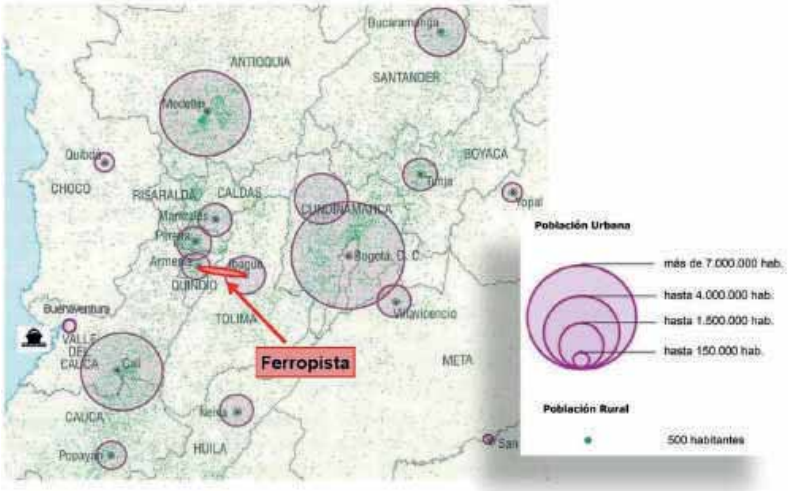


Fig. nº 6: La Ferropista en relación a la población de Colombia (IGAC).

Este moderno sistema de transporte se ha concebido para el desplazamiento de vehículos pesados (camiones y tractomulas) sobre plataformas ferroviarias (vagones), que son arrastradas por locomotoras de tracción eléctrica, para una comunicación rápida y eficiente entre un lado y otro de la Cordillera Central, ofreciendo una solución de máxima calidad y eficiencia para la continuidad de las mallas viales en los valles de los ríos Cauca y Magdalena. Es una solución multimodal para el principal eje de transporte en Colombia.

El sistema previsto requiere la carga y descarga directa de los camiones sobre vagones-plataforma, operación que será realizada por los propios conductores de los camiones. El acceso se realiza de forma lateral por el extremo trasero de la composición ferroviaria, para circular a continuación sobre el conjunto de las plataformas hasta posicionarse uno detrás de otro en su plataforma respectiva. La descarga se efectúa a la inversa, por la parte delantera del tren, también de forma lateral desde la primera plataforma.

Se plantea que los trenes se compongan de 35 vagones-plataforma cada uno, a los que se añade un furgón debidamente acondicionado en el que harán el recorrido ferroviario los conductores y auxiliares, si los hubiere, de los camiones. La tracción se confía a locomotoras de gran potencia alimentadas por energía eléctrica. Estas composiciones alcanzarán longitudes de unos 750 m.

Fig. nº 7: Esquema parcial de la composición férrea.

Las dos grandes estaciones de trasbordo se dotan de controles de acceso y seguridad, abono del peaje en forma electrónica, servicios de hostelería al transportista, servicios de mantenimiento de vehículos, servicios logísticos, etc. En la estación de Ibagué, de mayor extensión, se montarán instalaciones industriales para la fabricación de las plataformas férreas y para su mantenimiento y el del conjunto del sistema. Se ha previsto la creación de una zona franca que abarque la totalidad de los espacios ocupados por la Ferropista, que podrá ofrecer una gran diversidad de servicios logísticos de calidad a la cadena del transporte en la zona central de Colombia.

Fig. nº 8: Estación de Ibagué.

Los trenes podrán circular en ambos sentidos por la misma vía, alternándose mediante regulación centralizada controlada electrónicamente desde un puesto central. En períodos horarios de mayores demandas se dispondrá la circulación de varios trenes sucesivos, separados entre sí unos dos minutos, en el mismo sentido. La disposición de tramos de doble vía, en la parte central del túnel de base, permitirá incrementar la capacidad del sistema y obtener mayores niveles de calidad al poder reducir así los tiempos de espera para carga en las dos estaciones. Se estima que en una primera etapa de funcionamiento habrán de circular 100/120 trenes cada día, cifra que se irá incrementando según crezcan las demandas y se amplíe la capacidad del sistema.

El tiempo para realizar el recorrido entre las estaciones será de unos 30 minutos lo que significa que el tiempo integrado de viaje contando con la carga y descarga será de unos 70 minutos.

Fig. nº 9: Tiempos de operación de la Ferropista

Las estaciones de trasbordo de Armenia e Ibagué se conectarán mediante un enlace ferroviario de unos 58 km. de longitud total, que incluye un túnel de base de unos 44 km. de longitud bajo la Cordillera Central. Se prevé asimismo un tramo de túnel doble en la zona central interior del túnel de base, a modo de by-pass, que permitirá el cruce de trenes. Este tramo tendrá una longitud aproximada de 12 km. Este tramo doble ofrecerá también importantes ventajas durante las etapas de construcción y operación, y se podrá ir extendiendo conforme crezca la demanda del sistema, sin afectar a la circulación en el túnel principal.

Fig. nº 10: Túnel de Base de la Ferropista frente a la solución vial por el Túnel de la Línea.

El Paso de La Línea está ubicado en la zona de menor anchura de la Cordillera Central y donde las alturas no son las más elevadas. La malla vial en servicio lo identifica y establece con claridad, y los planes de nuevos viales colaboran en la consolidación de este esquema general.

Fig. nº 11: Emplazamiento de la Ferropista.

El trazado se diseña para que se puedan alcanzar velocidades, al menos, de 120 km/h. Las rasantes tendrán valores que no superan el 1,3%, en consideración a la elevada carga que han de trasladar los trenes y a la optimización del consumo de energía. En planta la geometría en la zona del túnel de base se adapta a los emplazamientos de las cinco galerías de acceso transversal.

Para dar atención a las demandas que se plantean y optimizar la solución, el ancho de vía será el estándar internacional UIC de 1,435m, sobre placa de hormigón, sin balasto; la tracción prevista es eléctrica, alimentada desde dos subestaciones transformadoras a situar en cada una de las estaciones de los extremos de la línea férrea.

La sección normal del túnel de base será la adecuada para vía única; se estudia la conveniencia de ejecutar tramos en sección para doble vía para conseguir mayor capacidad y mejor calidad de servicio (reducción de tiempos de espera para carga).

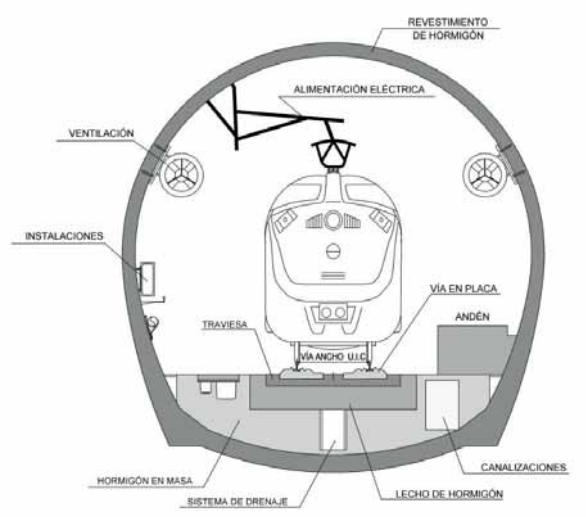


Fig. nº 12: Sección tipo esquemática del túnel (tramo de excavación convencional).

Se prevé la ejecución de hasta cinco galerías de acceso transversal, para hacer posible la apertura de hasta doce frentes de ataque en las excavaciones. Estas galerías, de longitudes comprendidas entre 1 km y 5,7 km y pendientes entre el 10 y el 15% se conectan con viales principales (Ruta 40) o terciarios de la zona. Con estos accesos se facilitan, además, las condiciones de seguridad durante la operación del sistema, así como la ejecución de un segundo túnel paralelo sin afectar el servicio en el primero.

Fig. nº 13: Galerías de acceso transversal y métodos de perforación previstos.

Lo abrupto del relieve en toda la Cordillera, consecuencia de su historia geológica, es importante elemento a considerar en cualquier proyecto de infraestructura terrestre de transporte en Colombia. La geología y las diferentes formaciones que se presentan han de ser tenidas muy en cuenta al abordar un gran proyecto como la Ferropista. Nos encontramos con un marco geológico caracterizado por entidades litológicas heterogéneas, con relaciones estructurales complejas, con afectaciones tectónicas localizadas y con notable actividad sísmica y volcánica. El túnel principal se ubicará en la zona de los Complejos Quebradagrande y Cajamarca así como en el Batolito de Ibagué, con formaciones rocosas de muy diversas problemáticas, mientras que un segundo túnel de menor longitud se emplazará también en el Batolito de Ibagué.

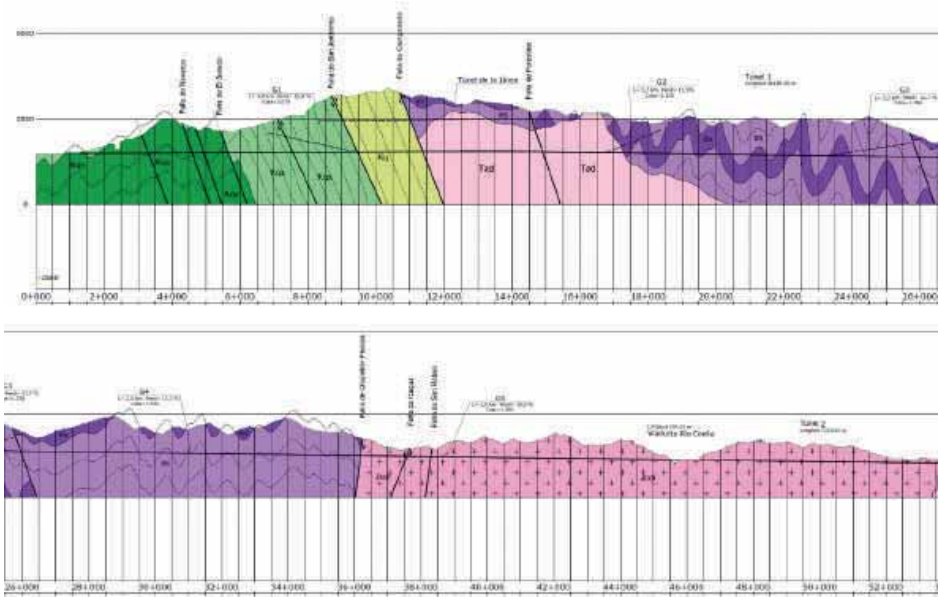


Fig. nº 14: Perfil geológico esquemático del proyecto.

Los regímenes de fuertes lluvias en la zona generan con frecuencia deslizamientos de ladera y desprendimiento de la plataforma de los viales actuales, aparte el efecto perturbador directo para el tránsito general y para su seguridad.

Estas realidades hacen menos recomendables las soluciones que hubieran de discurrir apoyadas en las laderas de las montañas, en particular en las márgenes del río Coello, de la cuenca del Magdalena, que, además, pueden llegar a verse afectadas por erupciones del volcán - hoy inactivo - Cerro Machín, a escasa distancia del citado río Coello, hacia el que habrían de fluir sus lavas. La sismicidad que cabría esperar de tal erupción no alcanzaría niveles que afectaran a túneles ubicados en el interior de la montaña, como el de la Ferropista, emplazado a unos 10 km.

El sistema hidrográfico en la zona del proyecto está bastante desarrollado y sujeto a importantes fluctuaciones de caudal como consecuencia de intensas lluvias. La hidrología subterránea es un aspecto al que se presta especial atención en los estudios en curso, tanto porque podrían llegar a afectarse páramos y zonas de cultivos emplazados sobre la cobertera del túnel de base, como por lo que podrían perturbar la perforación y ejecución de los túneles. El diseño de las soluciones constructivas ha de resolver estas problemáticas en la fase de preconstrucción.

A pesar de los condicionantes –fundamentalmente geológicos- existentes, se considera que el proyecto es complejo, pero técnicamente viable.

6. IMPACTOS ECONÓMICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES.

La construcción, el mantenimiento y la operación durante el periodo de concesión de un mega-proyecto como la Ferropista en la Cordillera Central lleva consigo la aparición de importantes beneficios económicos, sociales y ambientales en toda la Región Central de Colombia, extendiéndose algunos de estos efectos al ámbito del país en su totalidad.

Los principales impactos económicos del Proyecto Ferropista pueden clasificarse en ventajas para los usuarios directos y beneficios para el conjunto de la sociedad colombiana.

La Ferropista en la Cordillera Central de los Andes aportará sustanciales beneficios a los principales usuarios del sistema, que serán los originadores y transportadores de carga, en forma de ahorro en costos operacionales.

En el año de puesta en servicio (2030) se estima que se obtendrían los siguientes efectos:

- Por el uso de la Ferropista, una tractomula obtendrá un ahorro neto del orden de 70 dólares por trayecto (256.000 pesos colombianos).
- En términos de tiempo, cada vehículo pesado ahorraría en su desplazamiento más de 2 horas por trayecto, alcanzado más de 300 horas al año, con lo que podría aumentar su productividad en un 14%, como mínimo.
- En el primer año de servicio, el ahorro para el sector del transporte de carga alcanzaría un total de 235 Millones de dólares.

Figura nº 15: Ahorros por uso de la Ferropista para camiones de 3 ejes y superiores.

Los beneficios para el país generados por la Ferropista aparecerán en forma de:

- Recaudos fiscales, que en los primeros 30 años alcanzan un total de 9.800 Mill. US$.
- Crecimiento esperado del comercio exterior: 3,3%.
- Impacto económico sobre el PIB de Colombia del orden del 0,25%.

El Proyecto Ferropista está orientado a prestar servicios muy diversos e importantes a la población, contribuyendo a evitar en lo posible los inconvenientes y problemas que representa la Cordillera Central de los Andes en las relaciones de todo tipo entre los colombianos. La población beneficiada por el Proyecto Ferropista se evalúa en unos 30 millones de personas, que son las que habitan en la Región Central Andina de Colombia.

Entre los principales impactos sociales, se pueden destacar:

- La obtención de resultados económicos favorables para la Nación hará posible que se puedan afrontar otras inversiones públicas en beneficio de la población.
- Gran contribución a la integración entre diferentes poblaciones hoy mal comunicadas.
- Más y mejores soluciones para el acceso de toda la población de la zona central de Colombia a la salud, a la cultura, a la educación, al comercio, al turismo, etc. favoreciendo la equidad y la igualdad de oportunidades.
- Menores tiempos de viaje para camiones (por uso de la Ferropista) y también para autos y buses en la carretera (por mejores condiciones de uso sin la presencia de camiones).
- Mayor seguridad, fiabilidad y garantías en los desplazamientos de cargas y personas.
- Mejoras apreciables en la calidad de vida de la población, en su confort y en su seguridad, reforzando, a la vez, el sentido de convivencia pacífica entre los colombianos.
- Gran beneficio para las poblaciones residentes en las proximidades de la vía citada y para los habitantes de Cajamarca.
- Desarrollo en Colombia de nuevas tecnologías, creando oportunidades para la innovación, la formación de expertos en las mismas y para implantación de nuevas industrias.
- Creación de más de 20.000 empleos directos durante la fase de construcción, y más de 2.000 empleos permanentes en la fase de operación y mantenimiento.

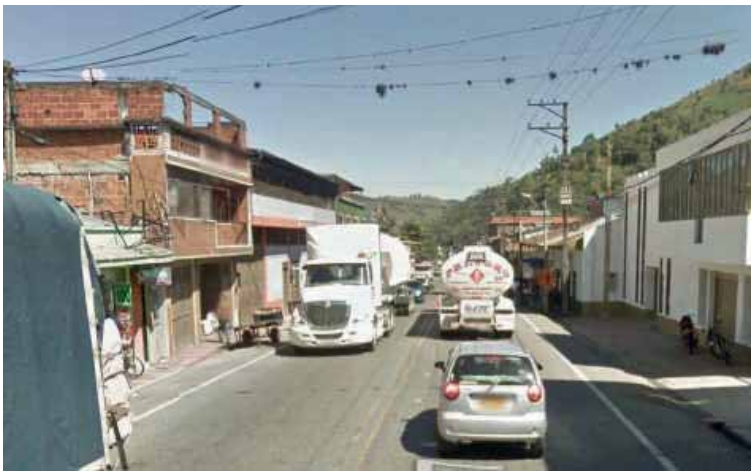


Fig. nº 16: Paso de tractomulas por la actual travesía de Cajamarca

El proyecto Ferropista nace tanto desde objetivos de eficiencia y economía en el transporte de cargas en la zona central de Colombia, como desde la consideración de la lucha contra el cambio climático, una tarea esencial en los tiempos actuales. Las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por los vehículos que circulan por la Ruta 40, entre Armenia e Ibagué, suponen un elemento de importancia en esta problemática ambiental, tanto por el elevado volumen del tránsito de autos y camiones, como por lo que los potentes motores de estos últimos emiten a la atmósfera al tener que ascender más de 2.000 metros de diferencia de

cota en la carretera. Las perspectivas de desarrollo del país han de significar altos crecimientos en el tránsito en esta ruta vital para el comercio, exterior e interior, de Colombia, lo que derivará con toda certeza en un aumento notable de emisiones de gases nocivos si no se adoptan medidas para evitarlo.

El proyecto Ferropista, de manera similar a lo que países como Suiza se plantearon hace ya tres décadas, viene a contribuir de manera poderosa a superar esta situación, colaborando a la vez en el cumplimiento de los compromisos adoptados por Colombia en la lucha contra el cambio climático.

Fig. nº 17: Reducción de emisiones y consumos energéticos.

Así, entre los efectos ambientales positivos alcanzados con la ejecución del Proyecto Ferropista estarían:

- Ahorro de más de 120 millones de litros de combustible sólo en el primer año de funcionamiento.
- En los primeros 50 años, se evita la emisión de más de 20 millones de toneladas de GEI.
- En los primeros 30 años, se genera un ahorro en externalidades del transporte (congestión, polución, ruido, etc.) de más de 8.800 millones de dólares.

Desde la etapa de concepción y diseño inicial del Proyecto, se han considerado medidas de mitigación de los impactos ambientales. En este sentido, se prevé que, de los más de 9 millones de metros cúbicos de rocas y tierras procedentes de las excavaciones, un 30% se reutilizará para la fabricación de hormigones necesarios para los revestimientos de los túneles, así como para las soleras y placas de base de las vías férreas. El resto del material será utilizado para la nivelación de las dos grandes plataformas necesarias para las estaciones de trasbordo, consiguiéndose de esta forma evitar la necesidad de crear vertederos para ubicar los excedentes.

7. GESTIÓN Y MOMENTO DEL PROYECTO.

Las sociedades promotoras del proyecto, en el marco de la Ley 1508 de 2012 de APP, han entendido desde que iniciaron los estudios y gestiones del proyecto Ferropista que es imprescindible conectar con los departamentos administrativos y con los grupos sociales que tengan o puedan llegar a tener algún tipo de relación con el Proyecto en sí o con sus servicios y efectos.

El proyecto es bien conocido por las principales asociaciones y entidades técnicas, económicas y sociales de Colombia, tanto públicas como privadas, que reconocen su gran necesidad y rentabilidad. También por las principales compañías de construcción y operación de vías de España, USA, Canadá, Reino Unido, Francia, Alemania, Italia, Australia, México, China y Brasil.

El Proyecto Ferropista fue galardonado como "Proyecto de Ingeniería del Año 2018" en el 16th Latin American and Caribbean Infrastructure Leadership Forum, celebrado en Miami (Florida – 2018), e identificado por la revista FORBES como uno de los 4 proyectos estratégicos del mundo.

Con fecha de 26 de enero de 2018, la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) de Colombia otorgó la Declaración de Viable, identificando el interés estratégico del Proyecto.

La estructuración técnica y legal desarrollada hasta la fecha es acorde al momento del Proyecto. Los informes de evaluación de la ANI sobre el componente técnico en Etapa de Factibilidad establecen el grado de validez en al menos el 90%. Se trabaja en la estructuración financiera.

Se considera necesario un reforzamiento del Proyecto mediante apoyos orientados al control y compensación de los riesgos que un proyecto como la Ferropista conlleva de forma inexorable. En este sentido, se está estudiando la aplicación de medidas de apoyo mediante normativas fiscales: Zona Franca, aumento del plazo de concesión, tasa ambiental, aplicación de regalías y otras.

Los riesgos no pueden ser completamente eliminados, pero mediante un buen análisis y una adecuada asignación a quien mejor pueden gestionarlos, pueden llegar a ser controlados y reducidos sus impactos negativos.

La Ferropista es un proyecto que nace adaptado a unas demandas y objetivos reales, y no apoyado en previsiones de desarrollos futuros que estarían hoy por confirmar. Se incorpora desde la fase inicial de diseño la consideración de los procesos y soluciones constructivas que se pueden requerir en función de las características de los terrenos y de la geografía de la zona involucrada.

La reducción del periodo de construcción al mínimo posible es un factor de gran importancia en un proyecto de las características de la Ferropista. Es un factor de reducción y control de riesgos y costos muy significativo.

Por otra parte, reviste gran importancia asegurar el cumplimiento de plazos intermedios para los diferentes actores intervinientes: autoridades gubernamentales, ambientales, locales, entes sociales, etc.

La colaboración del sector público resulta muy necesaria para promover el interés de la población y de todo tipo de actores involucrados, y para definir objetivos y crear marcos regulatorios adecuados para aplicar en las relaciones con el agente privado. Entre ambos se ha de conseguir un proyecto que resulte atractivo para la Nación y para el concesionario.

Una adecuada evaluación de las externalidades presentes en la situación actual y en la futura ofrece una clara fundamentación a estas necesarias políticas de gestión de los transportes y de impulso al multimodalismo.

8. OPERACIÓN Y FINANCIACIÓN.

Con base a costos de construcción en Colombia y considerando datos deducidos de otros estudios y proyectos desarrollados en el mundo, adaptados al país en sus precios unitarios, se dispone en la etapa de Factibilidad en que se encuentra el desarrollo del proyecto de una estimación fiable de lo que puede llegar a costar la ejecución de la Ferropista. En el cuadro que se acompaña se resumen las valoraciones realizadas:

Tabla nº 2: Costos de construcción de la Ferropista

Construcción	Mill. US$
Obra civil	2.190
Vías, instalaciones y energía	170
Estaciones de trasbordo	150
Costo ambiental, social y predial	100
Estudios y Asesorías	100
TOTAL	**2.710**

Por otra parte, la estimación de costos anuales de operación y mantenimiento alcanza los 120 Mill. US$ al año.

Ha de quedar garantizado el adecuado nivel de ingresos para asegurar la financiación con las garantías de estabilidad imprescindibles. Estos ingresos provienen fundamentalmente del cobro de las tarifas de uso de la Ferropista, complementándose con los ingresos derivados de la explotación comercial de las estaciones de trasbordo y del cobro a terceros por el empleo del túnel de la Ferropista como elemento de transporte para redes de servicios.

Las tarifas previstas para el uso de la Ferropista garantizan que la nueva infraestructura ofrezca un servicio competitivo basado en el ahorro para el usuario de costos operacionales y tiempos de recorrido, así como en las mejores condiciones de seguridad, confort y garantía en el desplazamiento de la carga.

9. CONCLUSIONES

El Proyecto Ferropista, aunque férreo en su solución técnica, es un proyecto de mejora de la continuidad y del servicio de la red vial de Colombia, y queda así ligado a las expectativas de demanda de esta malla.

Se trata, por tanto, de una solución absolutamente singular, de excepcional importancia estratégica para Colombia y viable técnica y financieramente. En su concepción, sigue de forma completa y fiel las directrices de la lucha contra el cambio climático (COP 26).

Se requiere plantear, junto con los entes gubernamentales involucrados, fórmulas de gestión innovadoras para el apoyo y respaldo institucional del Proyecto, entre ellas, medidas fiscales que no supongan aportación de fondos públicos.

La Ferropista tiene por objetivo fundamental hacer de Colombia un país más competitivo, a partir de la "eliminación" de la Cordillera Central de los Andes como barrera casi insuperable hasta ahora.

Es un proyecto que ha de ser histórico para Colombia, pues habrá un antes y un después de su ejecución, en lo social, en lo económico y en lo ambiental.

PROYECTO INNOVACIÓN: CARRETERA CONECTADA / CROADS

Sergio Barral García
Calle 30

MC30 siempre ha tenido motivaciones para innovar y desarrollar nuevas tecnologías que supongan una mejora para la gestión, para la conservación y, sobre todo, que redunden en la mejora de la seguridad vial y de los usuarios de la vía.

Uno de los últimos proyectos en los que se ha trabajado durante más de 4 años ha sido el proyecto europeo CROADS formado por un consorcio de 28 empresas/entidades lideradas por la DGT y el Mº Fomento en el que se ha desplegado unos equipos por la carretera y en vehículos que han permitido lanzar mensajes en tiempo real sobre diferentes incidencias que pueden encontrarse en la carretera los usuarios.

Se ha desarrollado un HUB C-ITS en el Centro de Control de MC30 desde el que se analiza el estado de la carretera, las incidencias, los cortes de calzada, el tráfico, etc para, de forma completamente automática, generar los avisos oportunos a una flota de vehículos equipada con equipos que reciben en tiempo real esa información.

El éxito del proyecto ha consistido en un gran trabajo de equipo con grandes profesionales multidisciplinar pero conocedores de su ámbito concreto y todos mirando en la misma dirección y buscando soluciones a todos los problemas surgidos durante el proyecto.

INNOVATION PROJECT: CONNECTED ROAD / CROADS

MC30 has always been motivated to innovate and develop new technologies that improve management, conservation and, above all, improve road safety and road users.

One of the latest projects that has been worked on for more than 4 years has been the European CROADS project, made up of a consortium of 28 companies/entities led by the DGT and the Ministry of Development, in which some teams have been deployed along the road and in vehicles that have made it possible to launch messages in real time about different incidents that vehicles may encounter on the road.

A HUB C-ITS has been developed in the MC30 Control Center from which the state of the road, incidents, road closures, traffic, etc. are analyzed to, completely automatically, generate the appropriate warnings to a fleet of vehicles equipped with equipment that receives this information in real time.

The success of the project has consisted of great teamwork with great professionals from many different disciplines but knowledgeable about their specific field and all looking in the same direction and seeking solutions to all the problems that arose during the project.

PROJET D'INNOVATION : ROUTE CONNECTÉE / CROADS

MC30 a toujours été motivé pour innover et développer de nouvelles technologies qui améliorent la gestion, la conservation et, surtout, améliorent la sécurité routière et les usagers de la route.

L'un des derniers projets sur lesquels on travaille depuis plus de 4 ans est le projet européen CROADS, constitué d'un consortium de 28 entreprises/entités piloté par la DGT et le ministère du développement, dans lequel certaines équipes ont été déployées le long la route et dans les véhicules qui ont permis de lancer des messages en temps réel sur les différents incidents que les véhicules peuvent rencontrer sur la route.

Un HUB C-ITS a été développé dans le centre de contrôle MC30 à partir duquel l'état de la route, les incidents, les fermetures de routes, le trafic, etc. sont analysés pour, de manière entièrement automatique, générer les avertissements appropriés à une flotte de véhicules équipés d'équipements qui reçoit ces informations en temps réel.

Le succès du projet a consisté en un excellent travail d'équipe avec de grands professionnels de nombreuses disciplines différentes mais connaissant leur domaine spécifique et regardant tous dans la même direction et cherchant des solutions à tous les problèmes survenus au cours du projet.

Ha pasado ya un tiempo prudencial desde que se finalizó el despliegue y desarrollo del proyecto C-ROADS España con el que se ha puesto de manifiesto la posibilidad real de conectar la carretera con el vehículo de manera que se mejoren tanto la seguridad vial de los usuarios como la de los trabajadores de la carretera. Esta gran aventura en la que nos embarcamos en el año 2016 se antojaba difícil, compleja y con mucha incertidumbre, pero, al echar la vista atrás, nos parece increíble todo lo que se ha trabajado, el desarrollo realizado y los buenos aprendizajes obtenidos para el futuro de las carreteras y la conectividad global.

En Madrid Calle 30 siempre hemos tenido muy presente que la tecnología avanza a pasos agigantados y que si queremos mantener el nivel de seguridad y prestaciones en los túneles urbanos más grandes del mundo no nos queda otra salida que estar en continuo contacto con las novedades tecnológicas y estar presente de lleno, y no sólo como meros observadores, de todos los avances e innovaciones que se desarrollan prácticamente de forma diaria.

Como se podrá comprender fácilmente, la magnitud y repercusión que tiene la vía de circunvalación más importante de la capital de España, Madrid, hace que este conjunto de tecnología (en breve entraremos en profundidad en los detalles) realmente abarque toda su máxima expresión y extensión la prácticamente totalidad de los ámbitos técnicos, industriales, informáticos e ingenieriles que se puedan imaginar y en los que debemos centrar nuestra atención, esforzarnos en conocer de forma muy intensiva los nuevos productos que se desarrollan y pensar en la aplicación directa, práctica y útil en la carretera.

Sin querer extendernos mucho, y a modo representativo, los campos más importantes de la M-30 en los que se pueden desarrollar toda aquella innovación que surja van desde la seguridad vial, la intervención en accidentes graves, el mantenimiento de equipos complejos, los sistemas de comunicaciones, la gestión del tráfico, conservación de la infraestructura civil, sistemas de guiado, vehículos eléctricos, información al usuario, reducción de la mortalidad, optimización de la flota y un largo etcétera.

Por estos motivos, cuando en el año 2016 nos propusieron la posibilidad de formar parte de un consorcio nacional para un proyecto a nivel europeo con la participación de gran parte de los países de la UE para desplegar y desarrollar un sistema que conectara la carretera con el vehículo de forma directa y personalizada, no tuvimos ninguna duda en que debíamos estar presentes. Pero no como uno más, sino liderando uno de los pilotos del consorcio y aplicándolo sobre la M-30.

Aquí comenzó nuestra andadura en un proyecto con una tecnología de la que desconocíamos hasta ese momento cómo funcionaba, las posibilidades que tenía y los problemas que iban a surgir, lo que supuso un mayor reto que abordar.

Lógicamente, la magnitud del desafío implicaba mayor dificultad y muchos problemas que en aquel momento ni siquiera podíamos imaginar, pero, a pesar de los momentos de dudas, de obstáculos, decepciones y, ¿por qué no decirlo? desesperación ante la posibilidad de no ser capaces de seguir adelante, la satisfacción no fue sino mayor al ver cómo íbamos superando las barreras que surgían en el día a día.

Y todo esto nunca podía haber sido posible sin un gran equipo humano, tanto en lo personal como en lo profesional. Personas con perfiles totalmente diferentes y dispares (ingenieros civiles, de telecomunicaciones, industriales, informáticos, conductores, mecánicos, etc) que sólo tuvieron una obsesión: encontrar soluciones para superar las dificultades y completar con éxito el proyecto.

Ruego que se me perdone un prolegómeno quizás demasiado extenso, pero espero que sepan entenderme... entender la implicación tan grande que ha habido con el proyecto y el vínculo afectivo tan grande en el que ha desembocado que, inevitablemente, me lleva a recordar todos esos sentimientos que a lo largo de 4 largos años han ido pasando por nuestras cabezas y nuestros corazones.

Por ello, ha llegado el momento de dejar de dar rodeos y entrar de lleno en los detalles del proyecto del que es cuestión este artículo y que con gran alegría y esfuerzo hemos sacado adelante tantas personas y que nos complace explicar con todo detalle para conocimiento de todo aquel que tenga inquietudes por este sistema y tecnología: C-ROADS SPAIN.

El año 2016, la Comisión Europea lanzó una convocatoria de ayudas englobadas dentro del Programa CEF (Connecting Europe Facility) para el desarrollo de proyectos y/o actuaciones de despliegue relacionados tanto con ITS "tradicional", como C-ITS (ITS colaborativo o conectado).

La singularidad de este programa era que los proyectos involucrados debían llevar consigo un despliegue real en campo, es decir, tener un desarrollo práctico y palpable en la carretera y no quedar en un estudio de I+D sin aplicación práctica. Se quería dar un paso trascendental que permitiera su análisis y la comprobación final de los resultados obtenidos.

El Programa CEF fue lanzado en septiembre de 2014 a nivel europeo. Desde entonces, varios países del entorno comenzaron a crear plataformas C-ROADS, que agupaba los desarrollos nacionales de proyectos C-ITS y recibieron fondos de anteriores convocatorias de ayudas. Además, se constituyó la plataforma C-ROADS-EU, que aglutinaba, a su vez, a las distintas plataformas C-ROADS nacionales con el objetivo de garantizar que los proyectos de C-ITS que desarrollasen los distintos Estados fueran homogéneas e interoperables y que el conocimiento que se alcanzara de estos proyectos fuera de interés para el conjunto de la red transeuropea y pudiera dar lugar a futuras especificaciones armonizadas.

Por parte de España, se decidió que había llegado el momento de desarrollar y desplegar un proyecto nacional que reuniera a los diversos operadores, gestores y suministradores tecnológicos que pudieran llevar a cabo el proyecto.

Así que se decidió dar el paso a delante desde los Ministerios del Interior (DGT) y el de Fomento, los cuales, conjuntamente, valoraron la posibilidad y necesidad de constituir una plataforma C-ROADS España, que englobara todos los proyectos relacionados con C-ITS en nuestro país susceptibles de presentarse a la convocatoria de ayudas.

En noviembre de 2016, como ya hemos comentado al inicio de la comunicación, Madrid Calle 30 S.A. recibe información de este innovador proyecto, y toma la decisión de participar en el mismo al ver las grandes posibilidades que puede aportar de cara a una mejor explotación de la carretera y, sobre todo, a una mejor información a los usuarios de la misma y, por supuesto, a la mejora de la seguridad vial.

Pero antes de continuar con la parte más práctica del proyecto y el despliegue, vamos a explicar con más detalle el alcance de los fondos europeos que hicieron posible el desarrollo de estos sistemas cooperativos a nivel europeo.

El principal objetivo del Programa CEF era ayudar a completar la red transeuropea de transporte (TEN-T) de alto rendimiento, sostenible y eficiente hacia 2030 financiando diversos tipos de acciones. La financiación del CEF se realiza a través de subvenciones, tras la convocatoria de propuestas. Las claves para desarrollar buenas propuestas son estimular la sostenibilidad y la eficiencia del transporte, así como justificar la mejora de la red transeuropea de transporte principal (Core Network) o general (Comprehensive Network).

Las prioridades básicas del programa son:

- Principales proyectos transfronterizos y proyectos que aborden los principales cuellos de botella de los nueve corredores multimodales de la red TEN-T.
- Proyectos previamente determinados en la red principal, así como otros proyectos tanto en la red principal como en la general.
- Aplicación de las prioridades horizontales.
- Nuevas tecnologías e innovación.
- Aumentar las oportunidades de apoyo a la inversión privada.
- Conectar la red TEN-T con los países colindantes.

Los 9 corredores de la red TEN-T son los siguientes:

En particular, la Comisión Europea estableció como principal objetivo del proyecto C-ROADS y C-ITS el ayudar a la implementación de sistemas ITS en las carreteras con dos enfoques y prioridades bien definidas:

- La creación de sistemas ITS cooperativos y que permitan la interconexión entre diferentes centros de control de los principales corredores europeos y
- Que sean sistemas inteligentes que permitan la comunicación bidireccional entre la carretera y el usuario.

La Comisión Europea esperaba que las acciones propuestas cumplan con los siguientes requisitos:

- Demostrar la viabilidad y escalabilidad de C-ITS y su automatización.
- Cubrir variedad de flotas.
- Uso de C-ITS en la Red Central, incluyendo los Corredores de la Red Central, los Nodos Urbanos así como los Centros de Gestión del Tráfico.
- Preparar la convergencia de los sistemas cooperativos y la automatización del mismo:
    - o Dotando a la infraestructura del equipamiento necesario (redes físicas y digitales),
    - o Evidenciando la capacidad de la comunicación híbrida (WIFI y red móvil),
    - o Y demostrando la posibilidad de la integración del sistema superando las dificultades y limitaciones existentes en la actualidad.

El presupuesto global del programa fue de 120M€ en subvenciones. La cuantía total de la ayuda que cada proyecto/empresa podían alcanzar se situó en el 50% del coste para estudios y 20% del coste para equipos instalados en vía o a bordo.

Con estos antecedentes y en el contexto continental se conformó el consorcio español y se lanzó el proyecto C-ROADS España, el cual iba a ser (y lo ha sido) un proyecto piloto cuyo objetivo era desarrollar y experimentar innovadoras soluciones C-ITS de carreteras. C-ROADS España ha querido impulsar la adopción de soluciones C-ITS flexibles, interoperables y escalables.

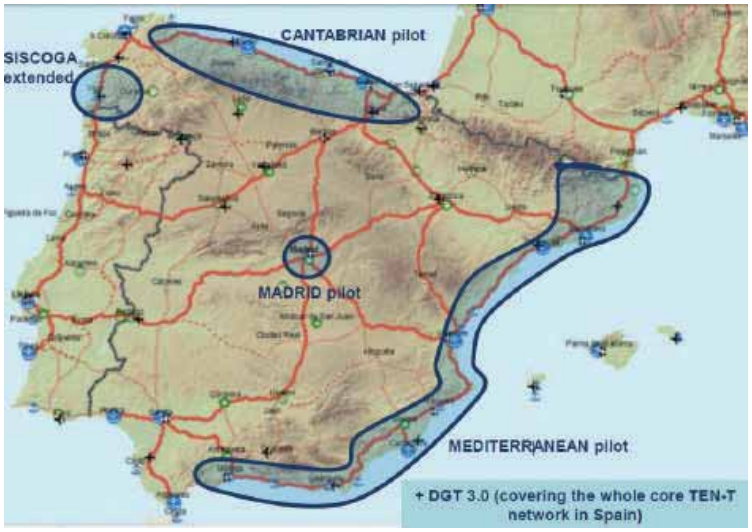
El proyecto ha pretendido asentar las bases del uso de los sistemas inteligentes de transporte cooperativo y sistemas de conducción autónoma, incluyendo el vehículo autónomo, y garantizar la interoperabilidad de estos sistemas a lo largo de toda Europa, con el objetivo final de mejorar la seguridad vial.

Se han desarrollado diferentes tipos de servicios para el usuario final: servicios en el entorno urbano, servicios en la interfaz urbano-interurbana y servicios en carretera, y servicios de información de tráfico que incrementan el confort en los tramos de tránsito. Por lo tanto, ha proporcionado una solución consistente para el despliegue de diferentes servicios Day-1 y Day-1,5, según lo definido por la Plataforma C-ITS de la Comisión Europea.

C-ROADS España ha aplicado 5 casos piloto en los que ha sido posible apreciar los avances y supervisar los resultados en relación con los servicios del Día 1 y del Día 1.5 según lo previsto en la Directiva STI, que es compartir información para mejorar el conductor, la toma de decisiones y la gestión y operación de infraestructuras, así como optimizar el funcionamiento del transporte con el objetivo de contribuir a la seguridad y eficiencia.

Los 5 pilotos han sido los siguientes:

1) DGT 3.0. En este piloto se analizó la implantación de los servicios C-ITS a través de una plataforma de internet de las cosas (IoT) permitiendo la interconexión de todos los actores implicados en el ecosistema del tráfico y la movilidad. Una de sus principales ventajas es que abarca el territorio nacional.
2) Piloto SISCOGA Extendido. Este piloto usó una arquitectura híbrida que incluye tecnología de comunicaciones ITS-G5, LTE y LTE/V. Se desarrolla en 130 km de vías interurbanas y 30 km de vías urbanas.
3) Piloto Madrid. Incluyó una solución para informar a usuarios de un aparcamiento en la ciudad y un sistema de gestión capaz de conectarse a diferentes fuentes de información para procesarla y que esté disponible para los usuarios de aplicaciones móviles.
4) Piloto Cántabro. Este proyecto se localizó a lo largo de la autopista A8-E70 que conecta las provincias de la zona norte de España (Galicia, Asturias, Cantabria y País Vasco).
5) Piloto Mediterráneo. El piloto se ejecutó a lo largo del Corredor Mediterráneo en varias secciones de la autopista AP-7. Su principal interés es comprobar los servicios C-ITS en autopistas de peaje.



El objetivo y función principal que tenían los pilotos era el ser posible identificar y demostrar los beneficios de la aplicación de C-ITS en una interfaz urbana, urbana / interurbana y carreteras haciendo un balance de los logros de C-ITS en la red de autopistas de alto nivel para apoyar proyectos piloto interoperables.

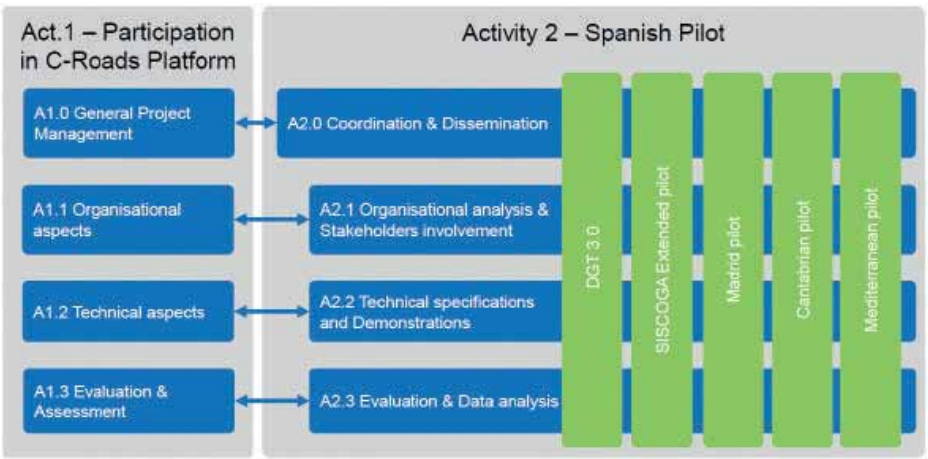
En todos estos proyectos piloto se testó desde un primer momento servicios de alerta a los conductores sobre los riesgos potenciales que se pueden encontrar en las carreteras como obras en la vía, vehículo parado, condiciones meteorológicas adversas... para posteriormente evaluar la eficacia de estos servicios.

Hasta ese momento, los servicios de la Directiva ITS habían sido implementados en las carreteras de la red RTE-T con los servicios compartidos a través de los Puntos de Acceso Nacionales (cuyo despliegue estaba en curso en España). La siguiente etapa sería avanzar hacia la integración de los C-ITS a nivel urbano / interurbano, permitiendo ampliar los modos de transporte y contribuir a un transporte suave y seguro a lo largo de toda la cadena, incluida la última milla.

Los objetivos estratégicos de C-ITS España fueron:

- Promover el despliegue del mismo a través de los 5 pilotos mencionados, donde se implementarán los servicios "Day 1" y "Day 1,5".
- Proporcionar un marco coordinado de actividades para las entidades españolas, en línea con las iniciativas europeas existentes.
- Participar en la Plataforma C-ROADS, con contribuciones a cada uno de los grupos de trabajo y presencia en el Steering Committee.
- Garantizar la interoperabilidad y continuidad de C-ITS, promoviendo la cooperación con otros Estados Miembros.
- Estudiar la complementariedad de comunicaciones híbridas (G5 y red móvil) para C-ITS.
- Analizar la convergencia de tecnologías relacionadas con vehículo conectado y autónomo.
- Asegurar la escalabilidad y replicabilidad de resultados para futuros despliegues de C-ITS en España.
- Involucrar múltiples entidades españolas de toda la cadena de valor: operadores de carreteras, operadores de telecomunicación, fabricantes de vehículos, proveedores de componentes, proveedores de servicios, gestores de flotas y proveedores de tecnologías ITS.

El esquema de trabajo común para los 5 pilotos fue el siguiente:



El horizonte de los pilotos era hasta el año 2020. A lo largo de los 4 años que duró el proyecto se debían desarrollar, implementar, analizar y presentar las conclusiones de los pilotos que permitan un desarrollo a gran escala en el medio plazo. Lamentablemente, no se pudo cumplir con dicho plazo debiendo ampliarlo un año más, finalizando en junio de 2021 por el parón que supuso la crisis sanitaria del COVID-SARS 19.

Otro dato muy importante para resaltar es el presupuesto con el que se contó que refleja el alcance y la implicación de todos los socios del consorcio. Ascendió a casi 18M€ lo que, para un proyecto de innovación y tecnología es de una suma muy elevada.

De igual forma, hay que destacar también el número de socios/colaboradores que participaron en el Programa. Fueron un total de 26 de todo tipo de ámbito y negocio que destacamos a continuación:

Cada piloto trabajaba de manera independiente, pero bajo la coordinación del consorcio mediante el cual homogenizábamos soluciones, compartíamos problemas y se buscaban soluciones aprovechando la experiencia del resto de pilotos.

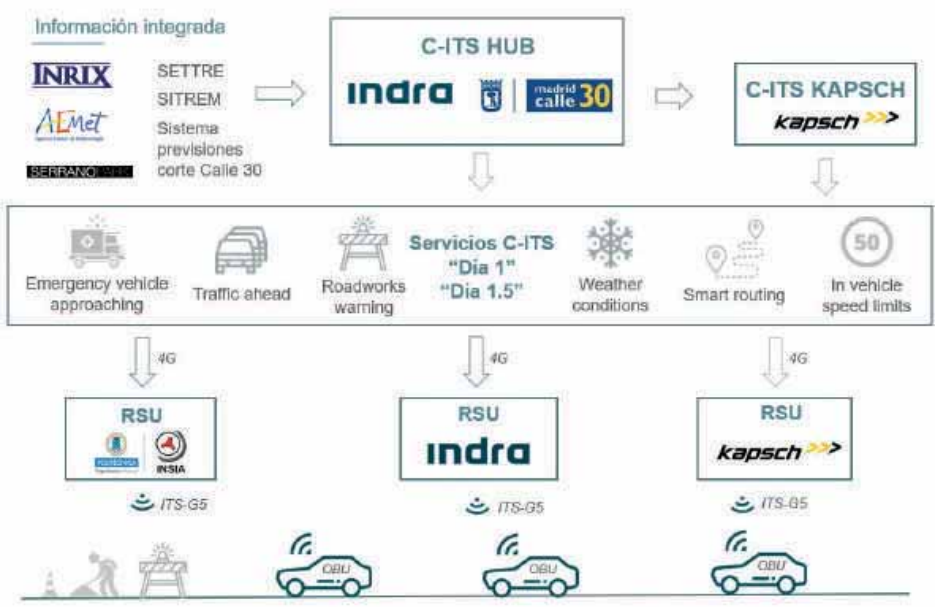
De los 26 socios del consorcio, 14 de ellos participaron en el piloto Madrid, en el cual Madrid Calle 30, además de socio/colaborador asumió el papel de coordinador del piloto y el liderazgo del mismo, como tampoco podía ser de otra manera, al ser los gestores y explotadores de la vía sobre la que se desarrollaría el piloto.

Inicialmente se iba a desarrollar en todo el anillo de la vía de circunvalación M-30, pero hubo que reducir el alcance debido a la reducción de equipos disponibles para desplegar en la carretera. Uno de los puntos de mayor interés que aportaba este piloto era que se desarrollaba en un ámbito urbano con una densidad de tráfico elevadísima (a lo largo del año, la M-30 es utilizada por más de 470mill de vehículos).

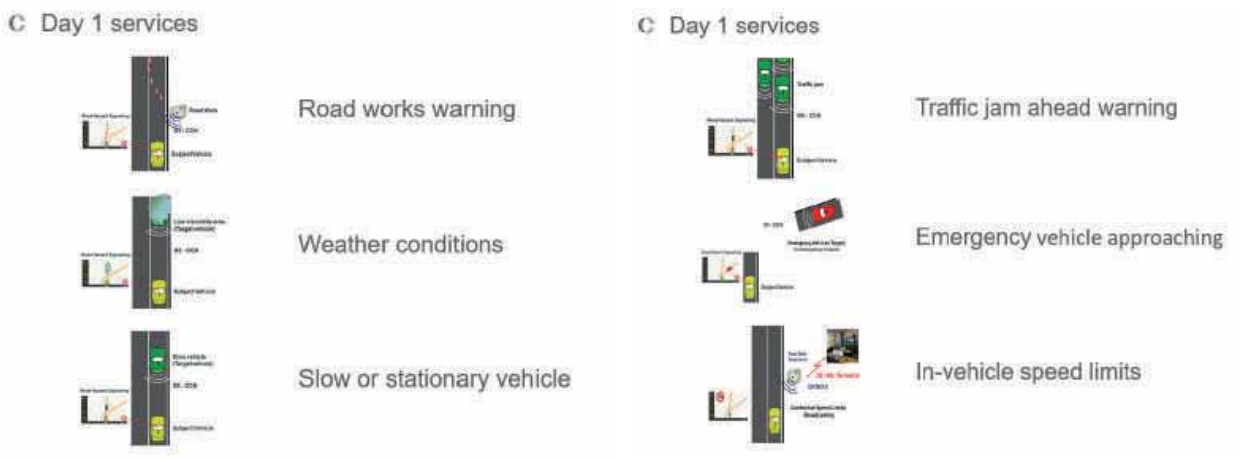
La arquitectura que se desarrolló en el piloto es la siguiente: un C-ITS que opera a nivel urbano, regional, nacional e internacional es una red formada por nodos que actúan a nivel local y que pueden denominarse "Sistemas de Gestión de C-ITS Locales" (LCIMS). La cooperación entre estos nodos permite aumentar el alcance de la gestión del tráfico a un área geográfica más amplia (regional, nacional e internacional).

Un LCIMS se implementa mediante un circuito cerrado a partir de datos / información recopilada y despachada por vehículos, pasando por una unidad de gestión y terminando en vehículos de carretera y unidades de control de tráfico distribuido. El ciclo funciona según el siguiente escenario:

- Los vehículos de carretera están equipados con sensores y dispositivos de procesamiento que recogen datos sobre el entorno del vehículo, tales como condiciones de la carretera (por ejemplo, suaves, dificultades), condiciones de conducción (por ejemplo, visibilidad, lluvia), condiciones de tráfico (Por ejemplo, la contaminación circundante).
- Los datos de los sensores se procesan localmente en línea y en tiempo real para generar conjuntos de datos / información / conocimiento. Una parte de los datos procesados se envía a la unidad de gestión, otra parte se pone a disposición de los vehículos cercanos para ser recogida como información, y otra parte se utiliza para activar mensajes / avisos dentro del vehículo.
- La unidad de gestión recoge todas las entradas recibidas de los vehículos en su área de cobertura y las utiliza para generar decisiones de gestión de tráfico que se envían como recomendaciones a los vehículos en lugares específicos (por ejemplo, utilizar caminos alternativos, reducir la velocidad ...) Unidades de regulación distribuidas (por ejemplo, poner un mensaje en los tableros electrónicos de carreteras, cerrar un acceso a una carretera ...).



Se desarrollaron 6 servicios de día 1 y 2 de día 1,5. En concreto fueron los siguientes:



Este sistema de gestión del tráfico tiene un impacto significativo en la eficacia del tráfico, la seguridad de los vehículos y de los pasajeros, la seguridad de los pasajeros, la seguridad de los usuarios de las carreteras y la reducción de la contaminación.

Durante los años de desarrollo del proyecto se ha ido aprendiendo de forma continuada llegando a obtener unas conclusiones y aprendizajes de gran valor que no hacen sino confirmar el éxito del proyecto español y lo acertada de su gestión.

Creemos importante dar a conocer las principales conclusiones y lecciones aprendidas para que sirvan de base y apoyo para otros proyectos futuros. De esta forma se podrá evitar repetir errores o incidir en algunos aspectos importantes que ayuden a conseguir mayores avances y éxitos en el ámbito de las carreteras conectadas.

Una vez realizado un profundo análisis de los datos obtenidos y del desarrollo del proyecto y mirando con perspectiva a los problemas encontrados estas son algunas de las ideas más significativas:

- Tiene que haber un número considerable de OBU's para poder realizar un análisis de datos que sea significativo. En caso contrario, la escasez de datos hará muy difícil obtener resultados concluyentes sobre el despliegue.
- Se recomienda que el operador de las SIMs de las RSU's tenga cobertura al menos 4G en las ubicaciones seleccionadas para que no haya problemas de conexiones.
- Es muy recomendable que tanto los equipos de la carretera (RSU's) como los de los vehículos (OBU's) tengan conexión en remoto para su actualización y descarga de datos de forma rápida y sencilla.
- Uno de los grandes problemas a la hora de analizar los datos es el filtrado necesario para eliminar los miles de mensajes provenientes de los sistemas Car2Car. Es muy recomendable desarrollar un sistema que los filtre de manera automática.
- Se recomienda la instalación de un firewall en las RSU's y que tengan el mínimo número de puertos.
- Para evitar ataques DoS, se recomienda el uso de redes privadas para la comunicación entre el C-ITS HUB y las RSU's.
- Se recomienda que el uso de los dispositivos sea transparente para el usuario (control de carga, encendido, conexión sin necesidad de acción por parte del usuario).
- Un problema identificado por los usuarios es la dificultad de atender a las alertas al tener que estar continuamente pendientes del equipo. Es importante y muy recomendable que las alertas utilicen por defecto la voz o algún sonido de alerta para el conductor.
- Por supuesto, se recomienda la integración de estos dispositivos en el vehículo para evitar distracciones. Para ello, será indispensable contar con la participación de fabricantes de vehículos que lo desarrollen de fábrica y venga integrado en el sistema de abordo.

Hasta aquí hemos llegado en el repaso del proyecto CROADS España. Se han quedado muchos detalles y anécdotas por el camino, pero no corresponde ponerlos en este artículo. Esperamos sinceramente que haya levantado su interés y se provoque la curiosidad y el impulso de participar en un proyecto que continúe lo comenzado en 2016.

Seguiremos trabajando en esta línea de desarrollo, así como en otras diferentes que discurran paralelas e independientes a CROADS, otras podrán ser contiguas y con elementos que se puedan aplicar a ella, otras estarán completamente engranadas y tendrán una mejora directa sobre CROADS. Algunas serán del ámbito civil, otras del campo industrial, o también relativas a la explotación y resolución de incidencias, quizás las haya encaminadas a la coordinación de equipos, etc…

Pero todas estas líneas y campos de desarrollo siempre irán en una línea clara y enfocadas a una única aspiración, la meta que tenemos identificada de manera inexorable desde el primer momento en el que formamos parte de la M-30: mantener la mayor infraestructura urbana de Europa con los mejores índices de calidad posibles y velando por aumentar la seguridad y prestaciones a los millones de usuarios que la utilizan.

GESTIÓN DE LA EXPLOTACIÓN, DURANTE LA RENOVACIÓN DEL CENTRO DE LOS TÚNELES DE LA M30

Raquel Bartolomé
Jefe de Explotacion Túneles Calle 30
EMESA

Calle 30 es la almendra principal de Madrid, y cuenta con los túneles urbanos más largos de Europa con un total de 48 km de vía soterrada.

Su Centro de Control integra 100.000 señales para conseguir una gestión centralizada, que aporta seguridad y control al millón y medio de usuarios diarios. Para ello utiliza un Software de Gestión de la infraestructura (ITS / SCADA de Túnel).

A comienzos de 2021, el Ayuntamiento de Madrid ha lanzado un proyecto de renovación de gran envergadura en el sistema global de Calle30. El objeto, es la renovación del equipamiento, instalación, programación y puesta en marcha de la gestión centralizada de esta infraestructura, que afecta a los 3 niveles: Control Distribuido (UCDTs), Estaciones Remotas Universales y Centro de Control.

Esta renovación viene motivada en base a la vivencia y registros acumulados en la explotación, operación y mantenimiento, por ello Emesa, empresa adjudicataria del mantenimiento y explotación de la M30, que lleva más de 15 años trabajando en la gestión y mantenimiento y está formada por 300 profesionales entre los que cuenta con un equipo técnico de 30 ingenieros de diversas ramas , aportando con su conocimiento, profesionalidad y experiencia, aportan un valor único basado en la experiencia y lecciones aprendidas.

El plazo de ejecución es de 30 meses, dónde la vía sigue viva y prima la seguridad, siendo muy potente y estable el plan de contingencia diseñado, para que este gran despliegue sea trasparente, estable y sin riesgos.

OPERATION MANAGEMENT, DURING THE RENOVATION OF THE M30 TUNNELS CENTRE

Calle 30 is Madrid's main hub and has Europe's longest urban tunnels with a total of 48 km of underground roadway.

Its Control Centre integrates 100,000 signals for central management, which controls and ensures the safety of its 1.5 million daily users. To achieve this, it uses Infrastructure Management Software (ITS/Tunnel SCADA).

At the beginning of 2021, Madrid City Council launched a major renovation project of Calle30's overall system. The goal was to update the equipment, installation, programming, and implementation of the centralised management of this infrastructure, which affects the 3 levels: Distributed Control (UCDTs), Universal Remote Stations and Control Centre.

This overhaul called on the extensive experience acquired and a great track record in exploitation, operation and maintenance, and therefore Emesa, who was awarded the contract to maintain and operate the M-30, has been working for more than 15 years in management and maintenance with 300 professional staff, including a technical team of 30 engineers from different fields, contributing their knowledge, professionalism and experience to add unique value based on experience and lessons learned.

The execution period is 30 months, during which the road is still open, and safety is of the utmost importance, with a very robust and stable contingency plan designed to ensure that this significant project is transparent, stable, and risk-free.

GESTION DE L'EXPLOITATION, PENDANT LA RÉNOVATION DU CENTRE DES TUNNELS DE LA M30

Calle 30 est l'artère principale de Madrid, et elle possède les tunnels urbains les plus longs d'Europe, avec un total de 48 km de chaussée souterraine.

Son centre de contrôle intègre 100 000 signaux destinés à assurer une gestion centralisée, apportant ainsi sécurité et contrôle à 1,5 million d'utilisateurs quotidiens. Pour ce faire, le centre emploie un logiciel de gestion de l'infrastructure (ITS / SCADA de tunnel).

Au début de 2021, la mairie de Madrid a lancé un projet de rénovation de grande envergure dans le système global de Calle30. Son objet : la rénovation de l'équipement, l'installation, la programmation et la mise en service de la gestion centralisée de cette infrastructure, qui concerne les 3 niveaux : contrôle distribué (UCDT), postes de télécommandes universels et centre de contrôle.

Cette rénovation a été motivée sur la base de l'expérience et des enregistrements accumulés dans l'exploitation, l'opération et la maintenance. Emesa a été désignée pour se charger de la maintenance et de l'exploitation de la M30. Elle travaille depuis plus de 15 ans à la gestion et à la maintenance, et elle est composée de 300 professionnels, parmi lequel se trouve une équipe technique de 30 ingénieurs provenant de diverses branches, qui contribuent grâce à leurs connaissances, leur professionnalisme et leur expérience. Emesa fournit ainsi une valeur unique, basée sur l'expérience et les leçons apprises.

Le délai d'exécution est de 30 mois, période pendant laquelle la chaussée continue à vivre et où la sécurité prime. Elle a été dotée d'un plan d'urgence très puissant et très stable, conçu pour que ce grand déploiement soit transparent, stable et sans risques.

Calle 30 es la almendra principal de la ciudad de Madrid, con una longitud total de 32 km, enlazando con las principales carreteras nacionales cuyo origen están en la capital.

En la carretera de circunvalación de la M-30, se encuentra la red de túneles más extensa de Europa, sumando en todo su trazado 48 Km de longitud.

A lo largo de estos Km de recorrido, se integran en torno a 100000 señales con el objetivo principal de poder tener una gestión centralizada, que aporte seguridad y control al millón y medio de usuarios que circulan a diario por esta vía.

Es por esto, por lo que se hace más que necesario el uso de un Software de Gestión de la infraestructura (ITS / SCADA de Túnel) para supervisar y controlar todo lo que ocurre en tiempo real. Este Software se encuentra tanto en el centro control principal, como en el centro de control de respaldo.

Disponer de una gestión integral en una infraestructura tan compleja como los túneles, permite tener una administración y control de todos los sistemas inteligentes de trasporte en una plataforma unificada y desde donde se pueda controlar y monitorizar todos los sistemas de tráfico garantizando la máxima seguridad y operativa en la gestión diaria y en situaciones imprevistas que requieren de una especial atención, teniendo estas que ser solucionadas lo antes posible.

Mediante la descentralización de los sistemas, conseguimos beneficios que influyen directamente en la seguridad, aumentándola considerablemente, y ayudando en la toma de decisiones, permitiéndonos:

- Operar en Big Data: Posibilidad de almacenar una elevada cantidad de datos de diferentes tipologías (instalaciones, tráfico, …), relacionarlos entre sí y utilizarlos para identificar nuevas oportunidades de negocio, más inteligentes y eficientes
- Interfaces sencillas con múltiples sensores interconectados para supervisión y control en remoto, minimizando considerablemente los tiempos de acción, ya que los datos pueden ser monitoreados desde cualquier lugar, no sólo desde el sitio local
- Sistemas robustos por su alta redundancia, preparados para averías y perdidas de servicio, donde los tiempos de indisponibilidad se reducen considerablemente
- Rapidez en la respuesta, aumentado la seguridad del usuario

Desde el centro de control de los túneles de Madrid Calle 30, se gestionan los túneles urbanos de mayor longitud a nivel europeo, realizándose desde el mismo múltiples funciones operacionales y de supervisión, operando 24 horas los 365 días del año.

Su actividad diaria consiste en:

- La detección de incidencias en tiempo real a través de distintos métodos, siendo el sistema DAI una herramienta muy fiable para operar el tráfico, logrando una detección de incidentes rápida y precisa
- El desarrollo del Plan de Autoprotección especifico
- La coordinación interna entre departamentos y con los Servicios de Emergencia externos (Policía, bomberos, Samur).
- La supervisión y control en tiempo real de los estados de las instalaciones y alarmas, tales como:
    - Telemando de energía y grupos electrógenos
    - Ventilación

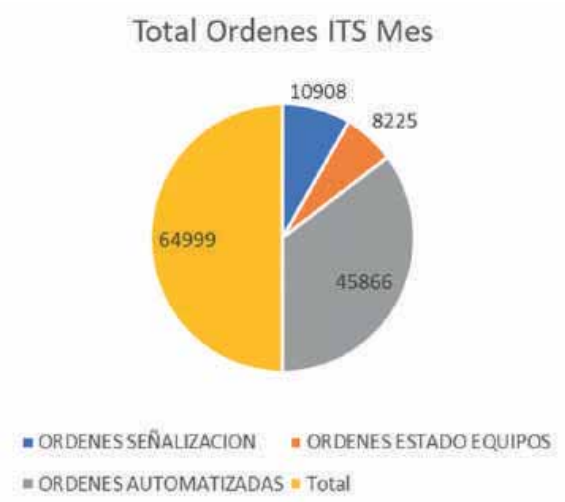
  - Filtrado
  - Detección Lineal de incendios
  - Detección Automática de Incidentes, DAI
  - Protección contra incendios, PCI
  - Detectores de condiciones atmosféricas
  - Estaciones remotas universales, ERUs
  - Unidades de control distribuido, UCDTs
  - PSOS
  - Estaciones de Toma de Datos, ETD's
  - Sistema de Alimentación Ininterrumpida, SAI
  - Grupos de bombeo de drenaje
  - Agua nebulizada
  - Paneles de señalización variable
  - Semáforos
  - Salidas de emergencia
  - Control de acceso a túneles
  - Lectores de matrícula
  - Megafonía
  - Radiocomunicaciones
  - Red de comunicaciones IP/GB
  - Control de acceso en galerías y cuartos técnicos / Detección de presencia
  - Iluminación
  - Gálibos
- El visionado completo del trazado, mediante un circuito digital de 1700 cámaras, distribuidas entre cuartos técnicos, salidas de emergencia y calzada
- El mantenimiento preventivo de equipos e instalaciones en túnel
- La señalización de incidencias, estados de tráfico y trabajos de conservación y mantenimiento en la vía, según se indica en el Manual de Explotación de Túneles de Calle 30
- El estudio periódico de los niveles de servicio del tráfico
- La gestión, registro y seguimiento de Incidencias, de acuerdo con las exigencias que especifica el Manual de Explotación de Calle 30
- Los simulacros internos y externos
- El control de acceso a las instalaciones
- La gestión y coordinación con la Dirección General de Videovigilancia de Madrid para los permisos de ocupación de calzada para trabajos de mantenimiento y conservación de la vía

- La elaboración de informes sobre el estado de equipos e instalaciones, verificando su correcto funcionamiento desde el Centro de Control, y detectando las posibles anomalías para actuar y conseguir que la afección sea mínima

Desde el centro de operaciones se gestionan al año en torno a 13000 incidencias, en su gran mayoría de poca relevancia como vehículos parados o alcances entre vehículos.

Para poder valorar la actividad y el volumen de órdenes que se tratan y procesan desde el corazón de la M30, su centro de control se ha realizado un sencillo estudio sobre la actividad que se desarrolla mensualmente en su gestión ordinaria.

A destacar, la importancia del factor humano por el global de actuaciones realizadas mediante una ejecución manual, para el envío de estados y ordenes sobre los sistemas de tráfico, siendo en torno a 20.000 órdenes mensuales en manual-remoto las que se ejecutan por parte del operador, abarcando aproximadamente un 30 % del total.



Además de esto, los puestos de operación de manera mensual:

- Realizan 503 informes de diferente índole
- Visualizan 26500 alarmas
- Ejecutan 65000 órdenes sobre equipos
- Gestionan 1085 incidencias al mes
- Realizan 13000 comunicaciones a traves de radio, mensajería instantánea y teléfono
- Gestionan 1000 permisos de corte en calzada

El manejo y control de tanta información hace que se cuente con personal altamente cualificado, que recibe una formación continua y adaptada a su puesto de trabajo, siendo eficientes en el desempeño y dotando a la infraestructura de la máxima seguridad.

A comienzos de 2021, el Ayuntamiento de Madrid ha lanzado un proyecto de renovación de gran envergadura en el sistema global de Calle30. El objeto, es la renovación del equipamiento, instalación, programación y puesta en marcha de la gestión centralizada de esta infraestructura.

Esta renovación plantea un reto importante en la automatización de procesos y órdenes que permitan operar con herramientas que faciliten la operatividad y toma de decisiones al gestor de la infraestructura.

El proyecto se divide en dos lotes principales, el primero consiste en el suministro e instalación del sistema de gestión centralizada, mientras que el lote 2 contempla la revisión de los algoritmos de ventilación sanitaria y en caso de incendio.

El plazo de ejecución está previsto en un plazo de 30 meses, en un entorno único, dónde la vía sigue viva y prima la confianza y seguridad de los ciudadanos, siendo muy potente y estable el plan de Migración establecido junto con el Plan de Contingencia para abordar de manera eficaz aquellas situaciones que puedan poner en riesgo el desempeño diario, para que este gran despliegue sea trasparente, estable y sin riesgos.

La trasformación en el primer bloque afecta a los 3 niveles jerárquicos principales de la arquitectura, desde el más bajo nivel (Conexión de señales sobre los sistemas inteligentes de tráfico) hasta el monitoreo y supervisión de dichas señales en Centro de Control.

1. **Nivel 1. Unidades de Control Distribuido (UCD).** Permiten el control, conexión de alimentación y comunicaciones de los diferentes elementos de campo en un solo elemento, las cabeceras de comunicaciones de Entradas y Salidas Digitales, que concentran los equipos en su zona de actuación, tanto en interior de túnel como en exterior, siendo estas señales agrupadas para ser controladas por las ERUs (Estaciones Remotas Universales). La renovación abarca 401 UCD de interior de túnel (UCD- T) y 23 UCD-E ubicadas en los accesos a túnel en el exterior
2. **Nivel 2 Estaciones Remotas Universales (ERU).** La ERU es el equipo industrial ubicado en los cuartos técnicos de túnel, encargado de recibir y procesar las entradas, para generar salidas tanto a periféricos como al centro de control. La renovación consta de 144 unidades, distribuidas en su mayoría en los cuartos técnicos de túnel, sustituyendo las actuales ERUS por PLC de alta disponibilidad.
3. **Nivel 3. Centro de Control.** Todas las señales y alarmas de los equipos instalados en el túnel y accesos al mismo son enviadas desde las cabeceras de control (UCD) y las estaciones remotas universales, a través del anillo de fibra óptica mediante la red de comunicaciones, hasta los servidores de los centros de control. La integración de las señales en el scada del centro de control permite la monitorización, supervisión y gestión centralizada de todos los sistemas de seguridad de tráfico. La renovación a este nivel contempla la arquitectura hardware de servidores, puestos de operación, además del sistema de Control SCADA.

Dentro de los sistemas integrados en el centro de Control, tiene especial relevancia el sistema de ventilación, por la peculiaridad de la infraestructura.

CONDICIONES MÍNIMAS PARA LA EXPLOTACIÓN (M.O.R MINIMAL OPERATIONAL REQUIREMENT)

En términos generales, un plan de Migración consiste en planificar una estrategia dentro de una organización para mover un conjunto complejo de dispositivos de distinta índole, aplicaciones software y/o sistemas, ajustándose a las prioridades del negocio, con un tiempo de interrupción del servicio mínimo.

A la hora de realizar una planificación detallada y ordenada del plan de trabajo a ejecutar en cada uno de los niveles, hay que tener en cuenta que el servicio debe de estar garantizado en todo momento, independientemente de la fase en la que se encuentre el proyecto, con unas Condiciones Mínimas en la Explotación de la vía que garanticen:

- Completa disponibilidad del Servicio
- Calidad del Servicio
- Reducir al máximo las afecciones al tráfico, trabajando en nocturno si fuera necesario con ocupaciones de calzada que no afecten al usuario
- Mínimo impacto en el ciudadano que transita por la Calle30
- Seguridad, con planes de contingencia rápidos y eficaces

Las Condiciones Mínimas de Explotación tienen por objetivo delimitar el grado necesario de funcionamiento de los diferentes sistemas para poder llevar a cabo la explotación del Túnel.

Pretende definir protocolos de actuación inmediata por tipo de instalación de tráfico en el cual la indisponibilidad de los equipos que se consideran vitales para la explotación impida mantener un nivel suficiente de seguridad de los usuarios y/o de la calidad de servicio. Rebasar este límite de Condiciones Mínimas para la Explotación puede traducirse en el cierre del túnel hasta que se restablezcan los servicios.

Para definir qué sistemas deben de tenerse en cuenta como vitales en la explotación y determinar estas condiciones de mínimos, se ha tomado cómo referencia el Real Decreto 635/2006 de 26 de mayo, dónde se recogen los equipos que afectan a la seguridad en los túneles, y en los que es necesario tomar medidas compensatorias en caso de detectarse un fallo, además de aquellos que basados en la explotación de la vía de Calle 30 durante más de 10 años se han considerado que requieren de una atención especial en la gestión diaria (red de comunicaciones por ejemplo).

A continuación, se muestra tabla con los Sistemas, que se contemplan en la definición de protocolos de actuación de servicio degradado:

1. Sistema de Detección Automática de Incidentes
2. Atmosféricos: CO -NO – OP
3. Semáforos Interiores de Túnel
4. Semáforos Exteriores
5. Barreras
6. Estaciones Remotas Universales (ERUS)
7. Detección Lineal de Incendios
8. Sistema de Gestión centralizada, ITS
9. Sistema de Megafonía
10. Circuito de Cámaras (CCTV)

11. Sistema de Ventilación
12. Sistema de Señalización Variable (PMV/PGC)
13. Protección Contra Incendios (PCI)
14. Alumbrado Permanente
15. Rutas de Evacuación
16. Red de Hidrantes
17. Sistema de Alta Tensión
18. Sistema de Alimentación Interrumpida
19. Sistemas de Drenaje
20. Red de Comunicaciones
21. Radiocomunicaciones

Las medidas compensatorias van dirigidas a compensar con medios humanos y/o materiales, efectos irreversibles y significativos, en relación con los cuales no es posible la aplicación de medidas correctoras, hasta que no se solucione la avería.

Cada elemento, se encuentra en cada momento en un estado de servicio, a partir del cual se desencadenan las actuaciones necesarias que garanticen cumplir con unas condiciones mínimas de Servicio y ayuda en la toma de decisiones para el centro de control:

- Estado Nominal. En el que todos o casi todos los elementos del sistema se encuentran prestando la funcionalidad para la que fueron diseñados
- Estado Degradado. Estado de un elemento el cual continúa desarrollando la función para la que fue diseñado en unos límites aceptables, pero inferiores a los valores especificados, o bien continúa desarrollando sólo algunas de sus funciones requeridas

En Calle 30 se han definido los diferentes niveles de servicio, todos ellos asociados a los sistemas de tráfico, o elementos de la infraestructura que puedan versen afectados:

- I-AVE-07(a, b, c). Averías en las instalaciones, estructuras o niveles de instalación que no presenta servicio degradado pudiéndose dar las siguientes situaciones
    - a: no es necesario corte para su resolución y se cuenta con repuesto
    - b: sí es necesario corte para su resolución y se cuenta con repuesto
    - c: no es preciso corte para su resolución y no se cuenta con repuesto
- I-AVE-04. Condiciones de servicio degradado de Nivel 1. Son deficiencias en las instalaciones, estructura o niveles de instalaciones donde existe un sistema redundante y está operativo
- P-AVE-02. Condiciones de servicio degradado Nivel 2. Se produce cuando ocurre un fallo del sistema y no se dispone de redundancia. En este caso se establecen una serie de medidas compensatorias para suplir las carencias derivadas del fallo del sistema
- E-AVE-03. Condiciones de servicio degradado de nivel 3. Se produce cuando tenemos un fallo del sistema, no hay redundancia y las medidas compensatorias o bien no son aplicables o no son suficientes para seguir con la explotación del túnel, en tal caso la Autoridad Administrativa decidirá el cierre al tráfico del tramo afectado o medidas las medidas necesarias para continuar con la explotación normal

Los niveles de servicio siempre están asociados a tiempos de respuesta en la resolución de las averías o correctivos de un sistema, asignándoles prioridades de ejecución de los trabajos para el personal que las resuelve, en base a la afección que provoquen sobre la explotación y si estos afectan o no a la segu-

ridad de la vía.

Hay que tener en cuenta siempre, que las actuaciones que se describen en los protocolos actuación de servicio degradado sobre elementos de la infraestructura y/o instalaciones, se desarrollan en Modo Servicio. Es decir, sin incidencias y/o emergencias de otra índole en la explotación del túnel.

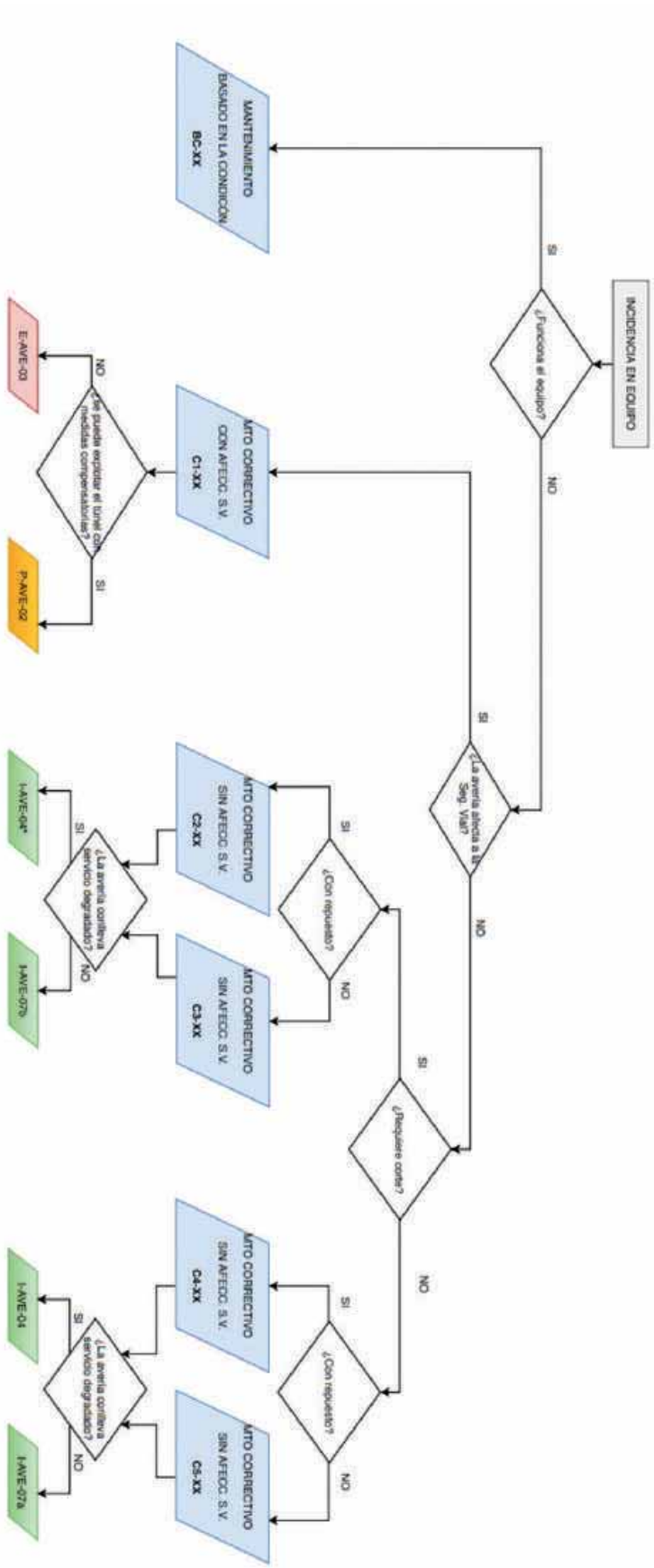
En el caso de que sí ocurrieran situaciones en las que hubiera incidencias de Explotación que supongan un incremento del nivel de riesgo y algún sistema en modo degradado de manera simultánea, siempre se priorizará la seguridad de los usuarios en el túnel y la gestión de la incidencia con los medios disponibles, activando el Plan de Autoprotección, asegurando la evacuación en apoyo con los servicios de emergencia.

El análisis se ha realizado de manera independiente por tipo de instalación, relacionando los correctivos sobre los sistemas, las prioridades establecidas en la resolución de la incidencia en base a la afección sobre la seguridad y el estado de servicio, con diagramas de flujo que facilitan la gestión desde el centro de control y ayuda en la toma de decisiones.

Cada uno de los 21 Sistemas contemplados en el protocolo de actuación y Servicio degradado, disponen de su árbol de decisión particular, diseñado teniendo en cuenta:

- Las características técnicas de cada Sistema
- Las consideraciones particulares previas que se pudieran tener en cuenta de manera independiente por instalación
- Lo dispuesto en el RD 635/2006 para túneles urbanos unidireccionales
- El nivel de Afección a la Seguridad Vial
- Si dispone o no de Sistemas Redundante
- Los mecanismos de alarma, a través de los cuales llega la señal al centro de control para alertar a los operadores
- Las medidas compensatorias a definir dependiendo del tipo de afección

A continuación, se muestra el árbol de decisión general de aplicación al conjunto de todos los elementos:



Este árbol de decisión es de aplicación para los equipos contemplados en: el protocolo de actuación y servicio degradado (M.O.R.), y en los equipos de especial interés que no se encuentran actualmente contemplados en M.O.R. (Compuertas de ventilación, Cabeceras DALI, Cabeceras de Ventilación, Cabecera y Compuerta de Ventilación). Para el resto de equipos la forma de actuar será: Orden de Trabajo -> **BC-XX** y no será necesario abrir incidencia en SITREM.

PR - Preventivo Planificado; **BC** - Mantenimiento Basado en la Condición; **C1** - Mantenimiento correctivo con afección a la seguridad vial, requiere corte y con repuesto; **C2** - Mantenimiento correctivo sin afección a la seguridad vial, requiere corte y sin repuesto; **C3** - Mantenimiento correctivo sin afección a la seguridad vial, NO requiere corte y con repuesto; **C4** - Mantenimiento correctivo sin afección a la seguridad vial, NO requiere corte y sin repuesto; **C5**- Mantenimiento correctivo sin afección a la seguridad vial, NO requiere corte y sin repuesto.

XX - Hace referencia al área o especialidad (**TR**, **TU**, **IE**)

E-AVE-03 CONDICIONES DE SERVICIO DEGRADADO DE NIVEL 3:Son deficiencias en las instalaciones, estructura o niveles de instalaciones donde NO existe un sistema redundante, o en el caso de existir no es operativo. Esta incidencia se establece por decisión de la Autoridad Administrativa.
P-AVE-02 CONDICIONES DE SERVICIO DEGRADADO DE NIVEL 2:Son deficiencias en las instalaciones, estructura o niveles de instalaciones donde NO existe un sistema redundante, o en el caso de existir no es operativo, pero el Gestor del Túnel puede explotar el túnel con medidas establecidas por él. Esta incidencia se puede establecer por decisión de la Autoridad Administrativa.
I-AVE-04 CONDICIONES DE SERVICIO DEGRADADO DE NIVEL 1:Son deficiencias en las instalaciones, estructura o niveles de instalaciones donde existe un sistema redundante y es operativo.
I-AVE-07a : Son averías en las instalaciones, estructura o niveles de instalaciones sin servicio degradado, y para su resolución NO es necesario corte y SI se tiene repuesto.
I-AVE-07b : Son averías en las instalaciones, estructura o niveles de instalaciones sin servicio degradado, y para su resolución SI es necesario corte y SI se tiene repuesto.
I-AVE-07c : Son averías en las instalaciones, estructura o niveles de instalaciones sin servicio degradado, y para su resolución NO es necesario corte y NO se tiene repuesto. (Esta incidencia se gestionará únicamente cuando el técnico del departamento correspondiente solicite el cambio desde una **I-AVE-07a**)

Tiempos:

- E-AVE-03 (30', 30', 60)
- P-AVE-02(30', 30', 60)
- I-AVE-4, I-AVE-07 (1h, 1h, 24h)

*En aquellas incidencias de equipos BARRERA, SEMÁFOROS EXTERIORES, EMBARQUES O DOS LÍNEAS DE PANELES CONSECUTIVOS, que para su reparación sea necesario realizar corte en calzada, el JT gestionará dicho corte de forma inmediata. Se informará a Movilidad de la necesidad del corte, se les enviará un correo y se añadirá una nota en SITREM con la información del corte.

PLAN DE MIGRACIÓN EN EL PROYECTO DE GESTION CENTRALIZADA DE LOS TÚNELES DE CALLE30

El Plan de Migración para la gestión Centralizada de los túneles de Calle30, debe de estar estrechamente relacionado en cada una de sus fases con las Condiciones Ordinarias de Explotacion del túnel, siendo ésta la prioridad máxima. Para ello se definen diagramas con las medidas compensatorias a aplicar en la fase previa a la migración de un elemento y/o sistema y los planes de acción en caso de que en el desarrollo se produzcan incidencias y/ ó emergencias que comprometan el servicio. Todo ello, en base al protocolo de servicio degradado que aplique del Manual de Explotacion de los túneles de Calle 30 y a los planes de contingencia definidos en el plan de trabajo.

En lo que respecta a la arquitectura de control, la solución contempla una migración por niveles, comenzando con el Nivel 1, a continuación, la instalación de arquitectura hardware de centro de control con el sistema nuevo de gestión a nivel de operación Nivel 3 y Nivel 2 compartiendo algunas fases y pruebas con Nivel 3.

Estrategia de Migración para Nivel 1

El Nivel 1 comprende la renovación del equipamiento en UCDTs (Unidades de Control Distribuido de Túnel) y UCDEs (Unidades de Control Distribuido de Exterior).

Existen diferentes tipos de unidades de control distribuidas entre cuartos técnicos y salidas de emergencia o bocas de túnel. La diferencia que existe entre ellas está basada en la tipología de instalación de tráfico que gestionan:

TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3 Y 6	TIPO 4	UCD Exterior,(Boca de	TIPO 7 : UCD Interior Túnel
Alumbrado de Guiado	Detección Lineal de Incendios	Sistema Contra Incendio Sistema de Dreanaje Semáforos Interiores Atmosféricos Alumbrado Permanente	Alumbrado Permanente	Barreras Semáforos Exteriores Gálibos	Cuadros de Baja Tensión

El objetivo fundamental de la estrategia de migración Nivel 1 es que las UCD estén operativas el mayor tiempo posible.

La configuración previa en un entorno fuera de la instalación, el perfecto etiquetado y la correcta coordinación de los pasos a seguir en la sustitución de los componentes, aseguran que el servicio solo se vea interrumpido por el mínimo tiempo necesario para el cambio físico de los componentes en las UCD.

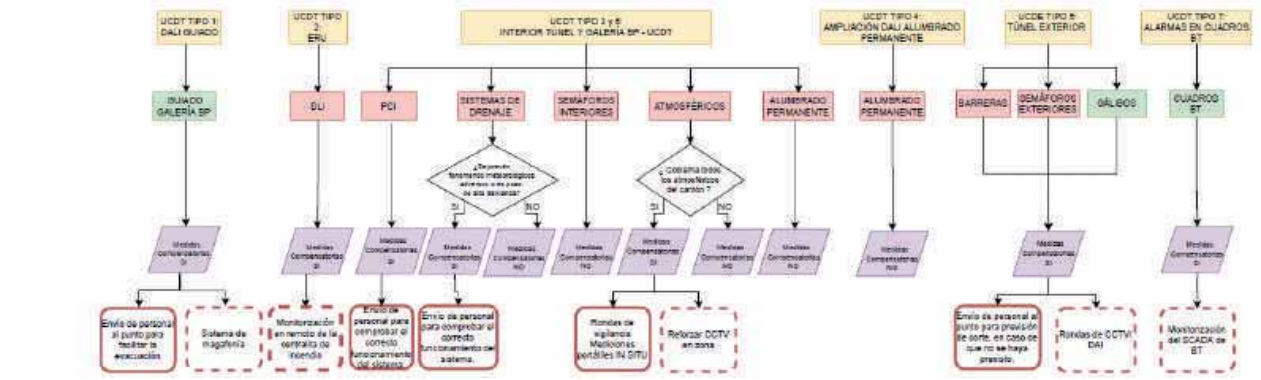
Etapa 1. Recopilación de datos. En esta primera fase se contará con los responsables de mantenimiento de la instalación para recolectar todos los datos relativos a las localizaciones, códigos, configuración IP, parámetros, etc., de los componentes a sustituir. Acopio de material: Tras la selección y compra de los diversos componentes, se efectuará su acopio en las instalaciones que permitan un rápido acceso y un traslado rápido al entorno de configuración.

Etapa 2. Configuración en entornos fuera de producción. En el entorno de configuración se incorporarán los parámetros IP necesarios para enviar los componentes listos para su instalación. Pruebas del correcto funcionamiento en el entorno de pruebas de desarrollo y de validación CAT, FAT.

Etapa 3. Instalación. Se seguirán procedimientos estrictos de seguridad que eviten cualquier accidente, se desconectará previamente la alimentación del circuito o equipo sobre el que se va a trabajar, se comprobará que el cableado existente está en buenas condiciones, y se dejará la sala y armario perfectamente ordenado tras la instalación. Cajas, partes, punteras, etc., será recogido.

A continuación, se entra en detalle en el proceso de puesta en servicio y migración a nivel 1, siendo la Explotación ordinaria de la vía máxima prioridad:

Fase 0. Planificación. Previo al comienzo de Instalación de cada una de las cabeceras de control, según el plan de trabajo establecido, se debe analizar las medidas compensatorias necesarias para que la calidad de servicio y la seguridad no se vea afectado. Estas medidas a aplicar dependerán de si la cabecera a sustituir contempla o no equipos recogidos en las Condiciones Mínimas de Operación y Servicio Degradado los cuales están recogidos en el Real Decreto 635/2006 de 26 de mayo, y que afectan a la seguridad de los túneles.

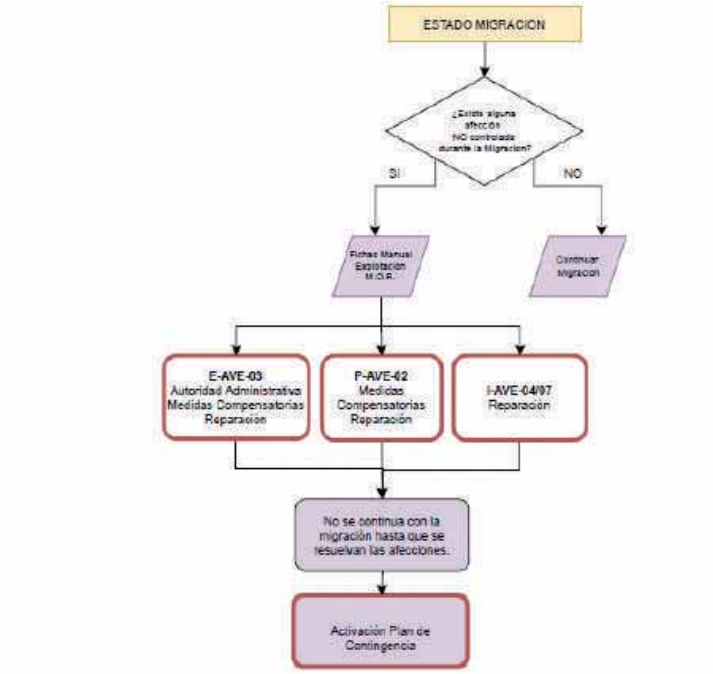


Siendo aquellos que se contemplan en las Condiciones Mínimas de Operación los dispuestos en color rojo.

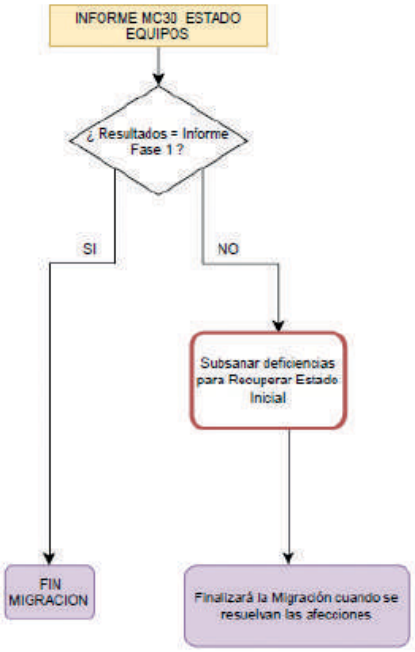
Fase 1. Inicio. Previo al comienzo en campo de la sustitución de las cabeceras de control, desde el centro de control debe sacarse un informe de estado de la instalación de la zona donde se van a sustituir las cabeceras.

Fase 2. Desarrollo. En el caso de que durante la migración ocurrieran situaciones en las que hubiera incidencias o emergencias de Explotación, siempre se priorizará la seguridad de los usuarios en el túnel y la gestión de la incidencia con los medios disponibles, activando el Plan de Autoprotección que corresponda y activando el plan de contingencia definido por el adjudicatario. Suspendiendo la migración hasta que se resuelva la afección.

En el Plan de Autoprotección de Calle 30, se contemplan distintos niveles de servicio, que ya se han descrito anteriormente: I-AVE-04/07 (Servicio Degradado de Nivel 1), P-AVE-02 (Servicio Degradado de Nivel 2), E-AVE-03 (Servicio Degradado de Nivel 3).



F**ase 3. Fin**. A partir de la fase de instalación, se mantendrá una continua comunicación con la empresa de mantenimiento y los operadores del centro de control, con el fin de confirmar que los componentes sustituidos no presentan ninguna incidencia sobre la explotación y tienen comunicación. Cualquier incidencia ha de detectarse lo antes posible para que se revise y se repare a la mayor brevedad, de manera que no afecte al servicio.



Estrategia de Migración de Nivel 3

Este nivel contempla la instalación de la arquitectura hardware en sendos centros de control mediante una plataforma de virtualización, para a posteriori poder desarrollar todo el software y aplicativos que sean necesarios para instalar la nueva aplicación de gestión centralizada. Se incluye también la sustitución de los clientes de operación en centro de control.

Etapa 1. Recopilación de datos. Toma de información del entorno de producción mediante auditoría de redes y comunicaciones actuales, y elaboración del programa de trabajo y configuraciones definitivas, además de un plan de validación y marcha atrás

Etapa 2. Instalación del Hardware. Instalación de los servidores, componentes de comunicaciones y almacenamiento necesarios para albergar a todos los sistemas y su lógica en centro de control

Etapa 3. Software Centros de Control. Instalación sobre plataformas virtualizadas de las funcionalidades ya existentes y nuevos desarrollos a integrar

Esta instalación NO afectará a la aplicación actualmente en producción de forma que esta última esté operativa al 100% en tanto y cuando se configura y prueba la nueva aplicación, una vez finalizados al completo la migración en los niveles 1 y 2, progresivamente, se hará una migración por sistemas, dando de alta sistemas completos sobre la nueva aplicación de control y dándolos de baja sobre el scada antiguo.

A continuación, se detalla la estrategia de migración para el nivel 3, realizándose por sistemas, para que se pueda ir pasando de manera escalonada el control al sistema renovado, minimizando el impacto sobre la explotación, operando de este modo por conjunto de sistemas sobre una misma plataforma.

Para ello, se ha realizado una división de los tipos de equipos agrupándolos en tres:

A. Equipos integrados directamente en SCADA. Son equipos integrados directamente a nivel 3, no pasando estos ERU/PLC

B. Equipos integrados en Scada a través de los PLCs de Siemens por OPC UA y que anteriormente se integraban en ERU por protocolo DGT. Son equipos integrados de nivel 2 a nivel 3

C. Equipos integrados en ERU/PLC mediante protocolo Modbus, diferenciando para la migración aquellos que son solo de lectura y aquellos los que se pueden además enviar órdenes

Los primeros equipos (tipo A), se pueden migrar de manera independiente al no estar incluidos en el nivel 3, son sistemas externos con scadas propios que minimizan el impacto, al poder ser gestionados individualmente desde una aplicación de terceros.

Los segundos (tipo B) requerirán una intervención especial en las ERUs para interrumpir su acción sobre ellos, e integrarlos directamente en el nivel 3. Estos equipos son los equipos de tráfico de tipo PMV, PGC y ETD.

Los terceros de tipo C, se integrarán con la misma estrategia que se va a presentar en el apartado de migración de nivel 2. Se abordarán simultáneamente en el nivel 2 y en el 3, tanto para las pruebas de estados como para las pruebas de comandos y algoritmos para una mayor agilidad y, sobre todo, para que los equipos que se detecten como críticos (los que requieren de unas condiciones especiales para la explotación) tengan una afección mínima al tráfico.

La migración a Nivel 3, como se ha indicado con anterioridad debe de ser por Sistemas completos, a operar sobre el nuevo aplicativo, siendo la prioridad máxima la explotación y la consideración de aquellos equipos que por sus condiciones son críticos para la gestión ordinaria.

Estrategia de Migración para Nivel 2

La renovación incluye la sustitución de (36) ERU´s por un total de treinta y seis (36) PLC's de Campo en configuración redundante Hot Standby (formados por dos PLC's individuales).

El objetivo fundamental de la estrategia de migración Nivel 2 es que toda la funcionalidad que reside actualmente en las ERUs sea migrada a los nuevos PLCs y que el proceso de reconexión de los equipos de campo desde las ERUs hacia los PLCs se produzca con la menor pérdida de servicio posible.

Etapa 1. Fase de diseño. En esta etapa se recopilará la documentación del proyecto actual y se generará una documentación de diseño que cubra todos los aspectos de la renovación. Asimismo, se instalarán unas maquetas de prototipos para ejecutar pruebas que permitan corroborar que el diseño teórico es adecuado.

Etapa 2. Desarrollo y Configuración. En esta etapa, partiendo de los diseños, se ejecutará la programación en los PLCs que se refieren a lógicas para el acondicionamiento de señales de sensores, cálculos de medias, gestión de comandos y generación de alarmas de equipos, contadores de tiempo, etc. y los algoritmos se refieren específicamente a sistemas que ejecutan actuaciones automáticas. En esta etapa se acometen las sucesivas fases de pruebas para verificar y validar el correcto comportamiento del sistema de control en entornos de pruebas controlados.

Etapa 3. Puesta en servicio. Instalación de los PLC´s en campo.

Las acciones a acometer durante la migración de este nivel es el reemplazo de ERU por PLC aplicando la arquitectura de control definitiva para validar el correcto funcionamiento de un sistema y/o zona.

Hay que destacar que durante este proceso de migración y validación el túnel sigue operándose desde el antiguo Scada. Durante las pruebas algunos equipos dejarán de estar disponibles en el scada antiguo, pero lo estarán en el scada nuevo. En la organización se prioriza mantener el máximo equipamiento disponible en el sistema de control de explotación (SCA), no quedando ningún elemento fuera de servicio. Si no está disponi-

ble en el antiguo scada lo estará sobre el nuevo.

La migración a este nivel no se completará hasta que todos los sistemas hayan sido probados en cada una de las áreas funcionales, siendo validadas y pasando a operarse con el nuevo sistema de PLC.

Validación de PLC individualmente

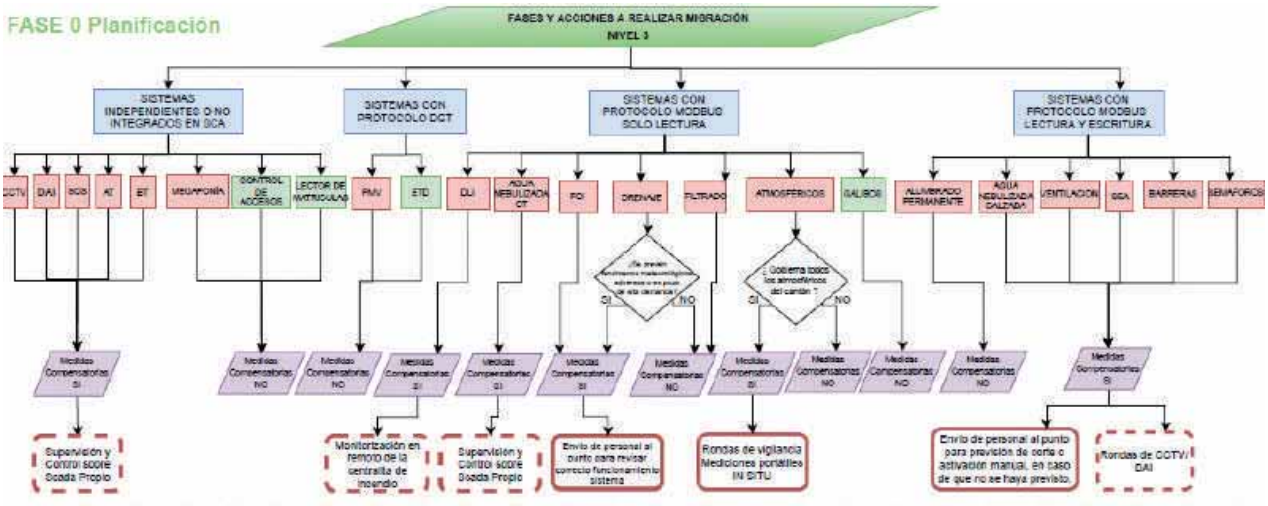
- Pruebas de Comandos. Se realizará comprobación de estados en los que en paralelo ERU y PLC leen estados de los equipos de las UCD. Comparación automática mediante informes generados en ambos scadas de que se reciben los mismos estados.
- Pruebas de Estados/Comandos. En este caso se inhibe la operación entre ERU y antiguo scada, haciendo comprobación de Estados y operativa sobre el sistema de control nuevo de cada uno de los sistemas integrados en PLC y se comprueba que se establecen los estados deseados, devolviendo el control al antiguo Scada una vez finalice la prueba.

• Validación software de PLC individualmente. En este caso se comprueba la lógica de control (algoritmos) de cada uno de los sistemas en PLC.

• Migración Definitiva de ERU a PLC. Se ejecutará una vez se hayan ejecutado satisfactoriamente las validaciones anteriores.

Del mismo modo que en el nivel 1, se han definido distintas fases en el proceso de migración, pudiéndose utilizar el mismo diagrama de fases y acciones a realizar en el Nivel 2 y 3, por compartir procesos en algunas de las validaciones, tanto para las pruebas de estados como para las pruebas de comandos y algoritmos.

Fase 0. Planificación. Antes de comenzar, hay que tener previstas las medidas compensatorias a aplicar dependiendo del sistema al que afecte la migración, si este se considera como crítico o no en las condiciones mínimas de servicio degradado (M.O.R), y teniendo en cuenta si son sistemas externos independientes integrados sólo a nivel 3 o si además pasan previamente por nivel 2 (PLC) diferenciándose los que solo presentan estados y sobre los que se puede operar.

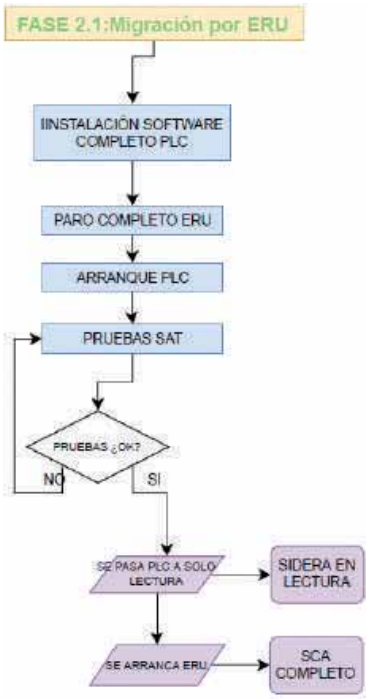


Fase 1. Inicio. Previo al comienzo, desde el centro de control deberá de sacarse un informe de estado de la instalación, para tener controlada la misma tanto al inicio como al final del proceso, priorizando el servicio.

Fase 2. Desarrollo. A nivel 2 en esta fase se contempla la migración de ERU por PLC, las pruebas se realizan por sistemas integrados en ERU, parando esta y pasando el control al PLC, mediante la comprobación de estados y lógica de control de cada sistema.

El plan de trabajo contempla pruebas protocolizadas, ordenadas y exhaustivas del funcionamiento de los PLC en fábrica (FAT: Factory Acceptance Test), en entornos de desarrollo antes de ser entregados al cliente.

Desde el entorno de producción, el primer paso contempla la instalación en paralelo de ERU y PLC, para así disponer en todo momento de ambos sistemas conectados, ERU al scada antiguo (llamado SCA en Calle30) y PLC al nuevo (llamado SIDERA en Calle30), para que en el caso de tener que lanzar un plan de contingencia se estableciera de manera rápida y segura, lo que reduce considerablemente el tiempo de indisponibilidad del servicio.



En cuanto a las pruebas SAT, llamadas "Site Acceptance Test" o "Pruebas de aceptación en terreno". Estas pruebas son muy similares a las anteriores, pero al contrario de lo que ocurre con las pruebas FAT, estas pruebas se realizan ya en la ubicación donde se va a implantar el PLC definitivamente, es decir, es decir en los cuartos técnicos.

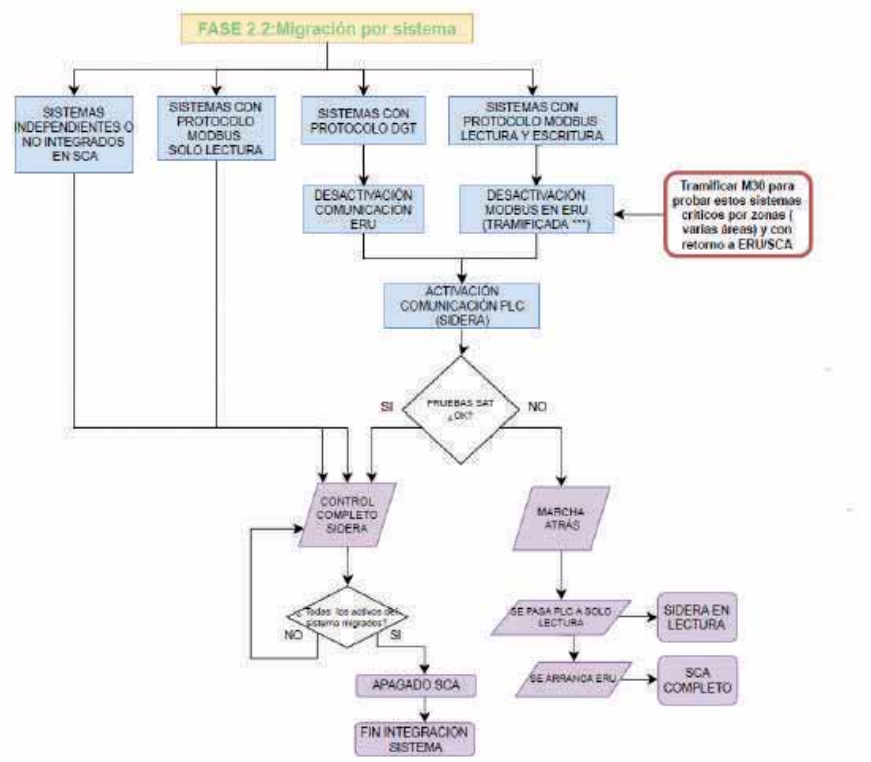
El objetivo de estas pruebas es asegurar que todo funciona correctamente en el entorno de producción real y que se puede operar sin dificultades, recibiendo estados de cada uno de los sistemas integrados, y verificando que la lógica de control cumple con los requisitos establecidos.

Una vez finalizadas las pruebas SAT, los equipos o sistemas en cuestión quedan instalados y pueden empezar a ser utilizados, con la seguridad de que no contiene a priori ningún error y que cumplirá con todos los requisitos.

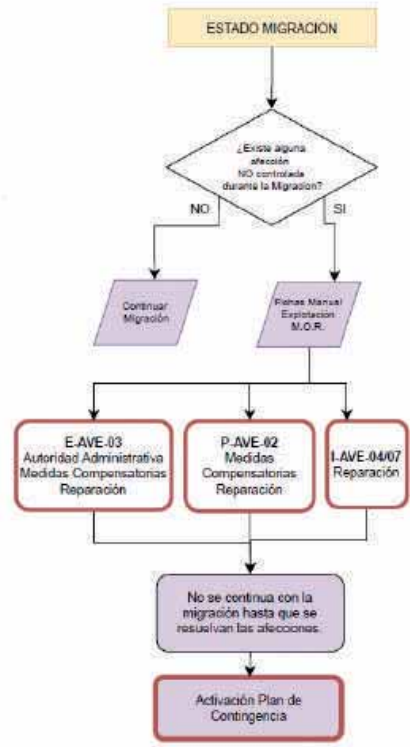
El control definitivo sobre cada PLC de zona será al final cuando se hayan probado todos los sistemas de cada uno de los tramos.

Cuando la migración, se traslada ya al último Nivel donde prima la operatividad desde el centro de control (Nivel 3), los sistemas pasan a ser controlados desde desde la nueva aplicación de gestión centralizada, con una estrategia de migración por Sistemas completos, para que el operador opere ese sistema en exclusividad sobre una única plataforma, evitando complicar la explotación y reduciendo los fallos a la hora de operar por tener un mismo sistema descentralizado.

Los sistemas son sometidos de nuevo a pruebas estados y lógica de control, previamente ya validadas en nivel 2.

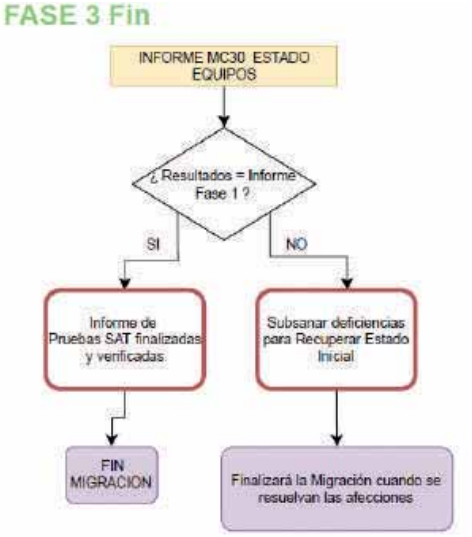


Como durante todo el proyecto siempre es importante asegurar la calidad del servicio y la seguridad del usuario, priorizando las condiciones ordinarias de la explotación y activando los planes de contingencia necesarios según el nivel de afección, si fuera necesario:



Fase 3. Fin. Una vez finalizado el proceso, se debe de comprobar que la instalación mantiene la misma funcionalidad que en momentos previos y no presenta anomalías que impidan la explotación normal del servicio.

Cualquier incidencia ha de detectarse lo antes posible para que se revise y se repare a la mayor brevedad, minimizando los tiempos de indisponibilidad del servicio.



En definitiva, el proyecto de Gestión Centralizada de los túneles de Calle 30, supone sin duda un reto para los que a diario intervenimos en la gestión ordinaria de la circunvalación de una de las vías más importantes de España, la M-30. Para ello, contamos con la profesionalidad y dilatada experiencia del personal que mejor la conoce, así como con unos procedimientos de actuación muy estudiados para que el proyecto pueda realizarse de manera exitosa minimizando la afección a la explotación.

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

THIRD SESSION:

Management of urban and high traffic road tunnels

MAINTENANCE AND TRAFFIC OPERATION OF HEAVY TRAFFICKED ROAD TUNNELS

Arthur Kabuya
Bruxelles Mobilité, Belgium

Urs Welte
Urs Welte MSEE

As conclusion in the previous reports of the working groups, the major complications in the operation of an urban road tunnel are connected with the large traffic volume and specific traffic characteristics. Urban traffic poses high demands for the management of traffic, incidents and maintenance, not only for the tunnel but also on the surrounding network. As an important infrastructure in the urban area in terms of economy and mobility there is a constant pressure to reduce the duration of closure of urban tunnels.

Case studies are particularly suitable for providing an insight into the implementation of these special requirements in terms of maintenance and traffic management in different countries. Experts from seven countries in europe and overseas have presented their experiences, challenges and special solutions in these case studies.

The case studies can be roughly divided into three categories:

- Implementation of the "quick responders" concept with different approaches
- Measures to organize work and to reduce nuisance to users during the renovation of tunnels
- New tools for maintenance and operation

The case studies provide interesting insights into different approaches to solutions in different countries.

MANTENIMIENTO Y EXPLOTACIÓN DE TÚNELES DE CARRETERA CON TRÁFICO PESADO

Como conclusión en los informes anteriores de los grupos de trabajo, las principales complicaciones en el funcionamiento de un túnel de carretera urbana, están relacionadas con el gran volumen de tráfico y las características específicas del tráfico.

El tráfico urbano plantea altas exigencias para la gestión del tráfico, las incidencias y el mantenimiento, no solo para el túnel sino también en la red circundante. Como infraestructura importante en el área urbana en términos de economía y movilidad, existe una presión constante para reducir la duración del cierre de los túneles urbanos.

Los estudios de caso son particularmente adecuados para proporcionar una visión de la implementación de estos requisitos especiales en términos de mantenimiento y gestión del tráfico en diferentes países. Expertos de siete países de Europa y del extranjero han presentado sus experiencias, desafíos y soluciones especiales en estos estudios de caso.

Los estudios de caso se pueden dividir aproximadamente en tres categorías:

- Implementación del concepto de "respondedores rápidos" con diferentes enfoques
- Medidas para organizar los trabajos y reducir las molestias a los usuarios durante la renovación de los túneles
- Nuevas herramientas para el mantenimiento y operación

Los estudios de caso proporcionan información interesante sobre diferentes enfoques de soluciones en diferentes países.

MAINTENANCE ET EXPLOITATION DES TUNNELS ROUTIERS À FORT TRAFIC

En conclusion des rapports précédents des groupes de travail, la complication majeure dans l'exploitation des tunnels routiers urbains sont connecté au large volume de trafic et la spécificité de ce dernier. Le trafic urbain engendre une forte demande quant à la gestion de la congestion, des incidents et de la maintenance, non seulement pour le tunnel mais aussi le réseau avoisinant. En tant qu'infrastructure importante dans la zone urbaine, en termes d'économie et de mobilité, il y a une pression constante afin de réduire la durée des fermetures des tunnels.

Les études de cas sont particulièrement adaptées pour fournir une introspection dans l'implémentation des exigences de maintenance et gestion du trafic dans différents pays. Des experts de sept pays européens et hors europe ont présenté leurs expériences, défis et solutions adaptées.

Cette étude de cas peut être divisée en trois catégories:

- Implémentation du concept d'"interventions rapides" avec des approches singulières;
- Mesures afin d'organiser le travail et réduire les nuisances pour les usagers;
- Nouveaux outils pour la maintenance.

Les études de cas donnent un aperçu intéressant des différentes approches des solutions dans les différents pays.

1. INTRODUCTION

As can be concluded from the previous reports of the Tunnels Technical Committee, the major complications in the operation of an urban road tunnel are connected with the large traffic volume and specific traffic characteristics. Urban traffic poses high demands for the management of traffic, incidents and maintenance, not only for the tunnel but also on the surrounding network. As an important item of infrastructure in the urban area in terms of economy and mobility, there is constant pressure to reduce the duration of closure of urban tunnels.

Case studies are particularly suitable for providing an insight into the implementation of these special requirements in terms of maintenance and traffic management in different countries. Experts from seven countries in Europe and overseas have presented their experiences, challenges and special solutions in these case studies.

The case studies can be roughly divided into three categories:

- Implementation of the "quick responders" concept with different approaches
- Measures to organize work and to reduce nuisance to users during the renovation of tun-nels
- New tools for maintenance and operation

The case studies provide interesting insights into different approaches to solutions in different countries.

2. METHODOLOGY

The information comes from experts of the working group WG1, which discussed and deepened these topics at the working group meetings.

in order to obtain a unified grid, a structure of information was given, which included the following chapters (whereas the format is used as a guideline):

- Objectives
- Scope
- Requirements
- Technical challenges
- Non-technical challenges
- Lessons learned

3. IMPLEMENTATION OF "QUICK RESPONDERS" CONCEPT

Four case studies deal with the problem of being able to deal with incidents in the shortest possible time. These case studies deal with so-called quick responders approaches, especially with regard to the use of patrol squads and specially equipped motorcycles for first response to incidents of all kinds, including fires.

3.1. QUICK RESPONDERS IN EURASIA TUNNEL ISTANBUL

3.1.1. Objectives:

The rapidity of the response to an incident in a tunnel is key for safety and asset protection, especially when a fire is declared or likely to. Within Eurasia tunnel, allowing only light vehicles, fires will be small in terms of heat release rate but might be difficult to attend to, due to potential traffic congestion upstream of the fire.

3.1.2. Detailed Requirements

Response time is very stringent: the time elapsed between activation of the appropriate response by the facility control room operator and the operator's personnel attending to the incident site must not exceed 4 minutes on average over calendar month. For each incident, it shall not exceed 15 minutes. It is not expected that all fires can be extinguished by the operators with light equipment, but at least motor bikers will limit their spread. In any case, the fire brigades from both Asia and Europe sides will attend and take over responsibility once on site.

3.1.3. Technical Challenges

The challenges are to purchase and equip motorbikes to tackle fires, i.e. with light fire fighting equipment.

3.1.4. Non-Technical Challenges

Due to the length of the tunnel (4.5 km), it could be possible, if the fire were close to the portal, that the motorbikes could travel all the way from the portal in the direction of the traffic to attend the incident (4,5 km). Therefore it was decided, for periods during day time, to position a patroller in the middle of the tunnel to further reduce the intervention time; there is one motorbike on stand by in each deck so that the patroller can use one of them depending on the location of the incident.

3.1.5. Evaluation

The response time to incident is the relevant key performance indicator (KPI) to evaluate the efficiency of the arrangements. For the year 2020, we found the following good results, which indicate very short response times:

Type of incident (in tunnel)	Average intervention time
Accident	1 min 47 sec
Animal	2 min
Breakdown Vehicle	2 min 37 sec
Claustrophobia	40 sec
Debris	2 min 20 sec
Fire	30 sec
Pedestrian / Cyclist	40 sec
Stopped Vehicle	23 sec
Wrong Direction Vehicle	2 min 22 sec

Type of incident	Average Intervention time
Breakdown/Towed Vehicle	2 min 39 sec
Over Height Vehicle	27 sec
Stopped Vehicle	10 sec
Pedestrian / Cyclist	0 sec
Banned Vehicle	0 sec
Accident	5 min

Figure 1: Intervention times vs. type of incident

3.1.6. Lessons Learned

"First response" must be clearly defined so that the roles of the patrollers (1st responders) and the fire brigades are clear; on that basis, training, competency and responsibilities can be defined. The proper arrangements m st be made to provide the staff with fresh air while on standby in the tunnel.

3.2. MOTORCYCLE SQUAD IN YAMATE TUNNEL JAPAN

3.2.1. Objectives

Motorccle squads have been introduced for speedy response to incidents/ abnormalities in long tunnels with a narrow hard shoulder. Especially in case of tunnel fire, the squad arrives at the site, sets up and conducts traffic regulation at early stage to prevent secondary disaster.

3.2.2. Technical/Non-Technical Challenges

Only the Yamate Tunnel motorcycle squad is designated as an emergency vehicle for road administrator in Japan. (There are cases of introducing motorcycle vehicles in the fire department.) The organisation of the motorcycle squad is a two-shift system (day shift and night shift) with 6 motorcycles (6 people) 24 hours a day.

The following subjects were resolved when setting up the motorcycle squad

- Acquisition of advanced motorcycle operation skills for the squad members
- A special protective jacket that protects the lives of the squad members
- Establishing bases on both side (portal) and at the centre (junction) of the tunnel
- Barriers used for closing road traffic were installed in advance because motorcycle squad are not able to carry equipment for road closure and/or traffic regulations

3.2.3. Evaluation

The situation and the cost/benefit was carefully evaluated over the years, with the following results:

- The quick dispatch and safety operation of the daily motorcycle squad have been evaluated by the Highway Traffic Police Corps of the Metropolitan Police Department, which is the traffic administrator.
- Since the establishment of the motorcycle squad in December 2007, there have been no accidents or difficulties during operation, except for injuries during training stage.
- The following is a comparison of the number of annual dispatches (accident / breakdown vehicles) and response time (receiving -> arriving) of the motorcycle squad with the traffic patrol vehicles in 2019.
- There are more than 500 dispatches per year, and they are being operated effectively.

Vehicle Type / Case	Motorcycle Squad (motorcycle)		Traffic Patrol Vehicle (four wheels)	
	Number of cases	Arriving time (ave.)	Number of cases	Arriving time (ave.)
Accident	277	12.5min	9,587	16.4min
Broken Vehicle	296	12.6min	8,425	17.3min
Total	573	12.55min	20,216	16.8min

The response time of the motorcycle corps is the time from receiving the incident and starting the engine at the base to arriving at the site.
For traffic patrol vehicles, excluding the number of vehicles that are without emergency dispatch.

Figure 2: Comparison of number of annual dispatches vs. response time

3.2.4. Lessons Learned

There were many lessons learned so far; here the two main points:

- This is an example of specialising in the operation and management of the long tunnel with narrow hard shoulder.
- Taking advantage of mobility, it is possible to arrive at the site quickly even on a congested road, but the motorcycle squad cannot regulate traffic using the vehicle as a block like a traffic patrol vehicle (four wheels). Therefore, it is operated as an immediate response specialised for the Yamate Tunnel.

3.3. FAST RESPONSE TEAM IN MARINA COASTAL EXPRESSWAY (MCE) TUNNEL SINGA-PORE

3.3.1. Description

- The MCE is a 5km-long dual 5-lane expressway, of which 3.6km is an underground tunnel. The remaining 1.4km comprises of surface roads, depressed roads and viaduct structures. A 420m stretch of the tunnel runs under the seabed.
- It provides a strategic east-west link between Ayer Rajah Expressway (AYE) in the west, East Coast Parkway (ECP) in the east and Kallang-Paya Lebar Expressway (KPE) along the north-eastern corridor.
- The MCE was opened on 29 December 2013 and being an important link between East and West, it is critical to ensure prompt incident management in an urbanised environment.
- This case study discusses the importance of ground resources deployed to provide timely incident recovery, ensure tunnel safety and traffic connectivity.

Figure 3: Map Marina Coastal Expressway Singapore

3.3.2. Objectives

- Swift response to tunnel incidents and recovery.
- Ensure safe tunnel operations.

3.3.3. Technical challenges / Non-technical challenges

- Tunnel operations (enclosed environment) is critical and will require prompt incident detec-tion, response and recovery.
- Road tunnels are equipped with automatic incident detection cameras, surveillance camer-as, air monitoring sensors, linear heat detectors, fire suppression systems, electronics sign-boards, etc. and these are managed by officers stationed in the Tunnel Operations Control Centre 24/7.
- It is also important to have a team of 24/7 ground resources to respond to traffic incident sites in the tunnel.
- The Land Transport Authority (LTA) Traffic Marshals on motorcycles and Vehicle Recovery Services tow trucks (EMAS) are on standby to be deployed.
- These ground resources are required to reach incident site within 8mins upon activation and to clear/ tow simple breakdown cases within the next 8mins upon arrival. The 8mins target (for both response and clearance) are set out as Key Performance Indicators (KPI).
- For accidents with minor injury, the LTA Traffic Marshals are trained by the Traffic Police to conduct On Scene Investigation to expedite incident recovery. Accident cases resulting in serious injury and fatality will still require the presence of Traffic Police officers to conduct investigation. In these scenarios, the LTA Traffic Marshals and EMAS Recovery Crew will as-sist with traffic control.

Figure 4: Land Transport Authority (LTA) traffic marshals and recovery crew

3.3.4. Evaluation

- The Tunnel Operations Control Centre monitors the traffic condition and will implement a set of pre-programmed knowledge-based actions & advisory messages during situations of traffic congestion or incident(s).
- The deployment of ground resources comprises of both fast response LTA Traffic Marshal (LTM) on motorcycles and EMAS recovery tow trucks (ie. Vehicle Recovery Services - VRS) have helped to ensure that any traffic incident within the road tunnel is attended to and cleared as expeditiously as possible.

- Since the opening of MCE Tunnel in 2013, the ground resources have generally fulfilled their KPI in ensuring attendance and clearance of incidents by positioning these resources at strategic locations, which is are in the proximity of the MCE tunnel.
- This has had the effect of ensuring that most traffic incidents in the MCE tunnel are swiftly resolved for the benefit of commuters.
- The prompt response of ground resources has met the objectives set out:
  - Ensure safety of motorists involved in an incident
  - Expedite incident recovery
  - Prevention of secondary accidents
  - Ensure the continuity of tunnel operations
  - Perpetuate an efficient traffic flow

3.3.5. Lessons Learned and Recommendations

- Having a team of officers in the Tunnel Operations Control Centre to monitor and manage the road tunnel is important and remains critical.
- It is equally important to have a team of fast response ground resources to attend to incidents in a road tunnel environment.
- These ground resources should be properly trained and possess adequate knowledge and competency to manage a good variety of incidents such as minor accidents, vehicular breakdown and fallen objects.
- The ground response strategy in deploying a team of LTM on motorcycles and a team of VRS on tow trucks enables LTA to deploy agile, well-equipped and competent ground forces round-the-clock, regardless of incident type. LTMs are able to reach incident scenes fast to provide immediate reassurance and assistance to motorists in distress. At the same time, VRS on their arrival, will provide the technical expertise required to recover incident-vehicles of all types.
- A robust monitoring regime that is complemented by a team of agile and competent ground resources will provide a steady platform for road authorities to ensure safe and efficient road tunnel operations.

4. MEASURES TO ORGANIZE WORK AND TO REDUCE NUI-SANCE TO USERS DURING CONSTRUCTION AND RENOVATION

4.1. SAFE TRAFFIC MANAGEMENT DURING THE CONSTRUCTION OF TUNNELS ON A HAMBURG MOTORWAY A7 / E45

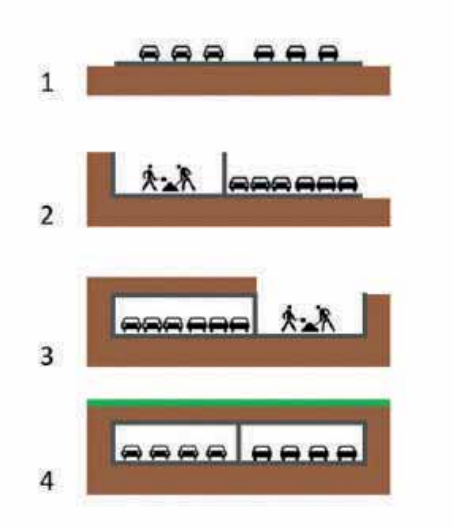
4.1.1. Objectives

The A7 / E45 is a cross-regional European north-south route and in the Hamburg metropolitan region (Germany) influenced by high volumes of commuters with up to 150,000 AADT over 2X3 lanes and short distances between the motorway exits / entries. To improve capacity an extension of the motorway with one additional lane per direction was required. The motorway passes through an urban populated area and therefore

the need for adequate noise protection / reunification of urban quarters made it necessary to cover the motorway at three sections.

The resulting three motorway tunnels (appr. 0.5, 1 and 2 km long) north of the existing 3 km long Elbe Tunnel have to be built without substantially interrupting the traffic flow on the A7 / E45 and the surrounding urban network.

Each of the three new two-tube tunnels (Schnelsentunnel, Stellingentunnel and Altonatunnel) is to be constructed in the following major steps:



- Construction of the first tube with ongoing traffic on the motorway along the construction side (2).
- Bi-directional traffic in the first tunnel tube during construction of the second tube (3).
- Bi-directional traffic in the second tube to retrofit the first tube for one-way traffic.
- Closure of the motorway for appr. one weekend to retrofit the second tube for one-way traffic.
- Opening both tubes for the regular one-way traffic operation with option to switch back to bi-directional traffic for maintenance / refurbishment (4).

Figure 5: Construction phases

4.1.2. Detailed Requirements

Various measures have been developed in order to meet the requirements for network availability without compromising tunnel safety during the construction period (while also being beneficial for the final state). To assess tunnel safety, quantitative risk analyses have been carried out. Different approaches had to be evaluated resulting in the following major elements in the area of traffic management:

Structural :

- Niches for ventilation and traffic equipment in the tunnel ceiling to provide clearance of appr. 4,85 m (to operate safely without an automatic height control which leads to interruption of traffic).
- Maximised lane width plus hard shoulder in the final state for being able to operate bi-directional without reducing capacity and safety to an unacceptable extent.
- Physical separation of traffic directions through steel elements during bi-directional traffic with a maximum height of 60 cm in order to be surmountable by tunnel users and emergency services in the event of an incident.
- Manually operated gates in the physical separation before and after the tunnels in regular intervals for emergency vehicles to cross.
- Hydraulic movable gates in the physical separation in the tunnel for disabled persons in regular intervals.

Technical :

- Variable traffic signs and lane control signals for bi- and uni-directional traffic
- Movable barriers in central reservation (to switch to bi-directional traffic in case of major refurbishment or maintenance in the final operating state).
- Co-ordination of traffic lights in the adjacent urban road network to prevent vehicles queing back on the motorway and into the tunnels.
- Variable message signs at motorway entries indicating diversions to alternative roads in case of a tunnel closure.
- Quick incident detection and localisation via automatic video detection, inductive loops / radar sensors (congestion, stopped vehicle, obstacles, …).

Organizational :

- Speed limit 60 km/h during bi-directional traffic (80 km/h in the final state).
- Congestion monitoring and management via tunnel control center (temporary speed reduction, lane or tunnel closures to reduce the number of vehicles in the tunnel).
- Close interaction between construction site, emergency services and tunnel operator regarding adequate provision of escape ways and emergency routes subject to the progress of construction.
- Dedicated professional fire brigade for the tunnels which also assists to keep the motorway clear (e.g. removal of broken-down vehicles) – on site in 5-10 minutes.
- Installation of permanent traffic co-ordinators during construction period in order to communicate with the public, politics, press, authorities and associations.
- Computer aided co-ordination of all major road construction works within the area of Hamburg to avoid negative interferences (ROADS Software).

4.1.3. Technical Challenges

- Automatic video detection systems need extensive calibration in order to minimize false alarms without compromising the required detection rate – this needs time and requires resources (experts).
- The hydraulic movable gates were implemented by a specifically developed solution. Regular inspections and optimisation (control of pressure and free movement) were necessary.
- Step-by-step realisation, testing of and training on new equipment demands a lot of technical effort (especially with running traffic safely next to the construction site).

4.1.4. Non-Technical Challenges

To ensure traffic flow throughout the construction process with just a few weekends of partial motorway closures possible, very thorough analysis and planning of all phases were required at an early project stage, in order to specify the requirements within all contracts of the project (availability and safety).

With many different parties involved, the essential permanent co-ordination requires outstanding project management skills, in combination with a high level of technical understanding and detailed knowledge of traffic flow on the motorway and the city's road network.

4.1.5. Evaluation

After about four years in the construction process, and two tunnels almost finished, it can be said that the elaborated traffic management elements lead to an acceptable level of availability of the motorway and adjacent areas in the city. Although congestion did occur regularly (especially at peak hours), the tunnel tubes have been built and operated without an overly increased incident rate. Due to a close accident and congestion monitoring, critical spots could be quickly identified, and in most of the cases remedied by (for example) additional traffic signs, modified road marking or relocation of interweaving areas (dynamic process).

The regular briefing and training of emergency services and operators on each construction phase produced a high quality in incident response and therefore minimized reduction of availability.

4.1.6. Lessons Learned and Recommendations

- The more prolonged congestions occur, the lesser is compliance with lane closures via lane signals (lane closures to minimise the number of vehicles in the tunnel). Compliance can be efficiently enforced by audio messages over loudspeakers from the tunnel control center (TCC).
- To calibrate automatic video detection systems in highly trafficked tunnels one needs well trained experts and also a good care for the operators in the TCC who have to deal with a lot of false alarms in the first weeks. To avoid unexpected costs it is recommended to precisely describe the expected level of quality and the necessary expert support within the contracts.
- Carry out as detailed as possible all traffic routing in construction phases already during early design stage in order to provide quick access for emergency services. Make this requirements a binding element in the building contacts, e.g. how many access points have to be provided, the required heights and widths for emergency vehicles passing through the construction site and the minimum time for contractors to clear the access routes from construction equipment in case of an incident.
- From the perspective of tunnel safety (and to avoid unexpected costs) it is crucial to establish the safety concept in a very early design stage and provide it at all project stages continuously to all involved parties - from designers to contractors. Take into account that the safety concept might need to be updated when unexpected changes in planning or in the construction process occur.

4.1.7. Further Information

Some of the above mentioned elements of safe traffic management during the construction of the new tunnels may also be applicable for existing two-tube tunnels undergoing major refurbishment or maintenance with bi-directional traffic in the unaffected tube.

4.2. REFURBISHMENT OF THE HALLEPOORT-TUNNEL IN BRUSSELS : A GLOBAL AND PROACTIVE TRAFFIC NUISANCE REDUCTION PROGRAMME

4.2.1. Main Objectives: Maintaining the Viability of the City

The Hallepoort-tunnel is an urban tunnel in the centre of Brussels (Belgium) through through which almost 40,000 vehicles pass every day.

As the Hallepoort-tunnel is an important part of the Brussels road network, the aim was to reduce the inconvenience during the renovation works, both for the tunnel users and for local residents. This is why a fully-fledged nuisance reduction plan was drawn up, which could only succeed thanks to close cooperation between engineers and communication specialists.

Figure 6 - Brussels road network

The main objective was to preserve the viability of the capital by ensuring that the city did not become completely clogged up during the road works in the Hallepoort-tunnel. That is why a great deal of attention was paid to keeping the tunnel accessible when organisating the renovation of this important urban tunnel.

When planning the tunnel closures, the impact on traffic was taken into account on the basis of available data and carefully calculated simulations.

It was found that during a tunnel closure, traffic moves to other roads in the city and on many of these roads the traffic is often (almost) at a standstill. Adding the tunnel traffic would have created major problems that would have endangered the mobility and economic viability of the city.

4.2.2. Accompanying Measures

In order to compensate for nuisance, a certain number of mobility plans and alternative measures were implemented :

- Hyper-coordination zone: Following the first tunnel refurbishment a coordinating commit-tee for construction sites ensures the coordination between various roadworks. It advises positively or negatively on a proposed construction site and the diversion routes.
- Infrastructure adaptations: Temporary lanes, traffic islands and bus lanes were set up in or-der to organise traffic in such a way as to limit inconvenience. The traffic lights were also ad-justed to limit traffic jams in the area.
- Diversion routes and alternative means of transportation: the fewer the motorists who re-sort to diversion routes, the better the nuisance could be channelled. That is why the choice of alternative routes and alternative means of transport were explicitly put forward.

The commuters had access to various Park & Ride-parkings with transfer facilities to public transport.

Figure 7: Sign for use of alternative transport

From far outside the capital, drivers have been advised to use alternative routes to reach Brussels. Instead of driving straight into the city centre, they were recommended to take the ring road to avoid the working site

Organising a modal shift: The public transport companies made an extra effort by increasing their offer and a secure cycle route for cyclists was set up near the tunnel.

Figures 8: Communication signs

Pragmatic communication, focusing on solutions: A pragmatic campaign with meaningful messages was chosen. This made more sense than polishing up the bad image of road works with creative ideas. Distributing accurate and valuable information to the right target groups at the right time was necessary.

The format of a weather report announcing climate change formed the inspiration for the communicative approach. Each phase of the road works was the subject of a new proactive communication campaign.

4.2.3. Technical Approach

The renovation of the Hallepoort-tunnel took place in six different phases, each with its own challenges.

4.2.3.1. Before the Start

In the neighbourhood of the Hallepoort-tunnel there are two important hospitals and also numerous large employers. Several information meetings were organised and an ombudsperson was available 24/7 throughout to deal with specific questions and problems.

Flyers were distributed at the most important intersections, selected on the basis of traffic figures. Other means such as an announcing pavement sign and stewards. Another flyer, with specific information, was distributed to local residents.

4.2.3.2. During the Construction

- A website was set up with general information about the reason for the renovation as well as clearly visible infographics showing whether the tunnel was open or closed. The alterna-tive routes and means of transport were immediately put forward.
- Flyers were distributed to motorists at the most important intersections in the neighbour-hood.
- A general leaflet distributed door-to-door to local residents in the surrounding municipali-ties explained the whole reason for the works.
- Social media to easily and quickly reach the right people with up to date informations about the roadworks (mainly Facebook and Twitter).
- A partnership was formed with Waze (navigation app). Thanks to geotargeting, motorists in the neighbourhood were able to see the message about the road works.
- A radio spot to inform commuters about the nuisance was implemented.
- Infographics were used throughout the whole campaign to indicate when the tunnel was (partly) opened or not.
- Posters were provided as a means of communication for the hospitals and major employ-ers.
- An email campaign for companies was set up.
- Very selective use was made of the outdoor advertising network in order to cover the dif-ferent access roads leading to the Hallepoort tunnel.
- An entertaining animation video told the whole story of the renovation.
- Press relations were also part of the communication plan: a press release was issued at the start at every phase change, and press visits were organised regularly.

Figure 9: Special navigation app

4.3. AFTER THE RENOVATION

At the end of the renovation of the Hallepoort-tunnel, a grand rave party was organised in cooperation with a popular disco nearby. Everyone could apply for free tickets.

Figure 10: After-the-renovation party

4.3.1. Evaluation

From the outset, everyone was convinced of the importance of being able to respond quickly to changing circumstances. Thanks to this, combined with the massive communication actions and the rather dramatic messages about the expected traffic problems, the expected nuisance did not materialise.

Given that the budget for the entire communication campaign was only 238,786 euros - barely 0.625% of the works themselves - one can speak of a large return on investment.

4.3.2. Improvement Points and Recommendations

Despite the positive results, a number of improvement points and recommendations can be made for the future.

- An important problem is the often late decisions of the Coordinating Committee for Con-struction. As a result, only little time was available between taking a decision on a phase and/or diversion and mapping out its consequences. This often makes it difficult to adapt the accompanying measures and communication actions to them.
- Specifically for the Brussels context, the high turnover and multilingualism of the population limits the efficiency of communication.
- It is advisable to provide for a fixed percentage of tunnels for each (large) construction site for improved nuisance reduction measures. This includes the means of communication but also the means for additional measures such as, for example, the extension of the public transport offer.
- It is also advisable to appoint an annoyance mitigation coordinator for all large construction sites. This can ensure that all measures to reduce nuisance are coordinated and negotiate with the various stakeholders in order to take measures (public transport companies, smart mobility operators, parking agencies, etc.). This person can also act as the link between the stakeholders, the client and the people responsible for communication.

5. NEW TOOLS FOR MAINTENANCE AND OPERATION

5.1. CAFM AND BIM TO MAINTENANCE IN CZECH REPUBLIC

5.1.1. Objectives

After commissioning (2015) the Blanka Tunnel Complex (BTC), the tunnel manager decided to additionally create a Computer-Aided Facility Management (CAFM) system including the Building Information Modelling (BIM) system. In addition to saving on administration, operation and maintenance costs, the tunnel manager expects optimisation of maintenance processes and activities, simplification of control activities, and a reduction of maintenance time.

5.1.2. Technical Challenges

For information support of BTC administration and maintenance processes, the development of its own CAFM system is underway. The CAFM system uses databases of semantic data from the BIM model. The geometric component is used to visualise specific parts of the equipment or parts of the structure.

The CAFM system includes an analytical part, enabling the analysis of alarm logs from the tunnel control system. This creates an extensive set of data that can be purposefully evaluated by data mining techniques and thus serve to predict maintenance and service. Common statistical tools are applied (ANOVA, regression, neural networks, factor analysis). When processing the complete volume of records for more than 5 years of operation, these may be tasks reaching the volume of big data, so they are not run in the system by default, but the data are analysed externally in appropriate software tools (e.g. Statistica).

5.1.3. Non-Technical Challenges

If BIM is applied continuously during the design and implementation of the construction, the accumulation of information about the construction and installed equipment is gradual. The resulting set of information then can be consolidated without the risk that the data is inaccurate or incomplete. Because BTC is already in operation, it is necessary to create and verify a new detailed database of equipment. This task is very demanding, including the checking and verification of the accuracy of data and information. Time and effort incur additional costs in the implementation stage as opposed to being incurred in the design stage.

5.1.4. Evaluation and Specific Benefits

In addition to its own specific benefits, the implementation allows the stakeholders (manager, investor, designers, etc.) to get acquainted with the process and pitfalls of creating these systems. The knowledge gained can then be used not only in the implementation for tunnels already under operation, but especially in the design phase of future, even more complex tunnels. The tunnel manager assumes that the impact on life cycle costs will be positive over time.

Specific benefits of BIM in general during the operation or reconstruction phase are:

- Clearer management of the facility - quick access to quality information.
- Effective maintenance - quality information ensures more qualified decision-making, predictive maintenance.
- Efficient use of energy - optimization of energy balance.

- Effective implementation of maintenance and operation changes.
- Facility life cycle cost management - BIM allows you to evaluate the Whole Life Cost (WLC) instead of only the investment costs and to reduce the life cycle costs.
- Efficient data transfer between the BIM model and the CAFM system - especially semantic data which serve as a connection between the systems.

5.1.5. Lessons Learned and Recommendations

For the successful creation of CAFM on BIM data, it is necessary to determine the sorting characters and identification not only for the equipment, but also for parts of the facility (buildings, floors, rooms). This structure must be present in the BIM data, ideally already in the design phase. The logic of writing and retrieving information should be uniform and unchanging. However, their determination depends on the needs of administration and maintenance; it cannot be determined only from the point of view of the designer or contractor. BIM and CAFM are not separate systems, but must form one logical unit. Already at the design stage, there should be a clear idea of how the construction will be operated, managed and maintained.

It should also be borne in mind that the availability of the relevant data and their qualitative parameters are a necessary condition for their subsequent analysis. Therefore, the Data Management System (DMS) for records management (documents, photographs, etc.) is also implemented in CAFM/BIM. It is also necessary to work with metadata for these documents and ensure that their structure is compatible with BIM data.

5.1.6. Further Information

In the BTC, the CAFM / BIM system is now used for service management (fault reporting and registration), registration of authorised organizations and persons, registration of events by time and location and management of fire safety equipment. Typical examples of usage on a daily basis, are the planning of the daily work schedule, continuous registration of performed activities and transfer of records of performed maintenance directly to the system, where activities are assigned to each individual device. The registration and management of spare parts and the maintenance system is now being prepared.

5.2. RAMS IN GOTTHARD RAIL TUNNEL PROJECT SWITZERLAND

5.2.1. Objectives

In the Gotthard Base Tunnel the European standard EN 50126 "RAMS - Reliability, Availability, Maintainability, Safety" was carried out from the planning to the integration. It is therefore a good practical and general example of how RAMS can be applied.

5.2.2. Technical Challenge

The completion of the railway tunnel was subject to strict operational requirements. These were defined using disturbance classes. The influence on the railway system was thus quantified.

Class	Influence on Railway System	Example
1	No longer than 1h influence on timetable stability. The sum of delays of directly affected trains is less than 10 minutes	Emergency braking of a train because of system failure Local outage of GSM-R for 1 minute
2	More than 1h influence on timetable stability. The sum of delays of directly affected trains is more than 10 minutes	Disturbance of wheel-counting apparatus driving on sight
3	Immediate blocking of one track section as result of failure or for fault repair	Switch points not in final position and impassable Rail breakage (ultrasonic failure) Enduring outage of overhead contact line
4	Immediate blocking of more than one track sections (one track) or total blocking (both tracks)	Total failure of signalling / safety devices Total outage of GSM-R

Figure 11: Influence on the railway system using disturbance classes

The disturbance classes define the reliability requirements. On this basis, complex calculations are necessary to know the required reliability of the individual systems. Fault trees, statistical data, manufacturer's specifications and other sources of information can be used for the calculations.

Examples: derived requirements for the power supply system

Subsystem	Availability
High voltage power supply	99.941%
Low voltage power supply	99.936%
Power supply transverse tunnel	99.852

Figure 12: Reliability requirements for the power supply system

The basic principle of reliability prediction and integration of single results of one subsystem into the complete tunnel system is necessary. This includes e.g: basic component data, RAM-interfaces, reliability calculations, disruption protocol.

5.2.3. Calculation of Reliability Values

The procedure for the calculations can be summarised as follows (simplified):

Description: The failure mode, the cause and the various effects of a failure must be known. Therefore the interrelationships of the systems must be known in detail with all interfaces.

Certificates: As many specifications, benchmarks and, if possible, statistical data are needed from the technical systems as possible. However, many manufacturers are very reluctant to release data.

Basic Data: In addition, basic data are required; especially MTBF (Mean Time Between Failures), MTTR (Mean Time To Repair). Here, too, data from the manufacturers are rarely available; in many cases, these data are not even known to the manufacturer or are guarded as trade secrets.

Of particular importance for tunnels are the average repair values MTTR; they are decisive for a rapid restoration of operation. For example, a UPS (uninterruptible power supply) can have an MTBF value of about 40 years with an MTTR of 8 h. An electronic component can have MTBF values of up to 250 years; however, the MTTR value is comparable to that of a UPS, e.g. 4 – 8 h. Based on the now known relationships in the fault tree, it can now be decided that spare parts are also required for a component with an extremely low probability of failure.

Remark: There is a large amount of freely available data for statistical values of reliability data; much information can be found under the term "US Military Handbook", MIL-HDBK.

5.2.4. Lessons Learned

The application of RAMS in the railroad environment has shown that this is possible, but requires immense effort. It is only feasible if precise requirements exist and the technical installations can be specified very precisely. The additional engineering effort only makes sense in large projects and also requires an employer who is willing to pay for the additional effort.

6. CONCLUSIONS AND NEXT STEPS

The report shows that case studies are particularly suitable for providing an insight into the implementation of special requirements in terms of maintenance and traffic management of heavily trafficked road tunnels in different countries. It has proven useful to group the case studies into three categories, which are:

- Implementation of the "quick responders" concept with different approaches
- Measures to organize work and to reduce nuisance to users during the renovation of tun-nels
- New tools for maintenance and operation

The quick responders approach is generally considered to be an appropriate measure. However, local requirements must be carefully considered. Specially equipped motorcycles are recommended as suitable responding vehicles.

In the second category, various approaches are possible, and these should be tailored as closely as possible to the renovation project in question. Public information campaigns can be just as important as technically sophisticated traffic guidance installations and design adaptations.

New tools such as BIM (building information modeling) and CAFM (computer aided facility management) derived from it are future methods of viewing tunnels like "machines" that can be calculated. The maintenance status of the components is continuously monitored and measures are derived from this. Probabilistic approaches, e.g. on the basis of the RAMS ISO-standard (reliability, availability, maintainability, safety), can be used to take failure probabilities into account. Such methods are already in use in some cases, but are particularly effective if the methodology can already be used during the initial design and construction phase.

The case studies provide interesting insights into different approaches to solutions in different countries, but it also became apparent that each case must be considered on its own merits. The findings cannot simply be transferred to other tunnels or situations. Further, more in-depth analyses are needed in each individual case.

The next steps are now to deepen and further explain the findings of the case studies in a full technical report. Questions like: In which cases is the application of a special maintenance and operation method worthwhile? How can the cost-benefit ratio be estimated? To what extent is specific expertise needed for the implementation of such methods? will be addressed and corresponding recommendations formulated.

7. GLOSSARY

Term	Definition
AADT	Annual Average Annual Daily Traffic
BIM	Building Information Modelling
BMS	Battery Management System
CAFM	Computer-Aided Facility Management
CAN	Controller Area Network
CCTV	Closed Circuit Television
CBA	Cost Benefit Analysis
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Railway or GSM-Railway is an international wireless communications standard for railway communication and applications
MCE	Marina Coastal Expressway Singapore
MOR	Minimum Operation Requirements
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
OPC UA	Open Platform Communications – Unified Architecture; a platform independent communication standard
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability, Safety; based on European Standard EN 50126
RAM	Reliability, Availability, Maintainability; based on European Standard EN 50126
TVS	Tunnel Ventilation Simulator
WLC	Whole Life Cycle or Cost

DISEÑO DE UN TÚNEL PARA MEJORAR LAS CONDICIONES AMBIENTALES DEL ENTORNO

Juan Manuel Sanz Sacristán
Responsable de ventilación y seguridad de túneles
SENER INGENIERÍA Y SISTEMAS

Los túneles urbanos de gran tráfico o situados en entornos especialmente sensibles deben considerar entre sus parámetros de diseño las condiciones para minimizar su afección al entorno. En la mayor parte de los casos la construcción de un túnel implica una mejora en relación con la alternativa de disponer el tráfico en superficie (menores longitudes y pendientes de circulación, reducción de congestión, etc.) pero ello no quita que se deba seguir analizando las condiciones de diseño y operación de los túneles para mejorar su sostenibilidad.

En esta presentación se exponen diversas soluciones y configuraciones empleadas en los túneles de carretera en diversos países para mejorar el entorno en el que se ubican. Estas soluciones van desde la disposición de silenciadores, filtros, sistemas de catalización o chimeneas elevadas en los puntos de extracción de aire del túnel hasta soluciones como pavimentos y revestimientos catalíticos para reducir el impacto en el entorno del túnel. Otras soluciones van encaminadas a reducir la huella de carbono del túnel y a la introducción de otras mejoras que mejoren las condiciones del entorno.

Las mejoras analizadas en los túneles normalmente se han centrado en las condiciones en las que se encuentran los usuarios de los túneles, pero cada vez más se amplia estas consideraciones a la población y entorno situado en las inmediaciones de los túneles y a la de los trabajadores de operación y mantenimiento en el túnel.

DESIGN OF A TUNNEL TO IMPROVE THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF THE SURROUNDINGS

High-traffic urban tunnels or tunnels located in particularly sensitive environments must consider the conditions to minimize their impact on the environment among their design parameters. In most cases, the construction of a tunnel implies an improvement in relation to the alternative of arranging traffic on the surface (shorter lengths and slopes of circulation, reduction of congestion, etc.) but this does not mean that further analysis must be carried out about the design and operation of the tunnels to improve their sustainability.

In this presentation various solutions and configurations used in road tunnels in various countries to improve the environment in which they are located are exposed. These solutions range from the provision of silencers, filters, catalyst systems or raised chimneys at the tunnel's air extraction points to solutions such as catalytic pavements and linings to reduce the impact on the tunnel environment. Other solutions are aimed at reducing the carbon footprint of the tunnel and the introduction of other improvements that improve the conditions of the environment.

The improvements analyzed in the tunnels have normally focused on the conditions in which the users of the tunnels find themselves, but these considerations are increasingly extended to the population and environment located in the vicinity of the tunnels and to that of the tunnel workers. tunnel operation and maintenance.

CONCEPTION D'UN TUNNEL POUR AMÉLIORER LES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES DES ENVIRONS

Les tunnels urbains à fort trafic ou situés dans des environnements particulièrement sensibles doivent considérer les conditions pour minimiser leur impact sur l'environnement parmi leurs paramètres de conception. Dans la plupart des cas, la construction d'un tunnel implique une amélioration par rapport à l'alternative d'aménagement du trafic en surface (longueurs et pentes de circulation plus courtes, réduction de la congestion, etc.) mais cela ne signifie pas qu'une analyse plus approfondie doit être menée les conditions de conception et d'exploitation des tunnels pour améliorer leur durabilité.

Dans cette présentation, différentes solutions et configurations utilisées dans les tunnels routiers de différents pays pour améliorer l'environnement dans lequel ils se trouvent sont exposées. Ces solutions vont de la fourniture de silencieux, de filtres, de systèmes catalytiques ou de cheminées surélevées aux points d'extraction d'air du tunnel à des solutions telles que des revêtements et des revêtements catalytiques pour réduire l'impact sur l'environnement du tunnel. D'autres solutions visent à réduire l'empreinte carbone du tunnel et l'introduction d'autres améliorations qui améliorent les conditions de l'environnement.

Les améliorations analysées dans les tunnels se sont normalement concentrées sur les conditions dans lesquelles se trouvent les usagers des tunnels, mais ces considérations sont de plus en plus étendues à la population et à l'environnement situés à proximité des tunnels et à celui des ouvriers du tunnel et entretien.

1. INTRODUCCIÓN

Cada día hay mayor sensibilización en la sociedad sobre las condiciones ambientales que se deben preservar en cualquier actuación y de establecer medidas encaminadas a la reducción de consumo de energía y del cambio climático en las distintas actividades diarias. Esto implica una mayor concienciación en relación al diseño y operación de los túneles de carretera. En cualquier caso, aunque no se tuviera conciencia de ello la mayor parte de los túneles son en si mismo una mejora de la sostenibilidad del transporte público. En esta presentación se exponen algunas ventajas que un túnel puede suponer, así como diversas medidas que pueden adoptarse para incrementar en mayor medida su contribución a la sostenibilidad.

2. VENTAJAS DE UN TÚNEL EN LA SOSTENIBILIDAD

Teniendo en cuenta que la contaminación y consumo de los vehículos tiene una gran dependencia de los siguientes factores:

- Distancia recorrida
- Pendiente longitudinal
- Velocidad de circulación
- Procesos de frenado y aceleración

Los túneles en entornos montañosos suelen implicar menores distancias recorridas y pendientes longitudinales respecto a la de la alternativa sin túnel, por lo que suelen implicar menores consumos de energía y menor contaminación derivada del tráfico. Como ejemplo, en el túnel de Somport la diferencia de distancia y tiempo de circulación entre ambos lados de la frontera es de un incremento de 8 kilómetros y 17 minutos adicionarles por la carretera que pasa por el puerto en relación a circular por el túnel.

Diferencia de distancia y tiempo de circulación por el túnel o por el puerto de Somport (Fuente Google Maps)

En los entornos urbanos los túneles suelen construirse para mejorar las condiciones de tráfico y reducir las horas de congestión, por lo que en general se consigue una circulación más fluida y uniforme lo que deriva en una menor contaminación del entorno. Además, en estos entornos la construcción del túnel suele implicar una mejora urbanística (visual, ruido, ambiental, espacios peatonales, …) y la posibilidad de introducir nuevas zonas verdes o de esparcimiento. Como ejemplo podemos presentar el soterramiento en diversos puntos de la M30 en la que la nueva configuración en túnel permitió una mejora en el entorno urbano (Avenida de Portugal) o la mejora del entorno del rio Manzanares y la disposición de nuevas zonas verdes (Madrid Rio).

Comparación de la zona de la Avenida de Portugal entre 2003 (arriba con tráfico en superficie) y 2017 (con soterramiento). Fuente: Instituto Geográfico Nacional.

Estado actual de la Avenida de Portugal sobre la M30. Fuente: Google Maps

Las mejoras de un túnel en el entorno también se obtienen en entornos en los que haya que preservar el entorno y que la construcción de un túnel puede garantizar que la circulación no afecta al entorno. Esta solu-

ción se adoptó en el Túnel de Somosierra para preservar el entorno del alto de Somosierra de la circulación de vehículos. Actualmente está en desarrollo la construcción de un túnel en el entorno de Stonehenge para preservar el entorno del monumento megalítico del tráfico creciente en la zona.

Túnel previsto en las inmediaciones de Stonehenge para mejorar el entorno soterrando el tráfico de manera más alejada al monumento. Fuente: Web de National Highways

Otra ventaja indirecta es la mayor seguridad de los túneles en relación a los tramos a cielo abierto lo que indirectamente implica una reducción de consumo de consumo de energía derivado de los costes de intervención en caso de accidente, atascos o desvíos de tráfico durante la intervención, reparaciones, intervenciones médicas, …

3. POSIBLES INCONVENIENTES DE UN TÚNEL EN LA SOSTENIBILIDAD

Los posibles impactos desfavorables de un túnel en el medio ambiente y en la sostenibilidad son principalmente los siguientes;

- Consumo de energía y materiales del propio proceso de construcción del túnel
- Consumo de energía propio de la operación y mantenimiento del túnel
- Concentración de contaminantes en las bocas del túnel del tráfico de todo el tramo (aspecto muy relevante si el túnel tiene elevado tráfico y gran longitud)

En algunos casos se está ya haciendo hincapié en la medición y reducción de la huella de carbono en todo el ciclo de vida del túnel, tanto en la construcción, como en la operación y posibles actualizaciones del túnel. Es de especial importancia que se considere el ciclo de vida completo del túnel ya que centrarse solo en la construcción o en la operación puede implicar reducciones solo en una parte que impliquen un mayor impacto en toda la vida del túnel.

4. PRINCIPALES ACTUACIONES PARA REDUCIR LAHUELLA DE CARBONO DE UN TÚNEL DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

Las medidas para reducir la huella de carbono durante la construcción suelen estar enfocadas en los siguientes aspectos:

- Minimización de los materiales empleados en la construcción
- Optimización en la configuración del túnel en relación con el entorno para minimizar longitudes, volúmenes excavados, etc.
- Optimización de los procesos constructivos y empleo de maquinaria de alta eficiencia
- Reutilización de los materiales excavados
- Optimización de los equipos y sistemas necesarios en el túnel para establecer configuraciones optimizadas en cuanto a número de equipos, materiales, suministros, …
- Empleo de materiales de gran vida útil para reducir las necesidades de sustitución y actualización

Algunas de estas medidas van en contra de los consumos necesarios para la operación, por lo que se deberá analizar la huella de carbono a lo largo de todo el ciclo de vida para encontrar el equilibrio idóneo entre instalación y operación. Como ejemplo, indicar que la instalación de ventiladores con mayor rendimiento requieren un mayor número de ventiladores, pero menor número de cables y potencia instalada; en contrapartida se tendrá un menor consumo de energía, un menor término fijo de potencia, pero mayor coste de mantenimiento durante el periodo de explotación.

Túnel de Port Said en Egipto bajo el Canal de Suez

5. PRINCIPALES ACTUACIONES PARA REDUCIR LAHUELLA DE CARBONO DE UN TÚNEL DURANTE LA OPERACIÓN

Las principales medidas para reducir la huella de carbono durante la operación son:

- Equipos de alta eficiencia
- Equipos que requieran bajo mantenimiento
- Análisis de configuraciones y equipamiento de menor consumo de energía, manteniendo la seguridad del túnel

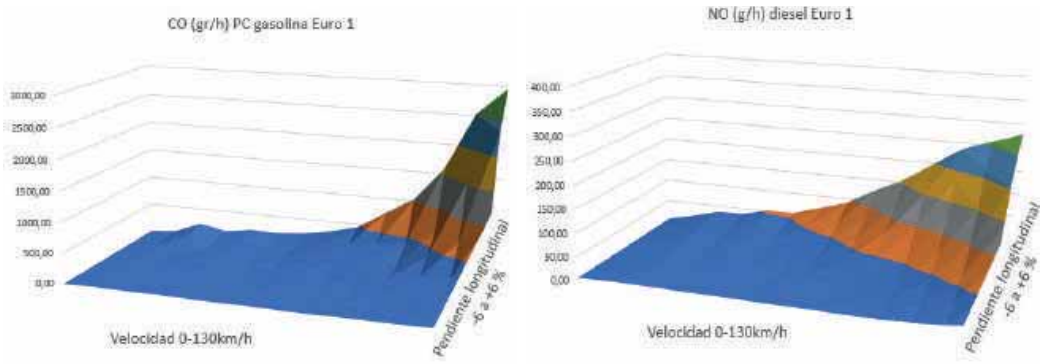
- Regulación y ajuste óptimo de los sistemas a las condiciones reales del túnel
- Minimizar tiempos de cierre del túnel
- Optimización de los procesos de mantenimiento preventivo y correctivo
- Optimización de los algoritmos de operación y de respuesta ante los distintos eventos

Túnel de la variante Sur de Bilbao

6. POSIBLES MEJORAS EN LA CALIDAD DEL AIRE

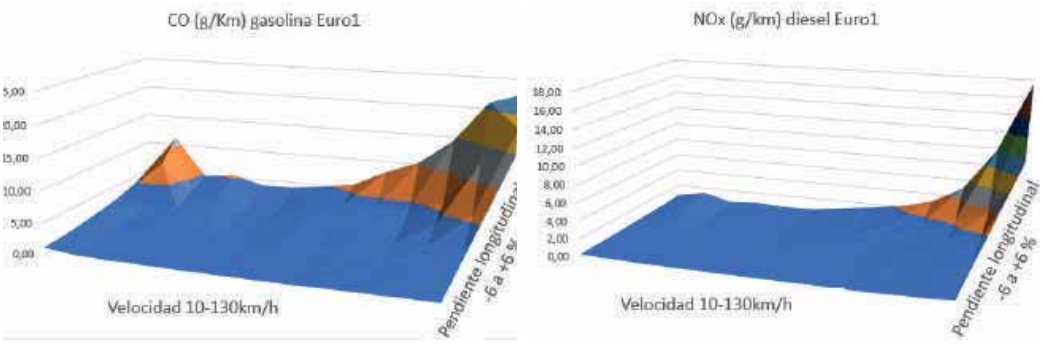
Aunque las emisiones de los vehículos llevan muchos años reduciéndose, obligados por las distintas normativas encaminadas a reducir la contaminación en el transporte, hay que tener en cuenta que también se han ido reduciendo los niveles de contaminación admisibles en el túnel y en el exterior y se han establecido límites a determinados contaminantes que hace años no se contemplaban. En algunos casos, las emisiones de NOx no se han reducido en todas las ocasiones en que se ha actualizado la normativa, ya que en algunas ocasiones las reducciones de consumo establecidas han conllevado un cierto aumento de emisiones de NOx, aunque en cualquier caso la tendencia a largo plazo es descendente. Todo ello ha derivado en que la ventilación actual de los túneles siga requiriendo complejos equipamientos con una gran potencia instalada y consumo eléctrico en caso de que sea necesario su activación. Hace años el dimensionamiento de la ventilación solía estar condicionada por la dilución de concentraciones de CO (además de las condiciones requeridas por el incendio de diseño) mientras que actualmente suele estar condicionada por la dilución de NO2.

La evolución tecnológica de los coches con motor de gasolina ha implicado que los elevados niveles de CO que emitían hace años se reduzca en los vehículos modernos a valores próximos a cero. En los vehículos de gasoil, por el contrario, el incremento en el número de vehículos con gasoil y la reducción en los valores máximos permitidos ha invalidado gran parte de las mejoras introducidas en las emisiones de este tipo de vehículos. Los valores máximos de NO2 se han reducido enormemente (tanto para los usuarios de los túneles como en entornos a cielo abierto, como son los urbanos) debido a su carácter cancerígeno.



Variación de las emisiones de CO y NO en función de la velocidad y pendiente longitudinal.
Fuente: Documento técnico de PIARC Road Tunnels: Vehicle emissions and air demand for ventilation

Si transformamos las emisiones a valores por kilómetro de vehículo recorrido se observa que las mayores emisiones se producen a bajas y altas velocidades con valores mayores cuanto más elevada sea la pendiente ascendente.



Variación de las emisiones de CO y NO por kilómetro recorrido en función de la velocidad y pendiente longitudinal.
Fuente: Documento técnico de PIARC Road Tunnels: Vehicle emissions and air demand for ventilation

En general, la necesidad de ventilación será mayor a bajas velocidades ya que a altas velocidades el efecto pistón de los vehículos suele generar corrientes longitudinales de aire que establecen una cierta dilución de las concentraciones de los gases a controlar. También hay que tener en cuenta que las emisiones de los gases de los vehículos se incrementan enormemente en los procesos de aceleración y que son más frecuentes en las situaciones de congestión a baja velocidad.

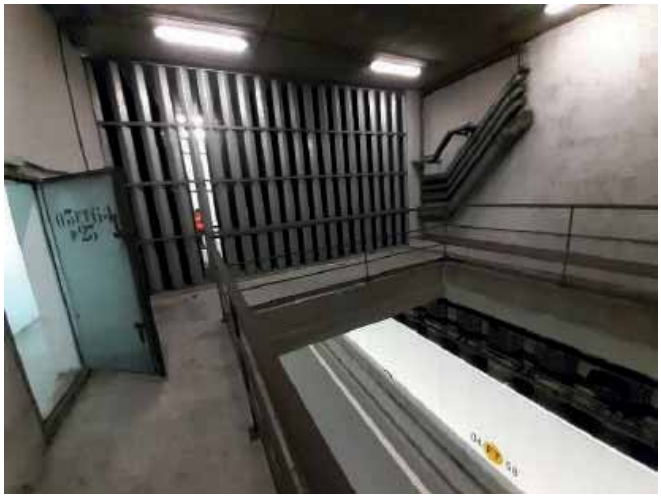
6.1. En relación con la instalación de ventilación

La instalación de ventilación tiene una función principal que es la de preservar unas condiciones ambientales en el interior del túnel para garantizar la seguridad de los usuarios del túnel y de los posibles trabajadores de mantenimiento. De manera indirecta o derivada se debe analizar que los gases que se expulsan del túnel no afecten al entorno. Estos puntos pueden ser tanto los pozos de extracción de aire como los propios portales de entrada y salida.

Según las condiciones de concentración de gases previstas en el interior del túnel y de los condicionantes del entorno en que se ubiquen los pozos y portales será necesario establecer configuraciones o equipamientos que minimicen los potenciales impactos. Las principales medidas implantadas en diversos túneles son los siguientes:

- Silenciadores
- Filtros
- Equipos catalizadores
- Disposición de chimeneas

Los silenciadores pueden disponerse tanto en el lado exterior como interior en relación a los ventiladores para asegurar que los niveles sonoros son adecuados para el entorno (normalmente viviendas o población) y para los usuarios del túnel. Su instalación suele implicar elevadas pérdidas aerodinámicas por lo que suele requerir grandes espacios en el pozo (área transversal, longitud de silenciador y distancias a equipos próximos).



Silenciador en conexión de pozo con calzada en la M30.

Los filtros pueden ser de diversa tecnología (electrostáticos, de carbono, de material filtrante, …) y su función principal es la de atrapar las partículas en suspensión en el aire que se expulsa al exterior. Su mayor implantación es para túneles con gran longitud y tráfico en entornos urbanos. Son sistemas que requieren grandes espacios en el pozo y elevados consumos de energía.

Planta de limpieza de filtro electrostático en la M30

Los equipos catalizadores son instalaciones por las que se pasa el aire para que el gas contaminante (principalmente CO y NO2) reaccione con el aire para obtener un gas no tóxico (CO2 y NO). Principalmente se aplica en túneles largos y de gran tráfico en los que no es posible disponer de pozos de impulsión y extracción de aire del exterior.

Disposición de chimeneas o punto de expulsión de aire a grandes alturas para minimizar la afección a las viviendas y población cercana. El principio de esta medida se lleva aplicando en la industria desde hace mucho tiempo, ya que al disponer el punto de expulsión en un punto muy elevado sobre el terreno se mejora la dilución en la atmosfera. Es una medida muy habitual en los túneles de Australia ubicados en entornos urbanos. Un aspecto a cuidar con este tipo de soluciones es la de integrar la chimenea en el entorno (para minimizar el impacto visual) y la de comunicación a la población de las ventajas de este tipo de medidas para evitar una injustificada alarma social.

Chimenea de pozo de extracción de túnel en entorno urbano en Melbourne.
Fuente: Google Maps

6.2. En relación con la operación del túnel

Independientemente de la instalación dispuesta en un túnel, el operador dispone de diversas medidas que puede aplicar para reducir la concentración de gases en el interior del túnel y por tanto de las concentraciones que se expulsan al exterior por los pozos de ventilación o por los portales.

Los valores que normalmente se consideran en el diseño de la ventilación son aquellos que recomienda PIARC en los documentos técnicos relativos a ventilación sanitaria y que suelen estar basados en la no afección a usuarios que permanecen poco tiempo en el túneles. Por tanto, la activación de la ventilación suele producirse en valores relativamente elevados de concentración de gases. Si esta lógica de control pudiera implicar afecciones al entorno, se podrían reducir los límites para activación de la ventilación y por tanto tener en todo momento concentraciones menores. En casos extremos se podría llegar a imponer límites en el interior del túnel cercanos a los límites establecidos en el entorno, teniendo en cuenta que en la boca del túnel habrá cierta dilución con el aire exterior antes de alcanzar la zona donde se ubiquen las viviendas o la presencia de personas.

Optimización de algoritmos de ventilación. La verificación de las capacidades y condiciones reales del túnel pueden ayudar a optimizar los algoritmos de ventilación de forma que se adelante la respuesta del sistema a

la evolución de la operación y no se incremente en exceso el encendido de ventiladores (que implica mayor consumo de energía y necesidades de mantenimiento de los equipos). Actualmente ya se están aplicando control de la ventilación de túneles mediante inteligencia artificial lo que posibilita anticipar las distintas situaciones y la optimización de las condiciones en el túnel. La principal ventaja de aplicar IA al control de la ventilación es de que el sistema se autoadapta a las variaciones que se puedan producir (cambio en la flota de los vehículos o condiciones de tráfico) sin necesidad de tener que revisar los algoritmos cada vez que se perciban cambios relevantes.

De especial relevancia para el control de la ventilación de un túnel es que la información que se disponga de las condiciones del túnel sea ajustada a la realidad. En la selección e instalación de anemómetros se deberá cuidar que esté correctamente ubicado para que realmente su medida sea representativa del túnel y no esté afectada por turbulencias, obstáculos o chorros de ventiladores, siendo conveniente seleccionar equipos que no tengan grandes fluctuaciones al paso de vehículos. También se debe tener especial cuidado al seleccionar los equipos de medición de NO2 ya que muchos de los existentes en el mercado tienen valores de respuesta y de precisión no adecuados para los niveles límite que se quiere controlar (actualmente diversos países tienen valores máximos limitados a 0,4-1 ppm) y la medición indirecta a través de la concentración de NOx también presenta elevada incertidumbre (téngase en cuenta que la proporción entre NOx y NO2 puede oscilar entre un 10 % y un 30%).

Tal y como se ha indicado en apartados anteriores, la emisión de gases contaminantes de los vehículos se incrementa enormemente en procesos de frenado y aceleración y a bajas y altas velocidades. Por tanto, las medidas de gestión de tráfico que se adopten en la vía para minimizar congestiones y mantener velocidades uniformes implicarán una importante mejora de las calidad del aire tanto en el interior como en las bocas.

6.3. Otras medidas

Actualmente se están analizando la implantación de pavimentos y pinturas catalíticas del NO2. Para garantizar la eficiencia de estas medidas en los túneles se debería comprobar su eficiencia en las condiciones previstas en el túnel, ya que en la mayor parte de los casos su eficiencia depende en gran medida de las condiciones de luz y de temperatura.

Las partículas en suspensión en el túnel tienen dos causas principales: las emisiones de los vehículos y las derivadas de la suciedad en el túnel que se desplazan por las corrientes de aire provocadas por las turbulencias de la circulación de los vehículos. El paso periódico de barredoras derivará en un menor número de partículas en suspensión en el ambiente.

7. POSIBLES MEJORAS PARA REDUCIR EL CONSUMO DE ENERGÍA

Los mayores consumos de energía en los túneles suelen producirse en los sistemas de iluminación y en menor medida por la ventilación. Salvo en túneles con congestiones frecuentes la iluminación es con gran diferencia el sistema con mayor consumo de energía. Posiblemente por esto siempre se ha tenido una especial atención al rendimiento de este sistema en el diseño y construcción de los túneles, tanto en el empleo de equipos con alto rendimiento como en el establecimiento de regulación que permita ajustar su funcionamiento a las condiciones de operación. En cambio, en la ventilación no ha sido habitual dedicar los mismos esfuerzos para optimizar su implementación.

7.1. Posibles mejoras en el alumbrado

En el alumbrado siempre se han empleado sistemas de gran eficiencia y rendimiento habiendo sido habitual el empleo de luminarias de VSAP de alta potencia que presentan un gran ratio lúmenes por vatio. Una vez

que la tecnología led ha madurado y ofrecido fiabilidad y rendimientos similares o superiores al VSAP se ha generalizado su empleo en los túneles de nueva construcción. En los sistemas de alumbrado de VSAP la regulación se hacía mediante el apagado y encendido de distintos circuitos y la activación de balastos que establecían una reducción de determinadas luminarias. Con los leds las posibilidades de regulación se han incrementado enormemente al poder regular cada una de las luminarias de manera continua entre 0 y 100%. El adecuado empleo de esta característica de los leds puede aprovecharse para minimizar los consumos de energía en los siguientes aspectos:

- Evitar la sobreiluminación inicial que implica el haber sobredimensionado el alumbrado para tener en cuenta el factor de mantenimiento establecidos en las normas (degradación que tendrá la luminaria a lo largo de su vida útil)
- Ajustar las longitudes de refuerzo en bocas a las condiciones reales del túnel (principalmente dependiente de si hay lluvia o no)
- Ajustar los niveles de iluminación con precisión a la curva requerida en cada momento por las condiciones de tráfico
- Posibilidad de realizar ajustes a las condiciones reales del túnel a lo largo de su vida útil (estado del pavimento, reflectancia de superficies, …)

Además, hay que tener en cuenta que la reducción de potencia en los proyectores Led implica una menor degradación de los mismos y por tanto una mayor duración de los mismos.

Otras medidas a implantar en un túnel para reducir la necesidad de iluminación pasan por seleccionar la luminaria óptima para el túnel (aprovechamiento máximo del haz de luz en las zonas requeridas) y su distribución idónea (altura, interdistancia y orientación), incrementar la reflectancia de las superficies (pavimentos claros o coloreados, hastiales pintados o con paneles reflectantes,…) o reducir los niveles lumínicos en las bocas de acceso o salida (parasoles o elementos atenuadores de la luz, acabados oscuros, …).

Parasoles en boca de salida de la M111 para evitar deslumbramientos. Fuente: Google Maps

7.2. Posibles mejoras en la ventilación

Para la reducción de consumos de energía en el funcionamiento de la ventilación, sin modificar las condiciones establecidas tanto para sanitario como para incendio, se deben seleccionar adecuadas configuraciones y estrategias de ventilación, equipos de alto rendimiento y configuración optimizada de la instalación.

En general, la máxima eficiencia de la ventilación se obtiene en los túneles de tráfico unidireccional, empleando ventilación longitudinal que aprovecha el efecto pistón de los vehículos, aunque esta configuración

no puede utilizarse en los túneles bidireccionales o en casos de gran longitud o con congestiones frecuentes en que normalmente habrá que acudir a ventilaciones semitransversales o transversales. A este respecto hay que destacar, que algunos túneles en operación que disponen de ventilación semitransversal o transversal puede obtenerse un importante ahorro de energía al establecer una operación asimilable a la longitudinal (impulsión en los conductos cercanos al portal de entrada y extracción en los cercanos a la salida. Esta estrategia ha sido implantada con éxito en túneles como El Negrón, Guadarrama o Túnel de Occidente.

Tubo 2 del túnel de Guadarrama con ventilación transversal con control asimilado a longitudinal

En los sistemas de ventilación longitudinal los principales factores que afectan a las necesidades de empuje y a las necesidades de energía son:

- Eficiencia de los jet fans empleados (empuje/consumo eléctrico).
- Rendimiento de instalación de los jet fans (distancia a paredes, obstáculos y a otros jet fans).
- Configuración del túnel (longitud, pendiente longitudinal, sección transversal, …)
- Condiciones de tráfico (velocidad de diseño, intensidad de tráfico, configuración de tráfico, antigüedad del parque móvil, …) y requerimientos de seguridad (incendio de diseño, posición del incendio, estrategia de ventilación, …).
- Rugosidad del túnel, cambios de sección y otros elementos que produzcan turbulencias o pérdidas de carga aerodinámica.
- Condiciones ambientales (vientos en boca, diferencias de presión, …).

Muchos de estos factores vienen dados y no es posible modificarlos, mientras que en otros casos habrá que encontrar el equilibrio optimo entre eficiencia y coste de implantación y operación y de las actuaciones requeridas para ello. Normalmente la eficiencia de los jet fans crece al incrementar su diámetro y su rendimiento de instalación crece al alejarlo de las paredes por lo que los dos efectos se contraponen al tener normalmente una sección trasversal limitadora. Asimismo, la eficiencia aumenta al bajar la velocidad de chorro del ventilador seleccionado por lo que para un mismo empuje se necesitarán un mayor número de ventiladores, aunque con una potencia total menor. Estas decisiones se deben apoyar en el análisis global del ciclo de vida para la toma de decisiones respecto a todos los parámetros que intervienen.

En los sistemas de ventilación semitransversal o transversal (y en parte en los pozos de ventilación) los principales factores que afectan a su configuración y a las necesidades de energía en los pozos son (no se incluyen

los 4 últimos puntos indicados más arriba para la ventilación longitudinal ya que son comunes para ambos casos):

- Eficiencia de los ventiladores axiales, lo que implica la selección del ventilador para el punto idóneo de trabajo. En general al utilizar mayores diámetros se obtienen menores velocidades en el ventilador y en consecuencia una menor presión total que influye directamente en la potencia del ventilador.
- Configuración del pozo y de los conductos para minimizar pérdidas (minimizar cambios de sección y de dirección, optimizar elementos singulares como silenciadores o rejillas, distancias entre elementos, …).
- Disposición y dimensiones de las rejillas de conexión con el túnel y distancia a las bocas.

Una vez más habrá que llegar a un equilibrio entre todos estos factores ya que los valores más favorables implican incrementos de dimensiones de todos estos elementos que requerirían elevadas actuaciones de obra civil.

7.3. Otras posibles mejoras

Se debe tener precaución a la hora de establecer redundancia de equipos y sistemas, así como en los márgenes de seguridad el diseño ya que todos estos elementos deberán estar operativos durante toda la vida del túnel (mantenimiento, renovación, …). Además, estas soluciones pueden derivar en mayores consumos de energía, así como en coste directos o indirectos. Como ejemplo cabe citar que cualquier transformador conectado a la red tiene un consumo de energía en los devanados primarios, aunque el transformador no esté en carga. Las pérdidas en un transformador pueden llegar al 5% del valor de la potencia nominal del mismo. Por tanto, se deben tener en cuenta en el diseño de un túnel que cualquier reducción en la potencia instalada implicará un menor consumo y coste del factor fijo de la factura de energía. En la operación se podrá analizar si se puede establecer una configuración más adecuada con la instalación disponible (como desconectar de la red los transformadores dispuestos como redundantes) y estableciendo los procedimientos de respuesta ante los posibles eventos considerados en su diseño.

8. OTRAS CONSIDERACIONES Y MEDIDAS

Otras medidas que pueden adoptarse en un túnel para mejorar su impacto en el entorno serían los siguientes, aunque algunas de ellas están en fase de investigación o experimental:

Medidas en el drenaje para mejorar las condiciones de los vertidos al exterior:

- Disposición de arquetas de separación de grasas
- Disposición de elementos para filtrado y/o sedimentación antes de bombeo
- Disposición de depósitos para almacenamiento de vertidos para su posterior retirada y tratamiento
- Control de calidad del agua de los pozos de drenaje para su bombeo al exterior o no

Actualmente se están considerando la implantación de diversos equipamientos para la obtención o gestión de energía, destacando los siguientes:

- Paneles solares en bocas
- Generación de energía eólica en bocas o en corrientes en el túnel
- Sistemas de almacenamiento y aprovechamiento de energía disponible (como puede ser mediante el movimiento de agua entre bocas a distintas cotas).

- Carga de vehículos eléctricos en inmediación del túnel aprovechando la instalación eléctrica dispuesta
- Aprovechamiento de la inercia térmica del túnel para climatización de edificios cercanos

Un aspecto en el que cada día se presta mayor atención es en la mejora del impacto visual que el túnel y los edificios de control tienen en el entorno.

Se puede coordinar la ventilación del túnel con el control ambiental del entorno pudiendo incrementar o reducir la ventilación en el túnel según las condiciones exteriores o incluso establecer la dirección de la ventilación en función de los vientos en la zona (de forma que la contaminación que pudiera salir del túnel se diluya y aleje de los puntos más sensibles). También se podría aprovechar las redes subterráneas urbanas para establecer movimientos de aire de zonas con mayores niveles de contaminación a zonas de menor nivel o al menos establecer la activación o no de pozos de extracción en función de los valores exteriores.

9. CONCLUSIONES

Los túneles pueden ser una buena solución para mejorar las sostenibilidad en entornos urbanos o en entornos que requieran una especial protección.

Los túneles suelen emplear soluciones con gran eficiencia energética, pero se debe seguir prestando atención y mejorando los procesos de diseño construcción y operación para reducir su impacto en el entorno en incluso para mejorarlo.

Se han expuesto diversas alternativas y ejemplos en los que se han aplicado con éxito para mejorar la eficiencia de la operación de los túneles y mejorar el entorno en el que se ubican.

Todavía queda mucho camino por recorrer hasta obtener túneles con huella de carbono nula en todo su ciclo de vida.

LA COMPLEJIDAD DE LA EXPLOTACIÓN EN UNA INFRAESTRUCTURA DE GRANDES DIMENSIONES

Sergio Barral García
Calle 30

Cada infraestructura tiene sus propias particularidades que influyen en su explotación. Calle 30 tiene una red de túneles de 40 km que son los mayores túneles urbanos de Europa con un tráfico muy elevado (más de 400 millones de trayectos al año). Estos túneles fueron construidos en los márgenes del rio Manzanares y en gran parte de su trazado por debajo del nivel freático. Se dispone de unos drenajes profundos que alimentan a 100 bombas distribuidas en 32 pozos de bombeo que en actualidad diariamente se están bombeando unos 14.700 metros cúbicos de agua. Encima de estos túneles se construyó el parque Madrid Rio desde el cual se accede a gran parte de los cuartos técnicos de instalaciones de los túneles. Calle 30 es un cinturón que rodea la almendra central de la ciudad de Madrid y es la última barrera de entrada a Madrid sin restricciones desde el punto de vista de emisiones. El tráfico de Calle 30 es muy elevado sobre todo en las horas punta de lunes a viernes no festivos. Todos estos factores tienen un factor determinante en la explotación de Calle 30.

Madrid Calle 30 es una empresa mixta que gestiona el mantenimiento de Calle 30 mediante un contrato por indicadores. Gran parte de los trabajos de mantenimiento se realizan en horario nocturno, sobre todo los que requieren cortes de tráfico. También es la encargada del proyecto y ejecución de la renovación de las infraestructuras e instalaciones. Tanto estas obras de renovación como las obras nuevas se realizan tratando de minimizar la afectación al tráfico.

Es muy importante la atención a incidencias para tratar de reducir atascos. La atención a incidencias en superficie se realiza en menos de 12 minutos y en el túnel en menos de 6 minutos.

THE COMPLEXITY OF OPERATING A LARGE-SCALE INFRASTRUCTURE

Each infrastructure has its own distinctive features that affect how it operates. Calle 30 has a 40-km network of tunnels that are Europe's largest urban tunnel network with very high levels of traffic (more than 400 million journeys per year). These tunnels were built on the banks of the Manzanares River and most of them are below the groundwater table. There are deep drains that feed 100 pumps distributed in 32 pumping wells that are currently pumping roughly 14,700 cubic metres of water on a daily basis. The Madrid Rio park was built above these tunnels, from where most of the tunnels' technical installation rooms can be accessed. Calle 30 circles Madrid's central districts and is the last barrier before entering into its Zero Emission Zone. Traffic volume on Calle 30 is very high, in particular during rush hours from Monday to Friday (non-Public Holidays). All these factors affect the operation of Calle 30.

Madrid Calle 30 is a joint venture that oversees the maintenance of Calle 30 under a contract by indicators. A significant part of the maintenance work is carried out at night, in particular work that requires traffic to be stopped. What's more, it oversees the design and execution of the renovation of infrastructure and facilities. Renovation work and new construction work alike are executed with a view to minimising the impact on traffic.

It is of the utmost importance to respond to incidents as a way to reduce traffic congestion. Responding to incidents on the road takes less than 12 minutes whereas in the tunnel it takes less than 6 minutes

LA COMPLEXITÉ DE L'EXPLOITATION D'UNE INFRASTRUCTURE À GRANDE ÉCHELLE

Chaque infrastructure possède ses propres particularités qui influencent son exploitation. Calle 30 se déploie sur un réseau de 40 km de tunnels, les plus grands tunnels urbains d'Europe, avec un volume de trafic très élevé (plus de 400 millions de trajets par an). Ces tunnels ont été construits sur les berges de la rivière Manzanares, et la majeure partie de leur tracé se trouve sous la nappe phréatique. Des drains profonds alimentent 100 pompes réparties entre 32 puits de pompage. À l'heure actuelle, elles pompent environ 14 700 mètres cubes d'eau par jour. Au-dessus de ces tunnels, on a construit le parc Madrid Rio, d'où l'on peut accéder à la plupart des salles d'installation technique des tunnels. Calle 30 forme une ceinture autour du cœur de la ville de Madrid, et constitue la dernière barrière d'entrée à Madrid sans restrictions au niveau des émissions. Le trafic de Calle 30 est très élevé, notamment aux heures de pointe, du lundi au vendredi (hors congés). Tous ces facteurs jouent un rôle déterminant dans l'exploitation de Calle 30.

Madrid Calle 30 est une société mixte qui gère la maintenance de Calle 30 par le biais d'un contrat par indicateurs. Une grande partie des travaux de maintenance est effectuée pendant la nuit, notamment les chantiers qui nécessitent des interruptions de la circulation. Calle 30 est également responsable du projet et de l'exécution du renouvellement des infrastructures et des installations. Les travaux de renouvellement et les nouveaux chantiers sont effectués en tentant de réduire leur impact sur le trafic.

La gestion des incidents occupe un rôle de premier plan dans la réduction des bouchons. La gestion des incidents en surface est effectuée en moins de 12 minutes, et dans le tunnel en moins de 6 minutes.

1. CALLE 30

La M-30 es el tercer cinturón de Madrid se inicio en los años 70 con dos tramos, el tramo este entre la A-1 y la A-4. Y el tramo oeste entre la A-4 y el puente de los Franceses convirtiendo la circunvalación en una especie de U. Fue a comienzos de los años 90, con Tierno Galván como alcalde, cuando se produjo el cierre norte que completaría el anillo conectando el arco oeste y la Avenida de la Ilustración.

Hasta el 2004 el mantenimiento y conservación de la M-30 era competencia del Ministerio de Fomento y fue en esta vía donde se implanto el primer contrato de conservación integral de carreteras en España en 1992.

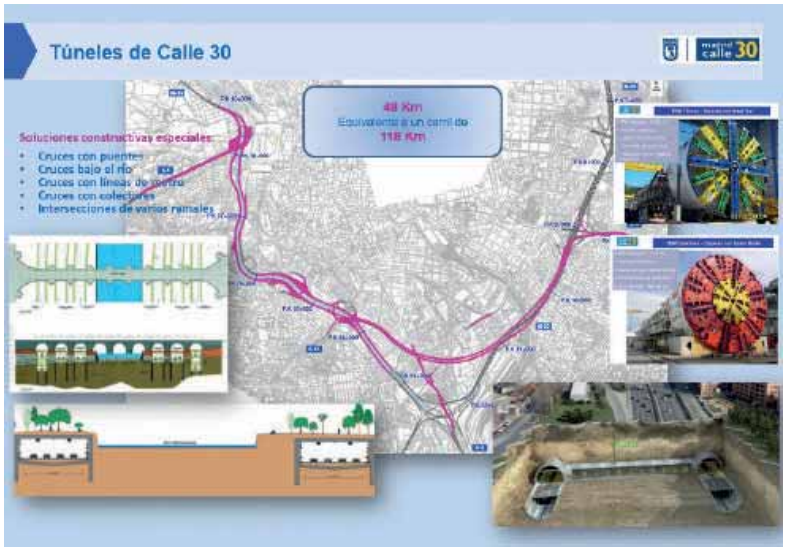
En el 2004 el Ministerio de Fomento y el Ayuntamiento llegan a un acuerdo en la transferencia de la titularidad de la vía al Ayuntamiento de Madrid y pasa a denominarse Calle 30.

Ese mismo año comienzan las obras de remodelación con 4 objetivos principalmente orientados a la sostenibilidad:

- Reducción de los niveles contaminantes, para lo cual los túneles han sido equipados con sistemas de filtrado, garantizando la purificación del aire extraído.
- Eliminación del efecto barrera en la zona del rio Manzanares. Transformando la zona en un gran parque de más de 120 hectáreas (Madrid Río), recuperando el río Manzanares para el disfrute de los vecinos de la ciudad
- Reducción de niveles de accidentalidad por las modificaciones de trazado.
- Mejora de la M-30 como vía distribuidora con la remodelación de los enlaces principales.

En cuanto a las actuaciones realizadas las podemos resumir en;

- Soterramiento del paso por la ribera del Manzanares entre Marqués de Monistrol y Puente de Praga. Este tramo se dividió en 4 lotes y fue ejecutado por el método de cut and cover.
- Soterramiento del Paseo Extremadura.
- Bypass entre Parque de Arganzuela y A-3. Dividido en dos lotes uno por sentido. Este tramo se ejecutó con dos tuneladoras. (Dulcinea y Tizona)
- Remodelación de los principales enlaces del arco Este (Avda. América, Nudo de la Paloma, Costa Rica, A-3, etc.)



Una vez finalizadas las obras del soterramiento se realizó el parque Madrid Rio que está situado en gran parte sobre los túneles aledaños a rio Manzanares. Este parque de 120 hectareas ha supuesto la conexión entre los barrios de la ribera del Manzanares. En el interior del parque están gran cantidad de salidas de emergencia del túnel, así como accesos a los cuartos técnicos.

Es habitual la celebración de eventos en Madrid Rio que deben ser informados por Madrid Calle 30 con respecto a las cargas soportadas sobre las losas del túnel y mantenimiento de los accesos al túnel.

Los túneles de la M 30 en Madrid discurren en su mayoría a ambos márgenes del río Manzanares por debajo del nivel freático. Se dispone de unos drenajes profundos mediante tuberías de diámetro 800 mm que alimentan a 100 bombas distribuidas en 32 pozos de bombeo. En la actualidad diariamente se están bombeando unos 14.700 metros cúbicos de agua que se vierten a los colectores de margen del Canal de Isabel II. Los caudales bombeados varían sensiblemente con la cota del nivel freático y, ésta, a su vez con el nivel de lámina del río, regulada con una serie de presas distribuidas a lo largo de Madrid Río.

Según el estudio realizado por el método MIVES para evaluar los niveles de sostenibilidad de la infraestructura el soterramiento de la M-30 ha aumentado los niveles de sostenibilidad de la infraestructura, con numerosos beneficios a nivel económico, medioambiental y social.

- Los beneficios económicos en cuanto a turismo, revalorización del suelo y culturales aumentaron con la construcción de Madrid Rio.
- En cuanto a los indicadores medioambientales tanto el ruido como las emisiones de gases disminuyeron tras el soterramiento. Se mejoró la fluidez del tráfico, se reduce el límite de velocidad y los propios materiales de construcción absorben CO2.
- Hay una recuperación del ecosistema del rio Manzanares.
- La accesibilidad mejoro con la construcción del soterramiento, tanto del tráfico rodado como peatonal. Tras las actuaciones llevadas por Calle30 hasta el 2007, se estima que para el usuario del viario de M-30 se ha producido un ahorro en los desplazamientos de un 27%, equivalentes a unas 17 horas anuales por persona y desplazamiento.
- En lo que se refiere a los indicadores sociales es destacable que el confort de la población de la zona es mucho mayor (zonas verdes, vías ciclistas, menor ruido, mayor calidad del aire).
- Ha disminuido la accidentalidad de la vía. La reducción de los índices medios de mortalidad anuales del periodo 2011-2021 respecto al periodo 1998-2002 es de un 75 %. Comparándolo con el primer periodo de explotación tras las actuaciones (2008-2010) el índice se reduce en un 41 %.

- En consonancia con lo anterior el número promedio anual de víctimas mortales en el periodo 1998-2004 fue de 8, en el periodo 2008-2010 fue de 5 y en el periodo 2011-2021 ha sido de 4.
- El ahorro de combustible por las actuaciones de la M-30 estimado es de 168 ton de combustible/día.
- Disminuyen la contaminación, el ruido y la incidencia de enfermedades respiratorias en la zona. 527 ton/día de CO2, 1805 kg/día de NOx y 86 kg/día de CH4 no emitidos a la atmósfera por las actuaciones en Calle 30.

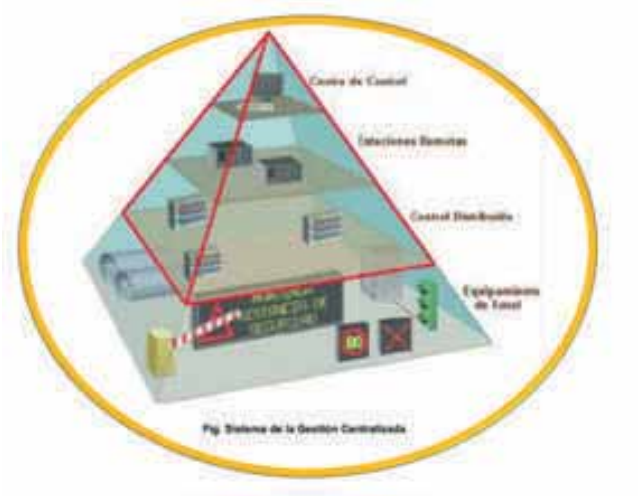
En el año 2005 se adjudica el concurso para la gestión del servicio público de reforma, conservación y explotación de la vía urbana M-30 mediante sociedad de economía mixta denominada MADRID CALLE 30 con el objeto de diferir los costes de construcción, transferir riesgos a la parte privada de la sociedad, incorporar al sector privado a la gestión de la infraestructura y tener mayor capacidad de financiación.

Madrid Calle 30 es una empresa de economía mixta, participada en un 80% por el Ayuntamiento de Madrid y en un 20% por Emesa, empresa que se ocupa del mantenimiento y conservación de la vía mediante estándares y la planificación y ejecución de las obras de renovación de las infraestructuras.

Emesa está participada en un 50 % por Ferrovial, en un 33% por Iridium y un 17% por Imesapi y es la empresa encargada del mantenimiento de la vía que recibe un canon que varía en función del cumplimiento de unos indicadores de servicio.

Calle 30 tiene el túnel urbano más largo de Europa, equivalente a un carril subterráneo de 118 kilómetros. Lo longitud total de la vía es equivalente a un carril de 500 km, con 100 estructuras en superficie y más de 2 millones de metros cuadrados de firmes.

El sistema de gestión centralizada de los túneles de Calle 30 abarca todos los sistemas críticos necesarios que permiten la comunicación, el procesamiento, la monitorización y el control y la gestión de todas las señales de los equipos que conforman las distintas instalaciones de los túneles. Está compuesto por cuatro niveles jerárquicos, cada uno de ellos con equipamiento independiente y específico de operación.



En el nivel 0 están las instalaciones del túnel: alumbrado, señales de mensaje variable, ventilación, cámaras de televisión, DAIs, barreras, semáforos, gálibos, hasta un total de 23 sistemas.

En el nivel 1 tenemos las unidades de control distribuido y en segundo nivel están las estaciones remotas universales.

En Calle 30 hay dos centros de control; el centro principal situado en Méndez Alvaro y el centro secundario o de respaldo que está en la calle Albarracín en las instalaciones de movilidad del Ayuntamiento de Madrid. En condiciones normales todo se gestiona y opera desde el centro de control de Méndez Alvaro. El de Albarracín permitiría manejar el túnel desde allí en caso de fallo del principal.

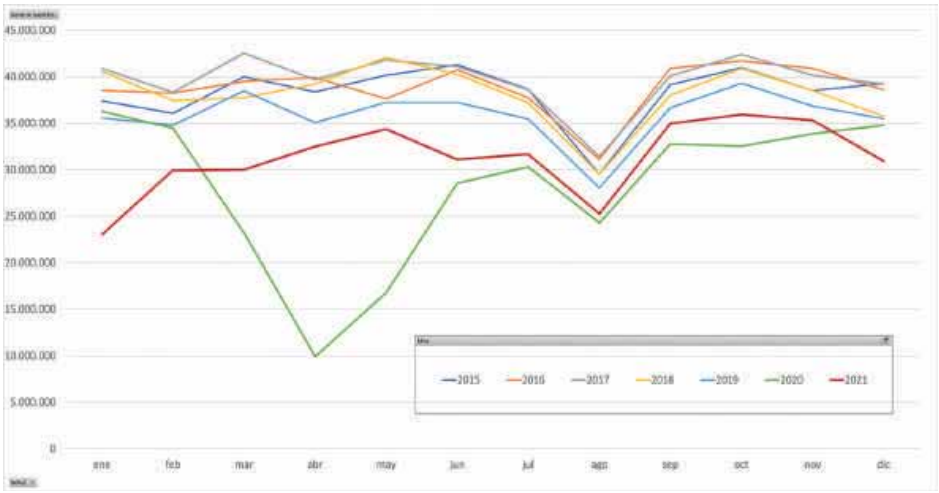
La integración de las señales en el sofware ITS permite la monitorización, supervisión y gestión centralizada de todos los sistemas de seguridad.

Desde el punto de vista de la explotación es determinante el elevado tráfico en todo su trazado. El arco Este es el de mayor IMD con 223.650 vehículos en 2021 en su zona central y disminuyendo hasta 114.875 vehículos en la zona de Manoteras. En el arco Oeste la zona con más tráfico esta entre la A-5 y la A-6.

El numero de trayectos de vehículos en Calle 30 supera los 400 millones anuales.

En esta grafica que compara mes a mes el número de trayectos en los últimos años, podemos ver la incidencia de la Covid 19 en el tráfico, con un descenso muy acusado en los meses de confinamiento y una recuperación parcial en los meses posteriores a junio.

El teletrabajo y la menor actividad económica sigue manteniendo el tráfico en niveles un 20% inferior a años precedentes.

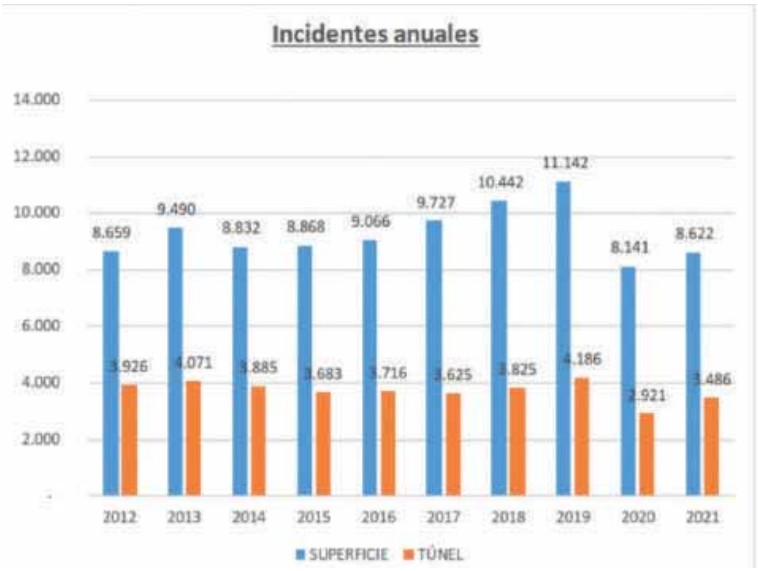


El tráfico en calle 30 es mayor en los días de la semana de lunes a jueves no festivos. En cuanto a la distribución a lo largo del día hay mayor tráfico a primera hora de la mañana en los trayectos sur norte y por la tarde de norte a sur.

2. ATENCIÓN INCIDENCIAS.

Dado el elevado tráfico existente en Calle 30 la atención a incidencias en un plazo corto es muy importante para minimizar las retenciones que están producen sobre todo en las horas punta.

En el 2021 se registraron un total de 3.537 incidencias en los túneles y 8.626 en el tramo de superficie, lo que supone un 29% de incidencias en túnel y un 71% en superficie. Durante los años 2020 y 2021 descendió la accidentalidad en gran parte debido al menor tráfico como consecuencia de la pandemia de la Covid 19.



Atendiendo a la gravedad de las incidencias ocurridas en túnel, el 82% corresponden a incidencias, el 13% a preemergencias y el 5% a emergencias, siendo las de mayor gravedad las que presentan menor número de incidencias.

Atendiendo a su naturaleza el 54% correspondió a vehículos parados en calzada y/o arcén, 22% a averías en equipos que tienen sistema redundante operativo por lo que la explotación no se ve afectada, y un 6% corresponde a accidentes leves.

Durante el 2021 se registran 2 accidentes con víctimas mortales, en ambos accidentes estuvo implicado un motorista.

Para la atención rápida a las incidencias es muy importante la coordinación con los servicios de emergencia. Es especialmente importante esta coordinación con los bomberos dada la complejidad y tamaño de los túneles de Calle 30. Se organizan visitas periódicas a los túneles por parte de los bomberos. También se ha habilitado una aplicación en Telegram para dar información a los bomberos de las rutas más rápidas de llegada al lugar de incendio o accidente grave.

2.1. Atención incidencias en superficie

Para el cumplimiento del indicador 2.1 % de incidencias emergencias y accidentes atendidas en plazo es necesario llegar al punto del incidente en un tiempo menor de 12 minutos en superficie.

Los equipos de actuación en superficie están compuestos por 24 miembros, organizados en turnos de 24 horas. Está organizado a través de un coordinador de los servicios de vigilancia y atención a incidencias en superficie y 23 operarios en turno rotativos.

Para una eficacia y control de los equipos se distribuyen de manera que se pueda dar la mejor respuesta antes eventualidades, dividiendo Calle 30 exterior en dos sectores.

- Sector 1, que recorre el arco este, nudo sur y nudo norte, junto con las conexiones a carreteras nacionales adscritas al contrato de Madrid Calle 30.
- Sector 2, que recorre el arco oeste y la zona norte, junto con las conexiones a carreteras nacionales adscritas al contrato de Madrid Calle 30.

Cada miembro del equipo dispone de un vehículo durante el turno, que le permite vigilar, señalizar y alertar a los usuarios de la vía, así como realizar las tareas de limpieza de la vía una vez retirados los vehículos accidentados. En función del horario, además del equipo de vigilancia en furgón se dispone de una unidad de moto, que permite ser ágil en condiciones de congestión de tráfico. Los vehículos de vigilancia en moto solo disponen de medios de una primera señalización hasta la llegada de los furgones de vigilancia y atención a incidencias. Estos furgones tienen medios para contención de vertidos, limpieza de la vía tanto de manera manual como en alta presión, un generador y un equipo de bombeo auxiliar para el control de pequeñas balsas de agua que se puedan producir.

Los tiempos medios de resolución de incidencias en superficie de Calle 30 en los ultimos años son las siguientes:

2.2. Atención a incidencias en túneles.

Para la atención a incidencias en los túneles se dispone de cuatro bases de intervención; dos que están en las bocas de los túneles, una en la Avenida de Portugal y otra en la entrada de la A-3. La tercera base se construyó en los aledaños del estadio Vicente Calderón y se utiliza como cuarta base el Centro de Conservación de Méndez Álvaro. En estas bases se reparten los 16 agentes de intervención por turno. Cada una de las bases está dotada de un furgón, un camión de bomberos y un camión grúa para atención a incidencias y retirada de vehículos del túnel.

La distribución actual de las bases de intervención y su ámbito de túnel es la siguiente:

El ámbito geográfico de intervención no es uniforme ya que desde la base de Calderón se atiende el 41.33 % de superficie, desde la base de Valencia el 28.26 % de superficie, desde la base de la Avda. de Portugal el 23.47 % de superficie y desde la base de Méndez Álvaro el 6.94 % de superficie.

Si analizamos la localización de las 25.000 incidencias ocurridas en el túnel de Calle 30 correspondiente al periodo 2011-2021, podemos ver las zonas con mayor concentración de incidencias son atendidas desde la base del Calderón (57,61%) y de la avda de Portugal (24,65%)

Para el cumplimiento del indicador 2.1 % de incidencias emergencias y accidentes atendidas en plazo es necesario llegar al punto del incidente en un tiempo menor de 6 minutos en túneles.

Los tiempos medios de resolución de incidencias en los túneles de Calle 30 en los ultimos años son las siguientes:

3. TRABAJOS DE MANTENIMIENTO

El Contrato de Madrid Calle 30 está vinculado a 440 indicadores de calidad y disponibilidad del servicio distribuidos en 18 capítulos. Los 18 capítulos en los que se agrupan estos indicadores abarcan todas las actuaciones y elementos a conservar. Cada capítulo se desglosa en indicadores que miden la calidad del servicio. Todos estos indicadores se auditan semestralmente para determinar la deducción económica de la contraprestación que recibe Madrid Calle 30.

El Manual de explotación es el documento en el cual se detalla la organización de la explotación. En este manual se describe la infraestructura, se detalla la organización de la explotación. También se incluye el plan de autoprotección y los planes de mantenimiento. Los trabajos de mantenimiento se estructuran en el plan de mantenimiento en el que están definidos todos los trabajos de mantenimiento con sus periodicidades. El plan de mantenimiento se desglosa en:

- Plan de mantenimiento de estructuras exteriores. En Calle 30 existen mas 100 estructuras en superficie de diferentes tipologías y épocas. También se incluyen en este capítulo porticos (492), banderolas (270) y muros (122), En el plan de mantenimiento se detallan las inspecciones a realizar y los trabajos de mantenimiento.
    - o Inspecciones rutinarias, cada 3 meses
    - o Inspecciones principales generales, cada 15 meses
    - o Inspecciones principales detalladas, cada 5 años
    - o Inspecciones especiales, según necesidad

Para evaluar el estado de las estructuras y diseñar la estrategia de mantenimiento se utilizan índices de gravedad de la estructura.

- Plan de mantenimiento de estructuras del tunel, en el que se incluyen tanto las inspecciones como los trabajos de mantenimiento. En este apartado es de destacar la influencia de las filtraciones que producen un deteioro acelerado del hormigón debido a la humedad y el efecto de los gases de combustión contaminantes. Para la inspección de los paramentos del tunel se utilizan técnologías avanzadas como el Laser Scan.
- Plan de mantenimiento de instalaciones. En el se detallan las gamas de mantenimiento a realizar en las instalaciones de Calle 30 y en especial en las instalaciones del tunel.
- Plan de mantenimiento de obra civil y equipamiento. En este apartado es importante destacar el mantenimiento de firmes, para lo cual se realizan inspecciones periodicas para evaluar el CRT y el IRI, parametros que deben mantener determinados umbrales en todo momento. Estas auscultaciones sirven para planificar las campañas de renovación de firmes.

En Calle 30 gran parte de los trabajos de mantenimiento se realizan en horario nocturno, sobre todo los que requieren cortes de tráfico. En 2021 se realizaron 6.223 cortes de tráfico de los cuales 2.535 fueron cierres de tramos, 3.012 con ocupaciones parciales de calzada y 676 con afección solamente al arcén.

4. OBRAS DE RENOVACIÓN

Madrid Calle 30 es la encargada de la renovación de la infraestructura cuando los elementos agotan su vida útil. Para este objetivo se realizan y ejecutan proyectos de renovación de estructuras y otros elementos como instalaciones de los túneles y de alumbrado tanto en el interior del túnel como en el exterior.

Todas las obras de renovación se realizan con horario nocturno para minimizar las molestias a los usuarios de la vía. Todos los procedimientos constructivos están encaminados a la minimización de la ocupación de la vía tratando de ejecutarla con el mínimo número de cortes de tráfico posible.

Otro proyecto destacado actualmente en ejecución es la renovación del Centro de Control. El número de señales a integrar en este proyecto es de 111.000 considerando las entradas digitales y analógicas y las salidas digitales. Hay que destacar que se trata de un proyecto muy complejo de ejecutar ya que se debe garantizar la continuidad del servicio en todo momento. Por ello las tareas para la migración del sistema actual al futuro se deberán realizar en varias fases, de forma que se minimicen los riesgos y se reduzcan al máximo los cortes de túnel.

5. OBRAS NUEVAS

Las obras de la zona Mahou-Calderón suponen la finalización del proyecto Madrid Rio. Tras la demolición del estadio Vicente Calderón el verano de 2020, comenzaron los trabajos de cubrición de la M-30 a esa altura, que finalizarán en la primavera de 2023. Se trata del soterramiento de más de 600 metros de longitud que quedaban pendientes. Este proyecto ejecutado por el Área de obras del Ayuntamiento de Madrid se integrará en la gestión de Madrid Calle 30 una vez finalizado. Para la ejecución de esta obra ha sido necesario ejecutar un desvío provisional de cuatro carriles que ha funcionado tanto para la demolición del Calderón como para la ejecución del soterramiento. La fase final de esta obra de cierre del nuevo túnel implicará actuaciones de gran afectación al tráfico.

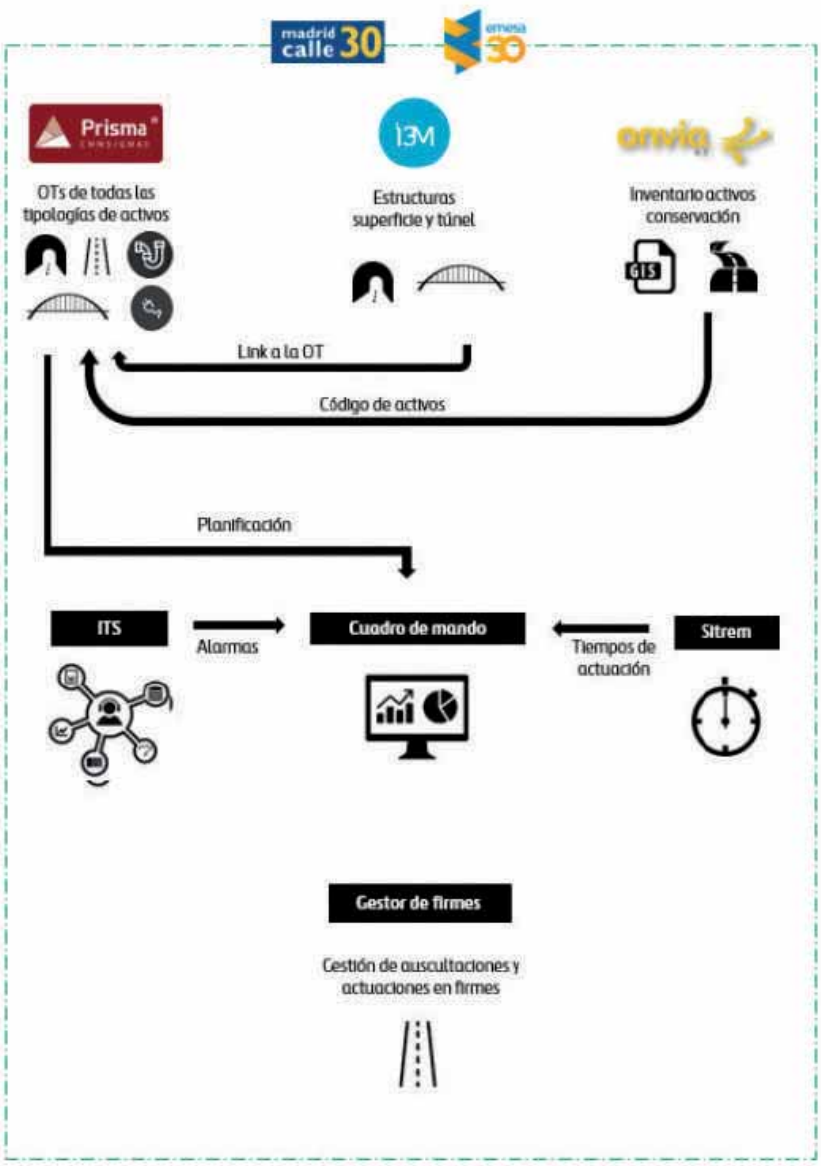
Otra obra que se encuentra en ejecución es la remodelación del Nudo Norte. Esta obra ejecutada por el Área de Movilidad el Ayuntamiento de Madrid está teniendo una gran afección al tráfico en todo el arco norte de Calle 30. En esta zona donde confluyen Calle 30, Paseo de la Castellana, M-607, M-11 y A-1 hay una alta intensidad de tráfico con más de 270.000 vehiculos/día con mas de 34.000 vehiculos en hora punta.

El Ayuntamiento de Madrid está realizando el proyecto de soterramiento de 3,4 km de túnel como continuación del soterramiento de la avenida de Portugal, lo cual supondrá una continuación de Madrid Rio. Esta obra tendrá una afección muy importante a Calle 30 sobre todo del tráfico proveniente de la zona sur y que accede a Madrid por la A-5.

6. GESTIÓN DE LA EXPLOTACIÓN

Para la gestión de Calle 30 se utilizan diferentes aplicaciones que interactúan entre ellas para una gestión más eficiente de la infraestructura y su explotación:

- Gestor de estructuras de superficie y del túnel en el que se incluyen la información técnica da las estructuras (puentes, pasarelas, muros, pórticos, pantallas y banderolas), las inspecciones y las actuaciones realizadas. El gestor de estructuras del túnel que permite visualizar la nube de puntos que representan los túneles.
- Gestor de firmes en que se incluye el inventario de firmes, auscultaciones y actuaciones de rehabilitación y mantenimiento.
- GIS. Gestor de inventario y vida util de los activos.
- ITS del centro de control de los túneles.
    - SCADA. Sistema que gestiona las instalaciones del tunel
    - SITREM. Gestor de incidencias, registro de tiempos de atención a incidencias.
    - SETTRE. Sistema de evaluación del tráfico en tiempo real.
    - DAI. Detección automático de incidencias.
    - C-ROADS. Proyecto piloto de implementación de servicios C-ITS.
    - Gestión de flotas para los vehiculos de conservación.
- GMAO. Programa de mantenimiento en el cual se programan y se registran todas las operaciones de mantenimiento tanto correctivos como preventivos.
- Cuadro de mando, que contiene la información sobre alarmas, eventos, accesos, permisos, cortes, informes, planificación, historico de incidencias, indicadores, etc.


madrid calle 30
emesa 30
Prisma
OTs de todas las tipologías de activos
Estructuras superficie y túnel
Inventario activos conservación
GIS
Link a la OT
Código de activos
Planificación
ITS
Alarmas
Cuadro de mando
Tiempos de actuación
Sitrem
Gestor de firmes
Gestión de auscultaciones y actuaciones en firmes

DISEÑO DE TÚNELES URBANOS

Andreu Estany Serra
ESTEYCO

Las grandes ciudades evolucionan y cada vez más la demanda de espacio público en superficie destinado a la movilidad sostenible y la necesidad de optimización de los indicadores medioambientales conducen a propuestas de segregación del transporte motorizado mediante infraestructuras subterráneas en los sectores urbanos más densificados.

Ruidos, contaminación, impacto visual negativo, seguridad etc, son algunos de los factores que los ciudadanos aducen como especialmente negativos para la habitabilidad de las grandes ciudades, enfrentados en la actualidad a valores positivos como la necesidad de movilidad peatonal, ciclista o de baja velocidad en entornos pacificados, la renaturalización de los espacios comunes, el uso del espacio público como ámbitos de extensión las actividades diarias privadas, etc.

En este contexto surgen propuestas y proyectos de reducción de los niveles de intensidad de tráfico en las zonas mas congestionadas de la ciudad mediante la reducción de la capacidad de las vías en superficie, reducción de carriles destinados al uso de tráfico privado o el soterramiento de tramos de vías urbanas para la recuperación de espacio publico resultante para los usos ciudadanos y la creación de zonas verdes.

Estos túneles urbanos insertados en entornos ya congestionados exigen actualmente el estudio, no solo de los condicionantes funcionales y de seguridad necesarios, sino también la creación de entornos de paso agradables perceptibles a baja velocidad y con condicionantes estéticos que permitan ser percibidos como espacios de movilidad de calidad.

La evolución de los medios de transporte hacia la sostenibilidad y la reducción del parque móvil motorizado exige también la posibilidad de evolución de estos túneles urbanos a otros modos de movilidad de baja velocidad, (carriles bicis, vehículos unipersonales eléctricos , etc).

URBAN TUNNEL DESIGN

Large cities are evolving and, increasingly, the demand for surface public space for sustainable mobility and the need to optimize environmental indicators are leading to proposals for the segregation of motorized transport by means of underground infrastructures in the most densely populated urban sectors.

Noise, pollution, negative visual impact, safety, etc., are some of the factors that the citizens claim to be particularly negative for the habitability of large cities, in contrast to positive values such as the need for pedestrian, cycling or low-speed mobility in peaceful environments, the naturalization of common spaces, the use of public space as an extension of private daily activities, etc.

In this context, proposals and projects arise to reduce traffic intensity levels in the most congested areas of the city by reducing the capacity of surface roads, reducing the number of lanes for private traffic, or burying sections of urban roads to recover the resulting public space for public use and the creation of green areas.

These urban tunnels inserted in already congested environments now require a study not only of the necessary functional and safety constraints, but also the creation of pleasant transit environments that are perceptible at low speeds and with aesthetic constraints that allow them to be perceived as quality mobility spaces.

The evolution of means of transport towards sustainability and the reduction of the motorized vehicle fleet also requires the possibility of developing these urban tunnels to other low-speed modes of mobility.

CONCEPTION DE TUNNELS URBAINS

Les grandes villes évoluent et, de plus en plus, la demande d'espace public de surface pour une mobilité durable et la nécessité d'optimiser les indicateurs environnementaux conduisent à des propositions de ségrégation du transport motorisé au moyen d'infrastructures souterraines dans les secteurs urbains les plus densément peuplés.

Le bruit, la pollution, l'impact visuel négatif, la sécurité, etc. sont quelques-uns des facteurs que les citoyens considèrent comme particulièrement négatifs pour l'habitabilité des grandes villes, par opposition à des valeurs positives telles que la nécessité d'une mobilité piétonne, cycliste ou à faible vitesse dans des environnements paisibles, la renaturalisation des espaces communs, l'utilisation de l'espace public comme une extension des activités quotidiennes privées, etc.

Dans ce contexte, des propositions et des projets voient le jour pour réduire les niveaux d'intensité du trafic dans les zones les plus encombrées de la ville en réduisant la capacité des routes de surface, en réduisant le nombre de voies pour le trafic privé ou en enterrant des sections de routes urbaines afin de récupérer l'espace public ainsi créé pour un usage public et la création d'espaces verts.

Ces tunnels urbains insérés dans des environnements déjà congestionnés nécessitent désormais une étude non seulement des contraintes fonctionnelles et de sécurité nécessaires, mais aussi la création d'environnements de transit agréables, perceptibles à faible vitesse et avec des contraintes esthétiques permettant de les percevoir comme des espaces de mobilité de qualité.

L'évolution des moyens de transport vers la durabilité et la réduction du parc de véhicules motorisés nécessite également la possibilité de développer ces tunnels urbains vers d'autres modes de mobilité à faible vitesse.

Se propone un análisis de los distintos aspectos que inciden en el diseño de túneles urbanos a partir de las experiencias recientes en la construcción de este tipo de infraestructuras de distintas características y requerimientos funcionales.

El túnel urbano de Leuven en Bélgica para la reorganización de la plaza de la Estación Martelarenplein, en colaboración con el arquitecto Manuel de Solà-Morales, es un ejemplo de cómo integrar las necesidades funcionales de accesibilidad a las estaciones ferroviaria y de autobuses, la accesibilidad a un gran aparcamiento subterráneo y los recorridos peatonales en superficie y a través del propio aparcamiento hacia la estación.

El túnel urbano es el nexo central de esta integración infraestructural y se adapta a los requerimientos de estos equipamientos a los que sirve, incluso con transformaciones poco habituales o "normativas" en este tipo de infraestructuras. Accesos directos túnel-aparcamiento, integración de espacios compartidos, accesos peatonales y salidas de emergencia etc.

Es sin duda un caso atípico por sus condiciones especialmente urbanas y su finalidad última que era la de evitar el tráfico pasante en la transformación de la plaza de la Estación a espacio peatonal.

La intervención se fundamenta en el soterramiento del tránsito de vehículos para potenciar el carácter peatonal de la plaza actual. La presencia de las estaciones de tren y autobuses, complementadas por el aparcamiento subterráneo de la propuesta, convierten a la nueva plaza en un intercambiador modal capaz de asumir la futura presencia de la estación lanzadera del tren de alta velocidad.

Debido a la proximidad de las edificaciones circundantes, el programa de trabajos se planteó mediante la ejecución de muros pantalla previos a la excavación de la planta del aparcamiento y viales subterráneos. La tipología básica de la estructura queda definida mediante una retícula de 10.20 x 8 m de pilares de hormigón armado que soportan sendas losas postensadas que conforman los forjados del nivel -1 y de la base de la posterior urbanización de la plaza.

Cabe destacar la original solución de la rampa peatonal que comunica el nivel de la plaza con el túnel de acceso a los andenes superficiales, resuelta mediante una sección tipo cajón colgada de los diferentes forjados. Igualmente, reseñable es el tren de cargas para el que se calculó esta estructura, pues está previsto el paso de la artillería pesada del ejército belga.

Las soluciones constructivas y materiales de los elementos de delimitación de carriles son los que se derivaban de la urbanización exterior: barreras de contención de granito, pavimentos de hormigón en los ramales de acceso al aparcamiento, iluminación complementaria a la del aparcamiento, etc.

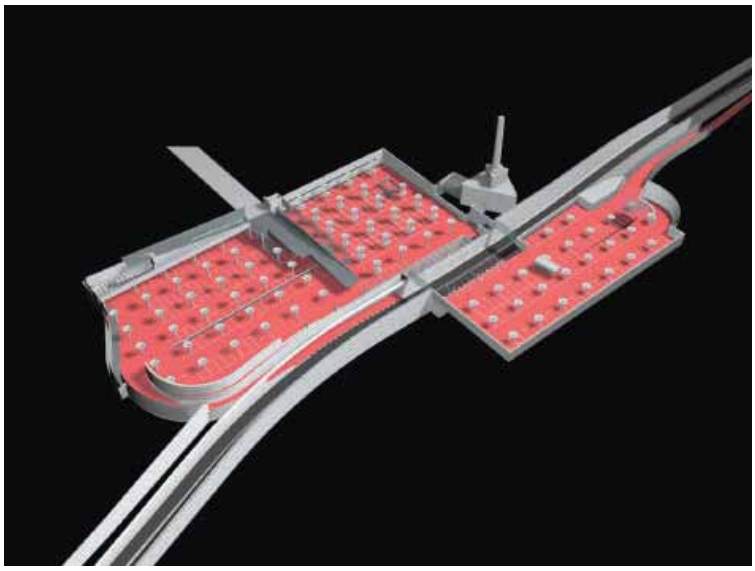


Fig 1. Leuven Plaza de la Estación. Integración túnel-aparcamiento.

Fig 2-3. Leuven Plaza de la Estación. Paso del túnel a través del aparcamiento.

Fig 4-5. Leuven Plaza de la Estación. Paso del túnel a través del aparcamiento y rampas de salida.

La sección transversal típica de este túnel urbano , de 9,5 m de ancho y de altura variable, con un ancho mínimo de 4,90 m, constaba dos carriles, uno para cada dirección de tráfico, separados por una barrera de separación del tipo "New Jersey". Lateralmente, se disponian otras dos barreras rígidas de la misma tipología para proteger la zona de paso de las tuberías.

Los pavimentos se completaron mediante pavimento asfáltico, y el techo se acabó con pintura negra ignífuga. Las barreras rígidas de pequeña altura de 50 cm, tipo "new jersey" se construyeron con piezas de piedra Bluestone categoría C, en doble cara para la mediana y una cara simple protección de los laterales; las uniones entre las piezas fueron tratadas con un mortero del mismo tono que la piedra. Esta piedra Bluestone es la misma que se utilizó para la pavimentación de la plaza sobre el túnel y en la mayoría de elementos de mobiliario urbano que la conforman: bordillos , losas de piedra , limites y bolardos , gradas y escaleras, etc , conformando una continuidad de materiales entre el exterior y el interior del túnel y el aparcamiento.

Las zonas de paso de prismas de servicios se dispusieron a ambos lados del túnel, y protegidas por barreras rígidas y revestidas, en la parte superior, con piezas prefabricadas de hormigón de 0,40 m x 0,40 m y 3 cm de espesor y un acabado superficial veteado. L

Las placas se colocaron de manera que las estrías fueran paralelas al eje de la vía sobre una base de mortero, y las juntas también se rellenarán con el mismo mortero.

En el revestimiento de los muros podemos señalar la diferencia entre dos tipos de revestimientos verticales:

1. En las rampas de entrada y salida del túnel mas la longitud de la sección de la rampa, más los primeros metros de longitud del túnel: el tratamiento de esta zona consistió en un zócalo inferior en hormigón gris y acabado abujardado, y un revestimiento de aislamiento acústico en panel metálico perforado color metálico hasta el techo. Los paneles, de 3 m x 1,20 m y 3 m x 0,6 m y 75 mm de espesor, se colocaron en franjas horizontales de 1,20 m de altura y la disposición fue alineándolas formando franjas continuas en la que destacaba la continuidad de estas respecto a las juntas verticales entre paneles qu se colocaron atresbolilladas y de una dimensión mucho mas pequeña que las horizontales. Las uniones horizontales entre los paneles de unos 5 cm de espesor estaban coronadas a lo largo de toda su longitud por un perfil metálico de sección omega para protección de las juntas de los paneles, , colocando las alas hacia el exterior.

2. En la sección central se definió un zócalo inferior de hormigón idéntico al descrito anteriormente, así como un revestimiento hasta el techo de paneles de color azul metálico de tipo "glasal". Los paneles, de 3 m x 1,2 m x 7,5 mm, también se colocaron en franjas horizontales de 1,20 m de altura.

La combinación de muros y paramentos fonoabsorbentes intercalándose en todo el recorrido del túnel atenuaba el ruido del tráfico pasante, haciéndose más hincapié en laos ramales de salida del mismo que conectaban con el aparcamiento.

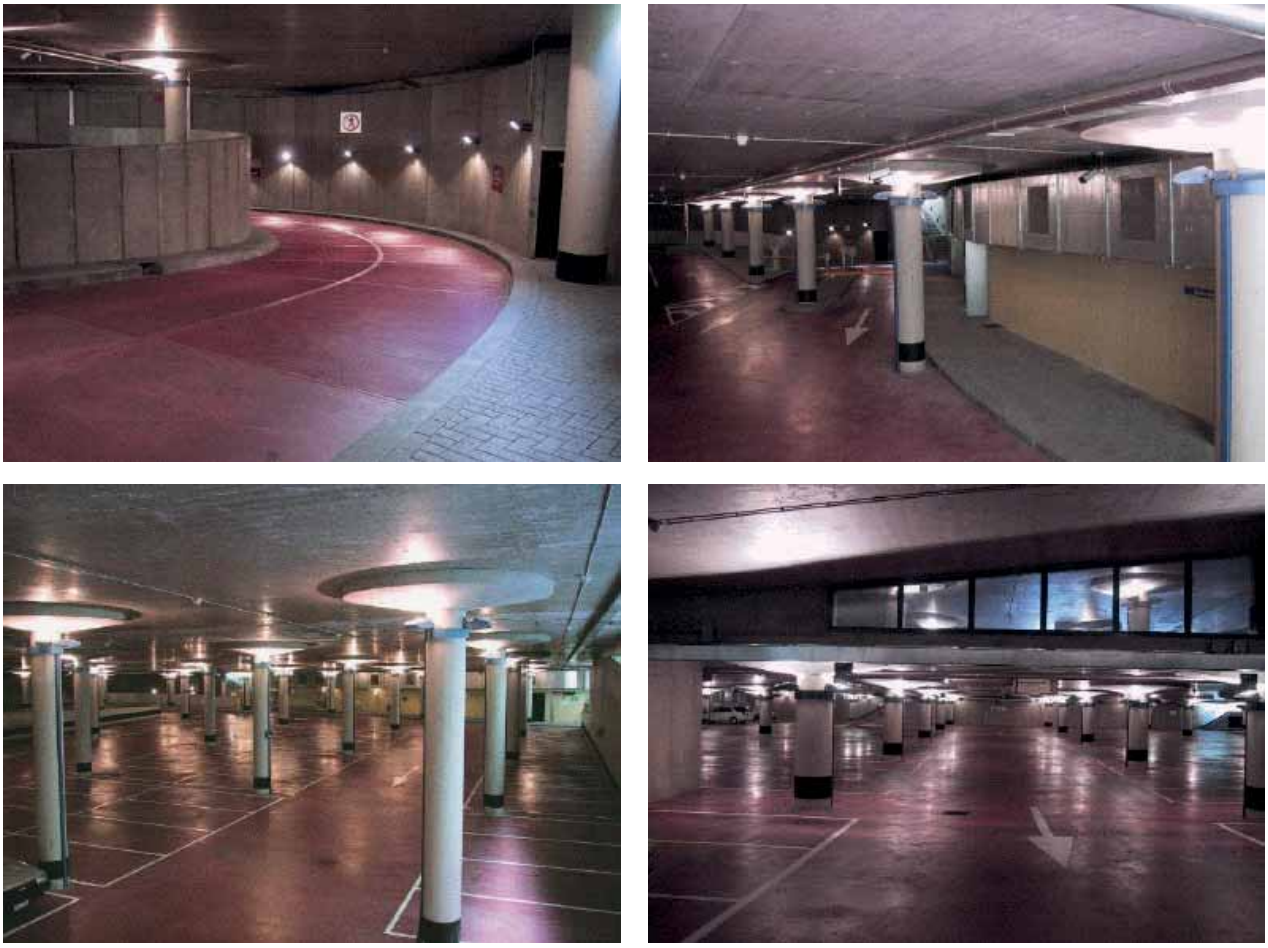


Fig 6-10. Leuven Plaza de la Estación. Diversas vistas del aparcamiento interior y rampas de acceso.

En el caso del túnel bajo la futura reurbanización de la Plaça de les Glòries en Barcelona, uno de los condicionantes principales ya desde el planteamiento inicial fue el diseño interior y los acabados del propio túnel.

La condición principal era adaptar todos los elementos de protección del túnel, revestimientos, iluminación, salidas de emergencia y en definitiva el aspecto interior que percibe el futuro usuario, a una imagen atractiva y visualmente agradable para además posibilitar la flexibilidad futura del propio paso en cuanto a los futuros modos de transporte colectivo e individual.

Especial incidencia en el diseño final respecto a la sostenibilidad energética, consumo minimizado de los sistemas de iluminación y ventilación, facilidad de mantenimiento y explotación futura.

Como en le caso de Leuven también se ha pretendido que en las situaciones donde fuera viable establecer una unidad entre los materiales del interior y del exterior del túnel en continuidad con las soluciones de urbanización normativizadas de la ciudad de Barcelona. Así todos los elementos de limites: bordillos, pavimentación etc, están configurados con piezas de granito y pavimentación de losetas de cemento de panot de 20x20 cm, la pavimentación más característica del espacio público de la ciudad. Los muros interiores de zócalo de todo el túnel mantienen la continuidad con la altura exterior de los mismos y con el mismo material de hormigón protegido contra pintadas y vandalización.

Los elementos industrializados de acabado del interior del túnel han debido de adaptarse a las múltiples normativas de túneles, en cuanto a acabados, materiales, colores etc en función además de obtener la máxima eficiencia en mantenimiento y sostenibilidad energética. Sobre el murete de hormigón de instalaron paneles de acero vitrificado de color claro y brillante para maximizar la reflexión de las líneas de iluminación Led que se instalaron en continuidad como una cornisa de acabado de los paneles de acero.

La imagen del conjunto de elementos de revestimiento debía ser compacta y "limpia" y poder incluir en esta configuración todas las instalaciones, los elementos funcionales y las canalizaciones necesarias tanto las soterradas como las que se distribuían en los muros laterales y los techos del túnel. También las puertas de acceso a cuartos de instalaciones, a cuartos de mantenimiento o las puertas correderas de comunicación de emergencia entre ambos túneles debían ser integradas en el sistema de acabados conformado `por el murete bajo de hormigón y la parte superior de paneles verticales de acero vitrificado.

Dada la rasante inclinada del túnel con rampas de hasta el 7 %, el diseño y distribución d ellos paneles verticales de hasta 3 m de altura debieron de ser replanteados en detalle para minimizar las piezas especiales y los cortes de piezas metálicas que sin duda podrían afectar a la durabilidad futura de las mismas.

Fig 11. Imagen renderizada de la propuesta inicial del túnel con paneles horizontales.

Cabe destacar que la propuesta de revestimiento interior inicial se planteo con paneles de acero horizontales para optimizar la sensación de continuidad y la direccionalidad del túnel. Las franjas horizontales de las juntas de los paneles paralelas a la rasante de la calzada creaban esta sensación de claridad y continuidad pretendida, pero con el uso de materiales industrializados homologados. Por directrices de los servicios técnicos del departamento de Túneles de la ciudad , se optó por una solución final "estándar" de paneles verticales por un tema de mantenimiento y limpieza de las juntas horizontales.

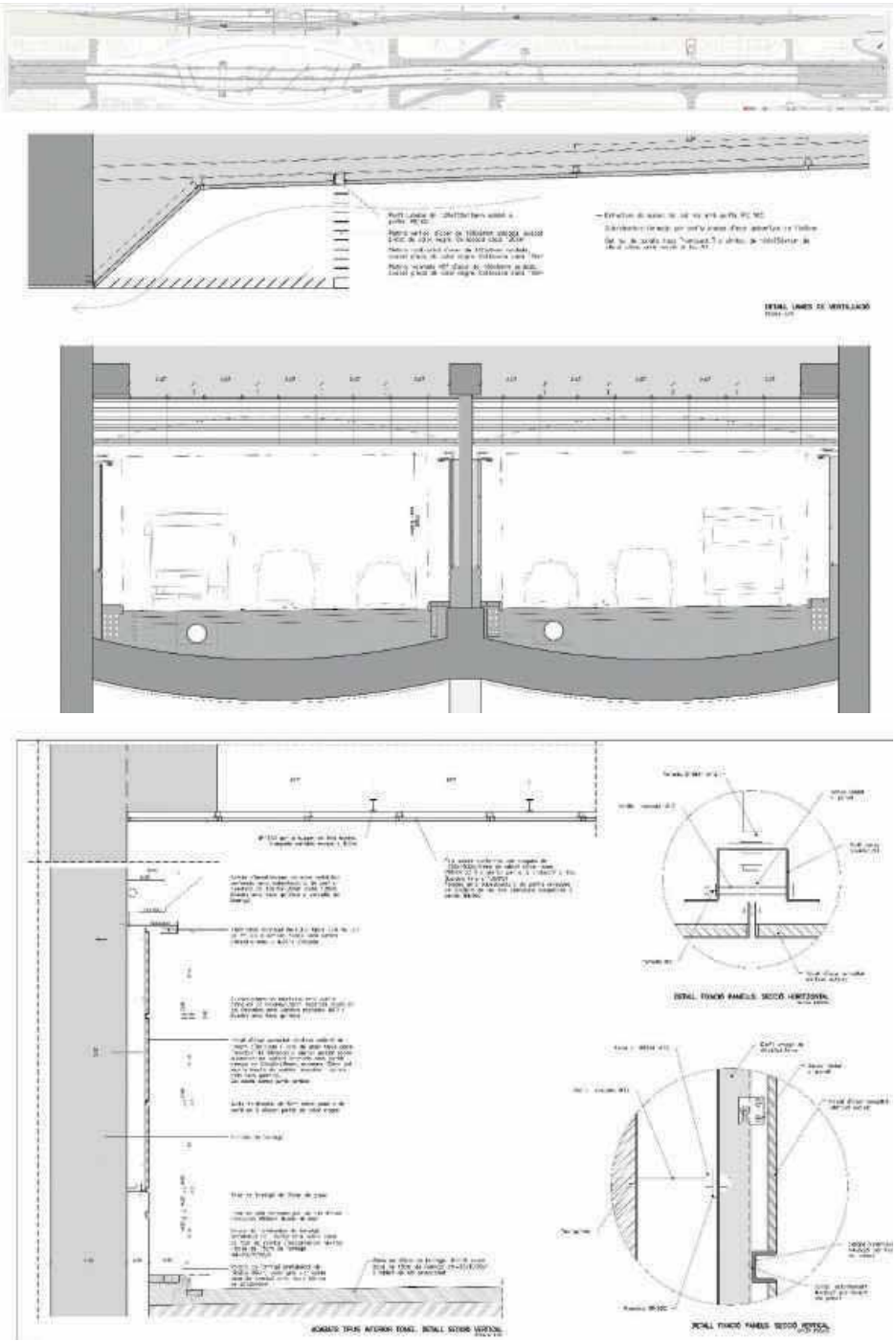


Fig 12. Sección de la propuesta inicial del túnel con paneles de acero horizontales.

Dentro de los elementos de acabado interior del túnel se hizo especial hincapié en el diseño y tratamiento y de las salidas de emergencia y en los puntos de postes SOS y Emergencias. Estos son elementos característicos en todos los túneles y que habitualmente se tratan como elementos independientes en el proyecto y la construcción de este.

Son puntos muy importantes en caso de emergencia para evacuación y localización de los puntos de comunicaciones de seguridad, pero al mismo tiempo son elementos que pueden singularizar la imagen del propio túnel cuando se diseñan conjuntamente.

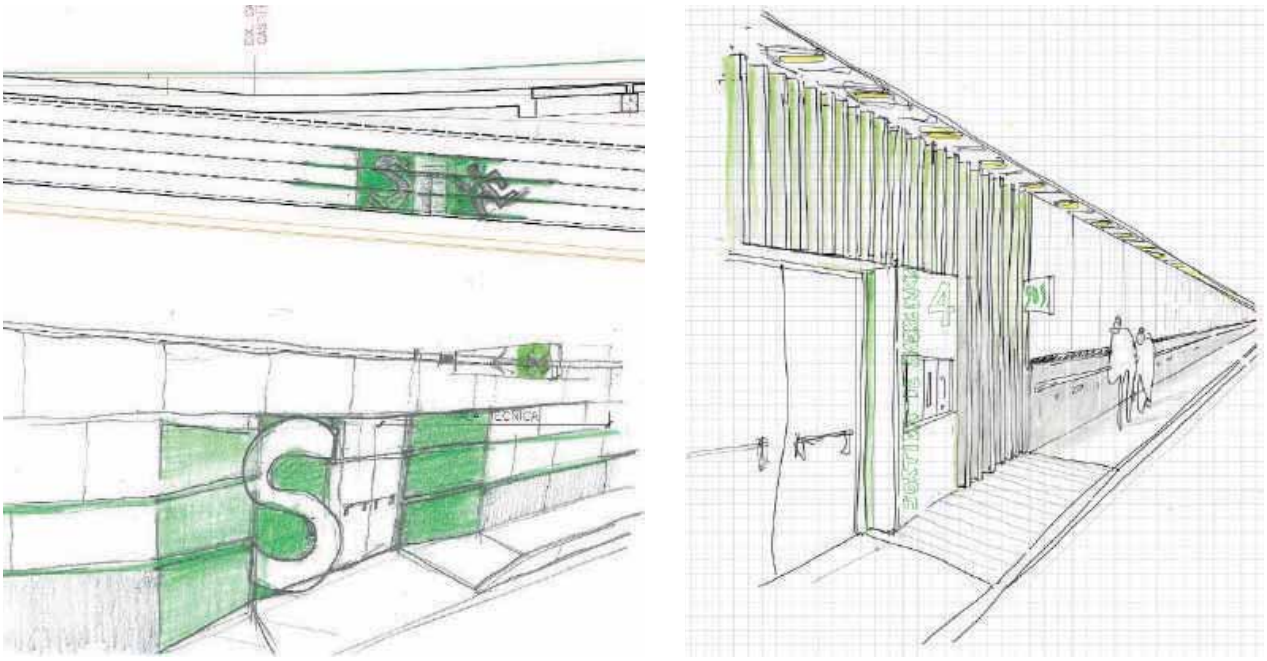


Fig 13. Propuestas iniciales para el tratamiento de las salidas de emergencia.

Se estudiaron distintas soluciones ara singularizar las salidas de emergencia basadas en la interrupción del revestimiento en un tramo de bastante dimensión, entre 11 y 20 m, para poder encajar una discontinuidad en la que implementar una imagen grafica atractiva y clara con ayuda, además, de una iluminación ligeramente modificada en intensidad y color.

El conjunto de la salida se revistió de aplacado acabado pintado en verde con los pictogramas de "salida" en la dimensión de toda altura del revestimiento lateral. Una pequeña inflexión hacia el interior de este conjunto optimiza la indicación de este espacio de salida.

Todos los elementos de señalización se encuentran integrados y la línea de vida se interrumpe al llegar a esta discontinuidad para indicar que se ha llegado al punto de salida.

La distinta señalización de emergencia, poste SOS y señalización de distancias a salidas y puntos kilométricos se realizó con el mismo diseño gráfico y ajustándose a las dimensiones estándar de los paneles de acero vitrificado verticales.

También se estudio con especial detalle las transiciones entre los revestimientos interiores del túnel y las bocas y rampas de salida a la ciudad. La voluntad que las bocas formaran parte tanto del propio túnel como de la imagen urbana y materialidad de la ciudad llevo al diseño e integración de todos los elementos necesarios en revestimientos de hormigón o de piezas prefabricadas de hormigón de altas prestaciones.

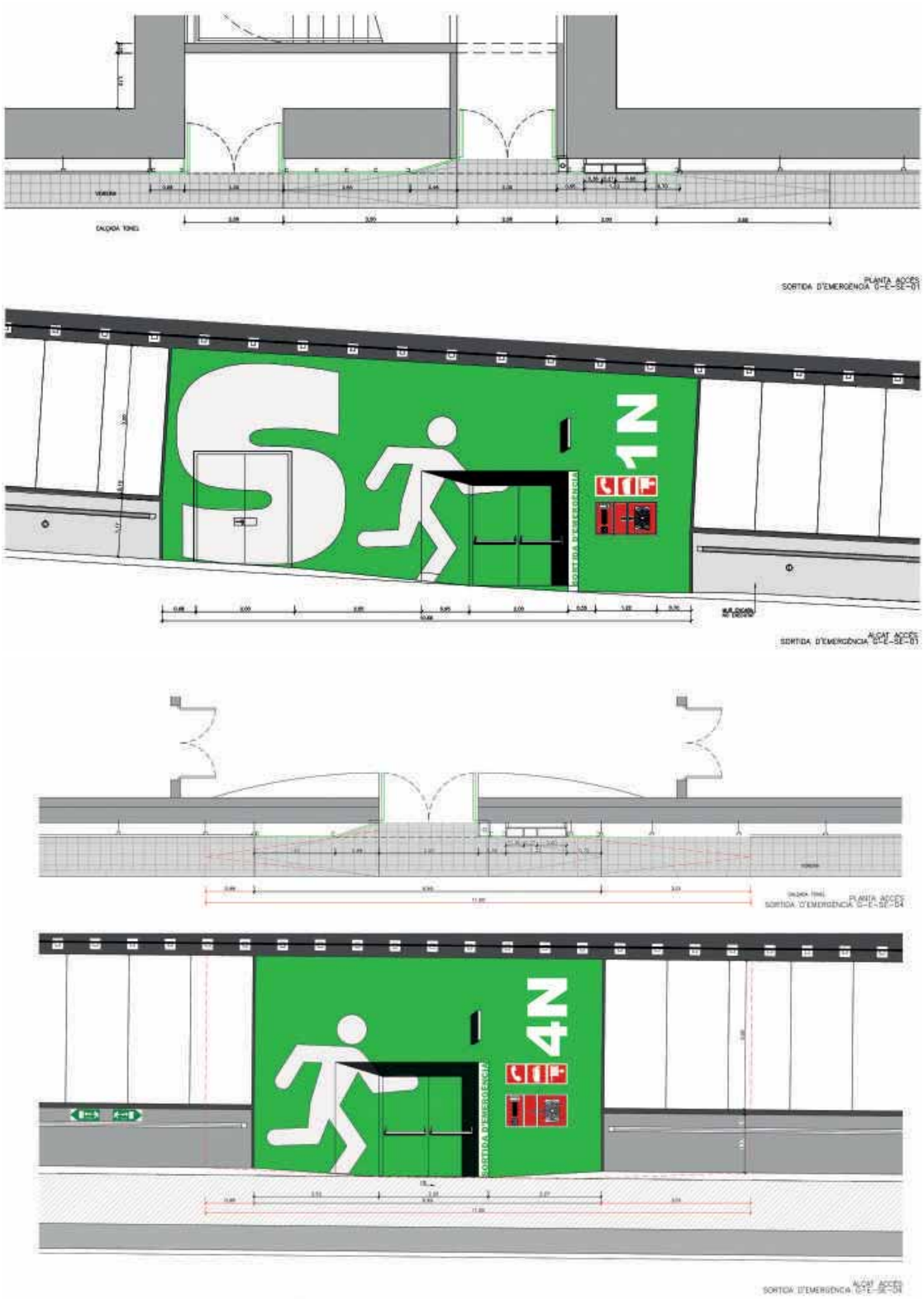


Fig 14. Alzados del diseño de las salidas de emergencia en diferentes configuraciones de pendientes de calzada y accesos (puertas de emergencia y puertas de accesos a cuartos de instalaciones integrados en el elemento de salida.

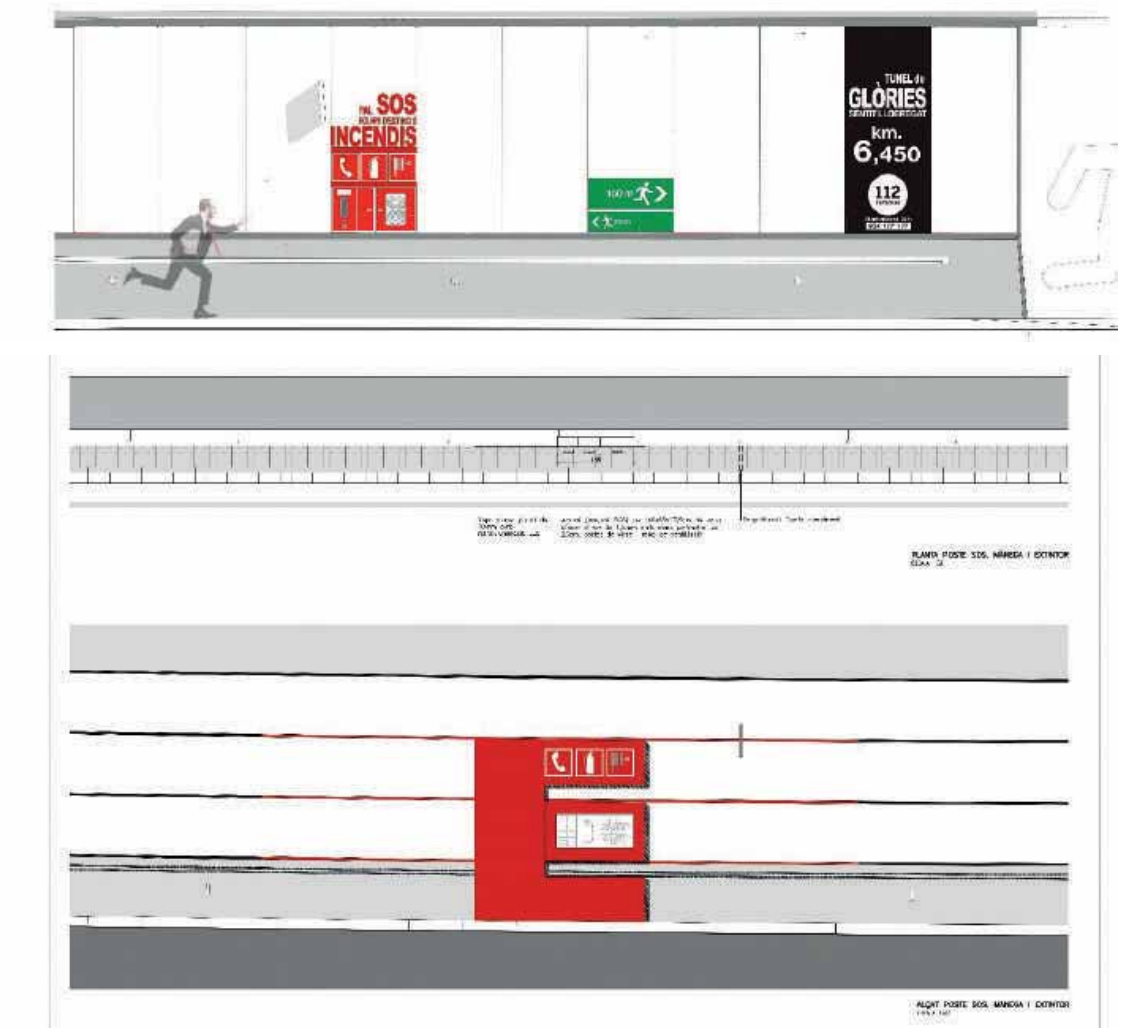


Fig 15. Propuestas parala señalización de postes SOS, emergencias y rotulación en las dos configuraciones de paneles horizontales o verticales (definitivos).

La necesidad de dotar de tratamiento acústico a las bocas y la voluntad de utilizar materiales duraderos de altas prestaciones llevo a desarrollar una solución especial de paneles perforados de hormigón UHPC con fibras que permitía la construcción de paneles de hasta 3 m de altura con alta proporción de perforaciones manteniendo la resistencia estructural y con un espesor aproximado de 20 mm.

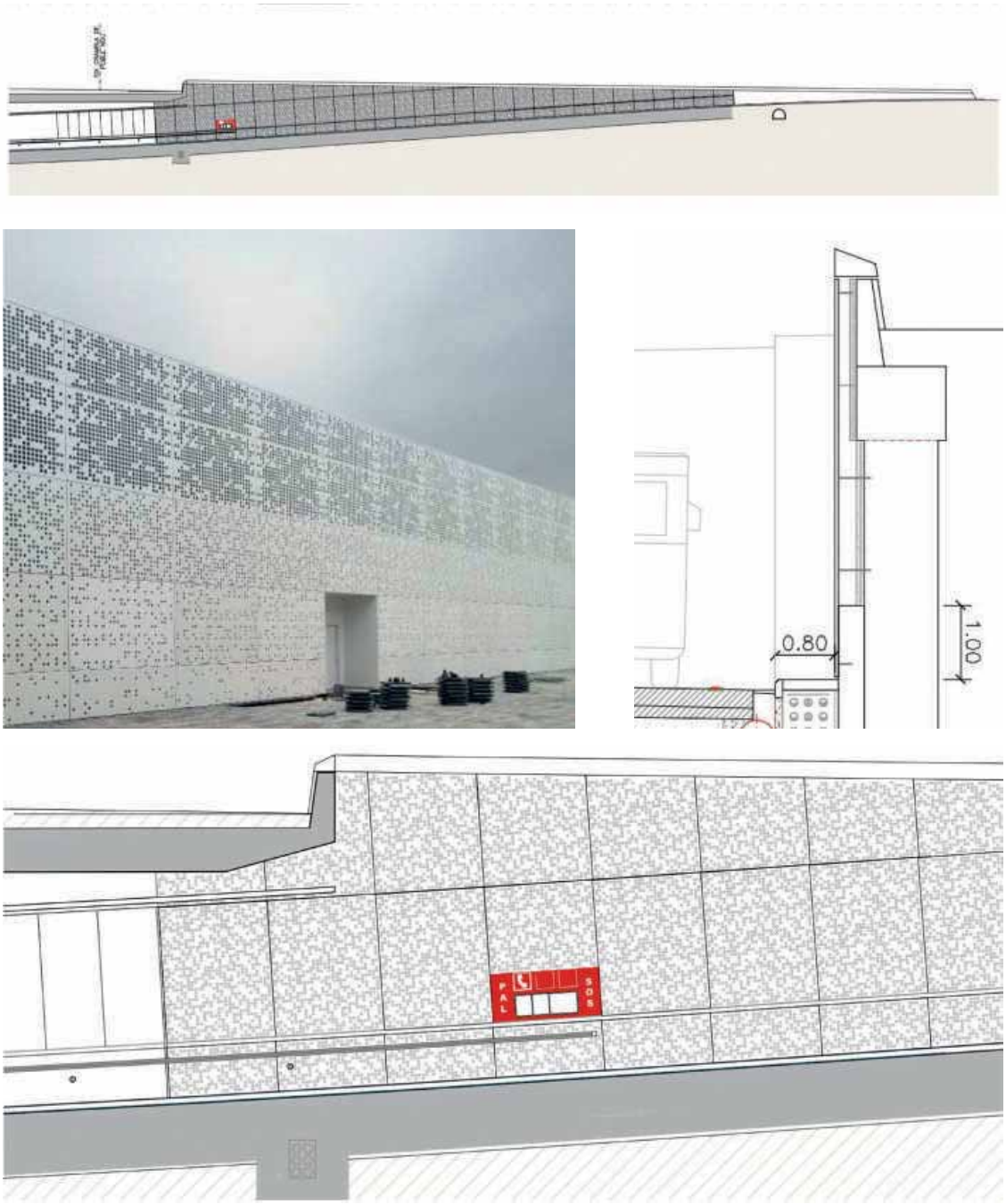


Fig 16. Acabados de las bocas del túnel con la integración del muro fonoabsorbente en la propia materialidad del revestimiento.

Los paneles exteriores incluían un revestimiento interior de 10 cm de lana de roca que se adhirió a la superficie de las pantallas, creando así entre el panel y el material fonoabsorbente una cámara de aire que mejora el rendimiento acústico del mismo.

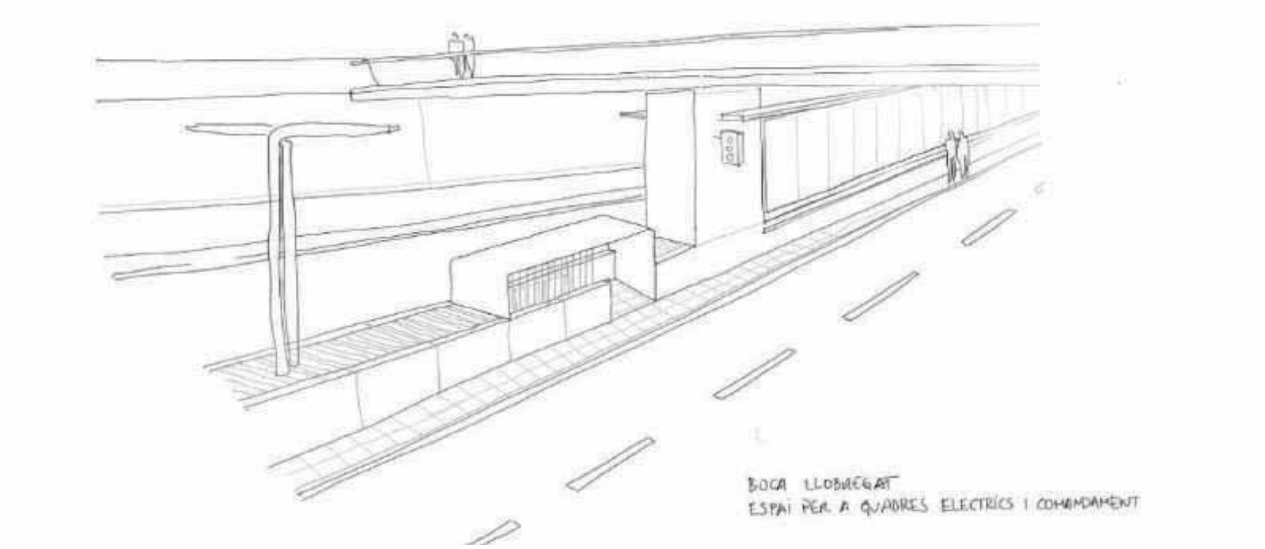


Fig 17. Croquis de integración de los cuadros de instalaciones en las bocas del túnel

Fig 18.

FONCTIONNEMENT EN MODE DÉGRADÉ D'UN POSTE DE CONTRÔLE-COMMANDE ASSURANT LA SURVEILLANCE DE PLUSIEURS TUNNELS

Jean-Claude MARTIN
CETU, France
Secrétaire francophone du comité tunnels PIARC TC4.4
Tunnel Safety Officer in Luxembourg

Les tunnels avec un niveau de trafic élevé sont souvent surveillés à partir d'un poste de contrôle-commande (PCC) actif 24h sur 24 et 365 jours par an. Pour les exploitants qui surveillent plusieurs tunnels d'importance il n'est pas envisageable d'avoir un PCC pour chacun. De fait, les exploitants sont nombreux à assurer la surveillance de leurs multiples ouvrages depuis un PCC unique.

Un PCC unique permet d'optimiser les ressources humaines et financières. Il permet aussi d'assurer une homogénéité des modes d'exploitation en cas d'incidents. Enfin, il présente l'avantage de pouvoir aguerrir les agents de supervision qui se trouvent régulièrement confrontés à des événements survenant dans les tunnels.

D'un point de vue des outils informatiques qui permettent de gérer le trafic et commander les équipements, un PCC unique présente aussi quelques inconvénients, notamment lorsqu'il faut harmoniser les divers systèmes de GTC-Supervision (SCADA) pour simplifier la tâche opérateurs et améliorer leur réactivité en cas d'incident ou lorsqu'il faut assurer la surveillance d'un nouveau tunnel.

Au sein de l'architecture de surveillance d'un réseau routier comportant des tunnels, un PCC unique constitue un point de mode commun : c'est-à-dire un point sensible dont il faut examiner attentivement les différents modes de fonctionnement : mode nominal et modes dégradés.

Cet examen doit identifier de la manière la plus exhaustive possible les défaillances possibles : structurelles, humaines, techniques au niveau du PCC, techniques au niveau des tunnels et liaisons défaillantes entre le PCC et les tunnels.

Puis, face à chaque défaillance il s'agit d'établir des réponses adaptées, de les mettre en place de manière opérationnelle et, ensuite, lors d'exercices ou de situations réelles, de vérifier leur efficacité.

FUNCIONAMIENTO EN MODO DEGRADADO DE UN CENTRO DE CONTROL QUE SUPERVISA VARIOS TÚNELES

Los túneles con un alto nivel de tráfico suelen estar vigilados desde un centro de control (CCP) que está activo las 24 horas del día, los 365 días del año. Para los operadores que controlan varios túneles importantes, no es factible tener un PCC para cada túnel. De hecho, muchos operadores supervisan sus múltiples estructuras desde un único PCC.

Un PCC único permite optimizar los recursos humanos y financieros. También garantiza la uniformidad de los métodos operativos en caso de incidentes. Por último, tiene la ventaja de poder formar al personal de supervisión que se enfrenta regularmente a los acontecimientos que se producen en los túneles.

Desde el punto de vista de las herramientas informáticas utilizadas para la gestión del tráfico y de los equipos de control, un PCC único también presenta algunas desventajas, sobre todo cuando hay que armonizar los distintos sistemas BMS-Supervisión (SCADA) para simplificar la tarea de los operadores y mejorar su capacidad de reacción en caso de incidente o cuando hay que supervisar un nuevo túnel.

Dentro de la arquitectura de vigilancia de una red de carreteras con túneles, un solo PCC es un punto de modo común: es decir, un punto caliente cuyos diferentes modos de funcionamiento deben ser cuidadosamente considerados: modo nominal y modos degradados.

Esta revisión identificará de la manera más exhaustiva posible los posibles fallos: estructurales, humanos, técnicos en el PCC, técnicos en los túneles y los enlaces defectuosos entre el PCC y los túneles.

Luego, ante cada fallo, se trata de establecer las respuestas adecuadas, ponerlas en marcha de forma operativa y luego, durante los ejercicios o las situaciones reales, comprobar su eficacia.

OPERATION IN DEGRADED MODE OF A CONTROL CENTRE MONITORING SEVERAL TUNNELS

Tunnels with a high traffic level are often monitored from a control centre (CCP) which is active 24 hours a day, 365 days a year. For operators who monitor several major tunnels, it is not feasible to have one PCC for each tunnel. In fact, many operators monitor their multiple structures from a single PCC.

A single PCC makes it possible to optimise human and financial resources. It also ensures uniformity of operating methods in the event of incidents. Finally, it has the advantage of being able to train supervisory staff who are regularly confronted with events occurring in the tunnels.

From the point of view of the IT tools used to manage traffic and control equipment, a single PCC also has some disadvantages, particularly when the various BMS-Supervision (SCADA) systems need to be harmonised to simplify the operators' task and improve their reactivity in the event of an incident or when a new tunnel needs to be monitored.

Within the surveillance architecture of a road network with tunnels, a single PCC is a common mode point: i.e. a hotspot whose different operating modes need to be carefully considered: nominal mode and degraded modes.

This review shall identify as comprehensively as possible possible possible failures: structural, human, technical at the PCC, technical at the tunnels and faulty links between the PCC and the tunnels.

Then, in the face of each failure, it is a question of establishing appropriate responses, putting them in place in an operational manner and then, during exercises or real-life situations, checking their effectiveness.

CONTEXTE

Les tunnels avec un niveau de trafic élevé sont souvent surveillés à partir d'un poste de contrôle-commande (PCC) actif 24h sur 24 et 365 jours par an. En France, cela correspond à une surveillance « D4 » au sens de l'Instruction technique. Cette surveillance humaine permanente est assurée par la présence active dans un poste de contrôle-commande d'une personne disposant de moyens permettant de visualiser l'intérieur du tunnel et ses abords, de recevoir les alarmes et de déclencher la mise en œuvre des équipements appropriés pour gérer les situations d'exploitation normale, mais aussi faire face à toute situation d'incident ou d'accident.

Pour assurer une surveillance permanente d'un ouvrage les moyens humains et techniques à mettre en œuvre sont importants. C'est pourquoi, pour les exploitants qui ont sur leurs réseaux plusieurs tunnels d'importance, il n'est pas envisageable d'avoir un PCC spécifique pour chaque tunnel. Dans un souci d'optimisation des moyens humains et techniques, ces exploitants sont souvent conduits à assurer la surveillance de leurs multiples tunnels depuis un PCC unique.

Un PCC qui assure la surveillance continue de plusieurs tunnels est souvent en charge de surveiller des parties plus ou moins importantes du réseau extérieur à l'air libre. Néanmoins, les contraintes propres à la gestion d'un réseau air libre ne seront pas traitées dans cet article, seules les contraintes liées à l'exploitation en sécurité des tunnels seront abordées.

Si elle répond bien à une démarche d'optimisation des ressources, la mise en œuvre d'un PCC unique crée de fait une sorte de nœud central (hub) commun à tous les ouvrages surveillés.

Concrètement, une défaillance de ce PCC unique va impacter la surveillance et l'exploitation de tous les tunnels. Une telle situation n'est bien évidement pas satisfaisante et c'est pourquoi, très souvent, un PCC Secours est mis en œuvre avec comme mission d'assurer la continuité de la surveillance des tunnels, en cas de défaillance du PCC Normal.

Le principe de mise en place d'un PCC Secours étant acté, il faut définir les fonctionnalités qu'il va assurer. En règle générale il va reprendre toutes les missions du PCC Normal, mais il est possible de lui confier uniquement les missions opérationnelle (gestion du trafic et contrôle-commande des équipements) sans prendre en charge les missions de type ''back-office" (traitement des données, planification des interventions, etc.).

Il faut aussi établir une stratégie de fonctionnement de ce PCC Secours.

Il peut être actif en permanence (dans ce cas il s'agit le plus souvent d'un PCC Normal qui assure la gestion d'un autre périmètre routier incluant des tunnels et qui, en cas de besoin, va aussi prendre en charge les tunnels gérés par le PCC Normal défaillant).

Il peut aussi s'agir d'un PCC Secours qui est activé uniquement en cas de défaillance du PCC Normal.

Les tâches confiées à un PCC Secours et la stratégie de fonctionnement étant fixées, le gestionnaire des tunnels concernés va devoir:

- identifier les situations qui vont conduire à basculer d'un PCC sur l'autre ;
- établir les procédures d'activation de ce PCC Secours ;
- maintenir opérationnels les dispositifs techniques du PCC Secours ;
- assurer la formation de ses agents à l'utilisation du PCC Secours.

Ces différents points sont développés dans la suite de cet article.

TÂCHES CONFIÉES À UN PCC SECOURS

Rappelons qu'on s'intéresse uniquement à la gestion du tunnel et de ses accès. La gestion du trafic sur les sections à l'air libre n'est pas abordée ici.

Le trafic à l'intérieur du tunnel et sur ses accès doit être contrôlé en situation normale, mais aussi en cas de travaux ou d'incident, pour détecter et gérer toute situation pouvant impacter la sécurité des usagers.

Plus concrètement, les fonctionnalités assurées par un PCC vont être relatives à la :

- gestion du trafic :
  Surveillance,
  Actions d'information et de signalisation,
  Conduite des interventions dans l'ouvrage réalisées par des patrouilles,
- gestion des équipements :
  Contrôle-commande ;
  Suivi du fonctionnement (défauts, pannes, temps de fonctionnement….) ;
  Suivi des actions de maintenance (back office).
- gestion de crise (incident, accident, incendie) :
  Actions sur les équipements de gestion du trafic (PMV, SAV, fermeture…),
  Actions au niveau des équipements (tous types),
  Alerte des services de secours si besoin,
  Assistance aux usagers, si besoin.

Un PCC Secours doit, a minima, pouvoir exécuter des commandes permettant de mettre en sécurité l'ouvrage (fermeture du tunnel, renforcement de l'éclairage et en cas d'incendie action sur le système de ventilation).

Le plus souvent un PCC Secours va disposer des mêmes moyens et commandes que le PCC Normal, mais les outils de supervision dont il sera équipé seront plus modestes, notamment au niveau de l'interface homme machine.

Illustration 1: photo d'un PCC.

STRATÉGIE DE FONCTIONNEMENT

En France, la réglementation impose une unicité de commande. L'Instruction Technique (paragraphe 5.1.1) indique en effet que ''Quel que soit le degré de permanence et de surveillance, les mêmes équipements de sécurité d'un tunnel ne doivent pouvoir être commandés à un moment quelconque que depuis un seul poste de contrôle-commande. Cela ne fait pas obstacle à l'existence éventuelle de plusieurs postes à condition qu'ils ne puissent pas être en fonction simultanément."

Réglementairement, un PCC Secours ne peut pas être en fonction en même temps que le PCC Normal.

Néanmoins, en termes d'architecture opérationnelle, deux situations sont envisageables :

- le rôle de PCC Secours est assuré par un autre PCC Normal actif en permanence. Ce PCC Normal verra donc ses missions étendues en cas de sollicitation, (voir illustration 2),
- le rôle de PCC Secours est assuré par un PCC spécifique qui sera activé uniquement en cas de besoin, (voir illustration 3).

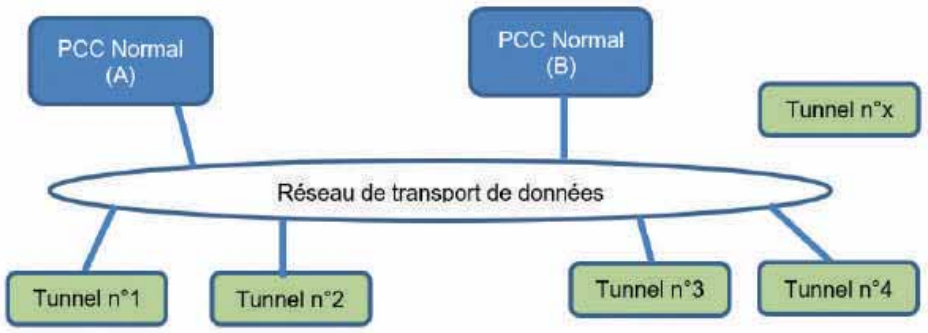


Illustration 2: schéma d'une architecture avec PCC Secours actif en permanence

Les deux PCC et tous les tunnels sont raccordés à un même réseau de transport de données. Chaque PCC Normal gère un certain nombre de tunnels et ils sont tous les deux actifs, en termes d'équipements et de moyens humains.

Dans l'illustration ci-dessus, deux tunnels sont rattachés au PCC Normal (A) et trois au PCC Normal (B). En cas de défaillance d'un des deux PCC Normal, l'autre PCC reprend quasi instantanément la gestion des tunnels de son homologue.

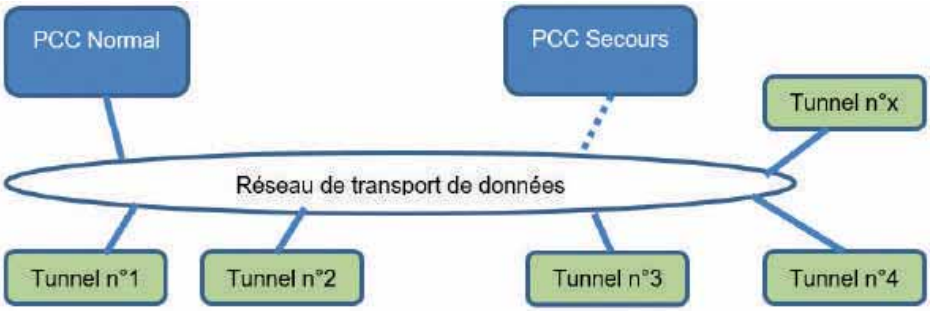


Illustration 3 : schéma d'une architecture avec PCC secours inactif

Les deux PCC et tous les tunnels sont raccordés à un même réseau de transport de données. Le PCC Normal gère l'ensemble des tunnels et le PCC Secours est inactif, en termes d'équipements et de moyens humains.

En cas de défaillance du PCC Normal, le PCC Secours va reprendre la gestion de tous tunnels, mais cela va demander un temps plus ou moins long. Cette durée est déterminée en prenant en compte le temps nécessaire à un opérateur pour arriver sur place et aussi le temps nécessaire au démarrage des équipements de supervision du PCC Secours.

SITUATIONS DE BASCULEMENT

D'un point de vue technique, la défaillance complète d'un PCC peut trouver sa cause dans diverses situations. Les plus courantes sont :

- la perte de l'alimentation en énergie du PCC. Cela reste un événement assez rare, car très souvent un PCC dispose d'une alimentation de secours complétée par un onduleur, voire un groupe électrogène
- la perte du réseau de transport de données qui assure le lien entre le PCC et les tunnels qu'il gère. Ce type de situation, sans être très courant, peut cependant se produire avec une occurrence non négligeable.

Quelle que soit la cause de la défaillance totale d'un PCC, cet événement est pris en compte dans les procédures d'exploitation. En France, chaque tunnel dispose d'un Plan d'Intervention et de Sécurité (PIS), approuvé régulièrement par l'autorité administrative (Préfecture), qui a pour objectif de définir l'organisation et les missions du personnel de l'exploitant pour les différentes situations susceptibles de se produire, notamment les possibles défaillances, totales ou partielles, des équipements mis en œuvre dans le tunnel et au PCC.

A ce titre, le PIS traite les défaillances matérielles en fixant deux seuils de gravité :

- Au-delà du premier, l'exploitant va devoir mettre en place des mesures compensatoires adaptées et le tunnel fonctionnera en mode dégradé ;
- Au-delà du second, le tunnel devra être fermé.

Lorsque les mesures compensatoires ne permettent plus de garantir la sécurité des usagers dans le tunnel, on dépasse donc les conditions minimales d'exploitation (CME) c'est-à-dire qu'on franchit le second seuil. Les CME désignent donc l'état de disponibilité et de performance minimal des équipements assurant la sécurité, au-dessous duquel le tunnel doit être fermé à la circulation.

Un PCC joue un rôle essentiel dans la gestion d'un ou plusieurs tunnels pour détecter et gérer, en continu, toute situation pouvant impacter la sécurité des usagers. Sa perte va donc, au travers des CME, conduire à la fermeture du ou des tunnels concernés. Une telle situation n'étant pas envisageable dans la durée, il va falloir activer le plus rapidement possible le PCC Secours et donc procéder à un basculement.

PROCÉDURES D'ACTIVATION D'UN PCC SECOURS

Comme nous l'avons vu, la perte totale d'un PCC Normal entraine un dépassement des CME qui va conduire à une fermeture du ou des tunnels exploités.

Cette exigence de fermeture doit être réalisée rapidement, mais pas instantanément : elle peut s'exécuter dans un délai de quelques minutes.

En fonction de la stratégie de fonctionnement qui a été établie (le PCC Secours est actif en permanence ou il est activé uniquement en cas de besoin), la réponse qui sera apportée à cette exigence de fermeture va être plus ou moins facile à élaborer :

- Dans le cas où le rôle de PCC Secours est rempli par un autre PCC Normal, le temps de basculement peut être assez court dans la mesure où il s'agira d'activer des procédures informatiques conduisant à affecter les tunnels du PCC Normal défaillant à un autre PCC Normal désigné pour assurer le rôle de PCC Secours. Et si ce temps est inférieur au délai autorisé par la CME "défaillance du PCC Normal" la fermeture ne sera pas nécessaire. Cela suppose, nous y reviendrons, que le dispositif de basculement soit régulièrement entretenu et testé.
- Dans le cas où le PCC Secours est activé uniquement en cas de besoin, la situation est plus compliquée. En effet, généralement la fermeture d'un ou de plusieurs tunnels se fait, à distance, depuis le PCC Normal. Lorsque celui-ci est défaillant et qu'il faut cependant fermer la situation est assez délicate et des dispositions particulières devront être prises pour assurer la fermeture du ou des tunnels, au plus tôt, dans des conditions de sécurité satisfaisantes pour l'usager.

A travers différentes procédures d'exploitation, une situation de basculement va solliciter plusieurs types de moyens : techniques, humains et de communication.

Dans le cas d'un PCC Secours actif en permanence, il conviendra que :

- des moyens techniques permettent d'assurer proprement la déconnexion du PCC Normal et des tunnels gérés, puis ensuite la connexion de ces mêmes tunnels au PC Secours). Rappelons que la réglementation française interdit d'avoir plusieurs points de contrôle-commande possible : un seul PCC peut être actif. A noter que ces dispositifs devront aussi permettre le basculement "retour" lorsque le PCC Normal sera redevenu opérationnel.
- des moyens humains supplémentaires soient prévus au niveau de l'opérateur du PCC Secours si la défaillance du PCC Normal est amenée à durer.
- des communications soient établies pour informer tous les acteurs en interne, voire en externe (exploitants de réseaux routiers voisins) d'un basculement du PCC Normal sur le PCC Secours.

Dans le cas d'un PCC Secours activé uniquement en cas de besoin, il conviendra que :

- des moyens techniques permettent d'assurer proprement la déconnexion du PCC Normal et des tunnels gérés, puis ensuite la connexion de ces mêmes tunnels au PC Secours. Il faudra aussi pouvoir activer le PCC Secours.

  A noter que ces dispositifs devront aussi permettre le basculement "retour" lorsque le PCC Normal sera redevenu opérationnel.
- des moyens humains soient prévus pour faire fonctionner le PCC Secours, soit avec le déplacement d'un opérateur depuis le site du PCC Normal si ce dernier n'est pas trop éloigné, soit en sollicitant un opérateur d'astreinte, géographiquement proche du PCC Secours.
- des communications soient établies pour informer les usagers et tous les acteurs en interne, voire en externe (exploitants de réseaux routiers voisins) de la fermeture des différents tunnels gérés par le PCC défaillant. Puis lorsque le basculement sur le PCC Secours est réalisé, informer ces mêmes acteurs de la réouverture des tunnels.

  Compte tenu du temps de basculement qui pourra être assez long, la communication en direction des usagers devra être établie par divers canaux.

MAINTIEN OPÉRATIONNEL DES DISPOSITIFS TECHNIQUES DU PCC

Que le PCC Secours soit actif en permanence ou qu'il soit activé uniquement en cas de besoin, les divers équipements qui permettent de réaliser un éventuel basculement doivent être entretenus.

En outre, des vérifications régulières permettant de s'assurer de l'opérationnalité du PCC Secours, notam-

ment des IHM doivent être réalisées. Il s'agit le plus souvent de procéder à un basculement à blanc : c'est-à-dire que la séquence de basculement sera réalisée, mais sans basculer réellement le PCC Normal qui restera actif. Ce type de vérification sera à faire dans les deux sens : sens aller, du PCC Normal vers le PCC Secours, et sens retour, du PCC Secours vers le PCC Normal.

Des basculements avec activation réelle du PCC Secours peuvent être réalisés lors des exercices annuels qui associent l'exploitant et les services de secours.

En cas d'évolution du PCC Normal, quelle que soit la nature du changement (mise à jour des logiciels, évolution des IHM) il faut impérativement mettre à jour le PCC Secours.

FORMATION DES AGENTS À L'UTILISATION DU PCC SECOURS

La formation initiale et continue des opérateurs devra comprendre un module consacré à l'activation du PCC Secours, notamment les séquences qui permettront de rendre inactif ou de mettre en veille le PCC Normal.

A l'issue de leur formation, les opérateurs devront savoir démarrer puis remettre en veille un PCC Secours et, bien sûr, savoir utiliser les IHM du PC Secours

D'un point de vue pratique, pour un PC Secours activé en cas de besoin, les opérateurs susceptibles d'y intervenir devront connaitre les conditions d'accès (localisation précise et cheminement) et disposer des moyens d'accès (clé, code…) à ce PCC Secours.

CONCLUSION

Dès lors qu'il s'agit d'un ouvrage complexe à fort trafic, ou d'importance stratégique (transfrontalier) ou d'une gestion globalisée de plusieurs tunnels, la mise en œuvre d'un PCC Secours se justifie souvent.

Le cas d'un PCC Secours actif en permanence est, a priori, plus simple à gérer et doit permettre de ne pas fermer les tunnels.

Cependant, dans les deux cas (PCC Secours actif ou pas), au niveau de la conception il faut mettre en place toutes les dispositions nécessaires pour assurer un basculement simple et efficace en cas de besoin (ainsi que le retour).

Au niveau de l'exploitation courante, bien que les cas de perte complète d'un PCC Normal soient assez rares, ils existent et il faut donc que l'entretien des dispositifs de basculement soit bien assuré. De même, des tests réguliers sont à prévoir et la formation des opérateurs (initiale et continue) doit bien prendre en compte le PCC Normal, mais aussi l'existence du PCC Secours.

EJE LITORAL SOTERRADO. PLAN MÁLAGA LITORAL

José Pedro Alba García
Ingeniero de caminos, canales y puertos, España

Alfonso Alba Ripoll
Ingeniero de caminos, canales y puertos, España

El autor elaboró la propuesta inicial del Plan Málaga Litoral, orientado a facilitar y promover los servicios de transporte en autobús en el área de influencia metropolitana de Málaga donde residen 1,5 millones de habitantes.

El Eje Litoral Soterrado forma parte del Plan Málaga Litoral, que incorpora diversas actuaciones diseñadas para impulsar la movilidad en autobuses metropolitanos e interurbanos, así como para reducir los efectos nocivos del tráfico en superficie del actual Eje Litoral en el Área Central de Málaga, posibilitando una mejor integración Ciudad – Mar y la recuperación de una amplia superficie para uso peatonal y zonas de parques.

Para ello, se contempla la ejecución de dos nuevas terminales subterráneas de autobuses, un túnel de unos 2,5 km de longitud, aparcamientos soterrados, reurbanización de espacios, rehabilitación de barrios, reutilización y tratamiento de aguas, entre otras actuaciones. Con ello, se persigue la creación de nuevas centralidades y dotar de mejor conectividad a las poblaciones del Área de Influencia Metropolitana de Málaga.

En atención a los condicionantes de espacio disponible, geología, vegetación y organización de las obras, el Eje Litoral Soterrado se plantea con calzadas superpuestas en dos niveles, con 2 o 3 carriles por sentido según el tramo. Además de los accesos en los extremos, se plantean accesos intermedios, así como conexiones con una de las terminales de autobuses y con aparcamientos. Se orienta a resolver el tráfico de paso a través del área central, sin facilitar el acceso al Centro en vehículo privado.

Se prevé dotar la infraestructura soterrada con las últimas tecnologías para la adecuada explotación de túnel, que soportará unos 50.000 vehículos diarios desde el año inicial de puesta en servicio. En especial, considerando su implantación en el Área Central de Bajas Emisiones, cobran relevancia las instalaciones de ventilación y filtrado de los gases nocivos.

UNDERGROUND COASTAL AXIS. MALAGA COASTAL PLAN

The author drew up the initial proposal for the Málaga Litoral Plan, aimed at facilitating and promoting bus transport services in the metropolitan area of influence of Málaga, where 1.5 million inhabitants reside.

The Underground Coastal Axis forms part of the Málaga Litoral Plan, which incorporates various actions designed to promote mobility in metropolitan and intercity buses, as well as to reduce the harmful effects of traffic on the surface of the current Coastal Axis in the Central Area of Malaga, enabling a better City-Sea integration and the recovery of a large area for pedestrian use and park areas.

For this, the execution of two new underground bus terminals, a tunnel of about 2.5 km in length, underground car parks, redevelopment of spaces, rehabilitation of neighborhoods, reuse and treatment of water, among other actions, are contemplated. With this, the creation of new centralities is pursued and to provide better connectivity to the populations of the Metropolitan Area of Influence of Malaga.

In response to the constraints of available space, geology, vegetation and organization of works, the Underground Coastal Axis is proposed with superimposed roads on two levels, with 2 or 3 lanes in each direction depending on the section. In addition to the accesses at the ends, intermediate accesses are proposed, as well as connections with one of the bus terminals and with car parks. It is aimed at solving traffic passing through the central area, without facilitating access to the Center by private vehicle.

It is planned to equip the underground infrastructure with the latest technologies for the proper operation of the tunnel, which will support some 50,000 vehicles per day from the initial year of commissioning. In particular, considering its implementation in the Central Low Emissions Area, the installations for ventilation and filtering of harmful gases become relevant.

AXE CÔTIER SOUTERRAIN. PLAN CÔTIER DE MALAGA

L'auteur a rédigé la proposition initiale du Plan Málaga Litoral, visant à faciliter et à promouvoir les services de transport par autobus dans la zone d'influence métropolitaine de Málaga, où résident 1,5 million d'habitants.

L'Axe Côtier Souterrain fait partie du Plan Málaga Litoral, qui intègre diverses actions visant à promouvoir la mobilité dans les bus métropolitains et interurbains, ainsi qu'à réduire les effets néfastes du trafic sur la surface de l'Axe Côtier actuel dans la Zone Centrale de Malaga, permettant une meilleure intégration Ville-Mer et la récupération d'une vaste zone à usage piétonnier et de parcs.

Pour cela, la réalisation de deux nouvelles gares routières souterraines, un tunnel d'environ 2,5 km de long, des parkings souterrains, le réaménagement des espaces, la réhabilitation des quartiers, la réutilisation et le traitement de l'eau, entre autres actions, sont envisagés. Avec cela, la création de nouvelles centralités est poursuivie et pour offrir une meilleure connectivité aux populations de la zone métropolitaine d'influence de Malaga.

En réponse aux contraintes d'espace disponible, de géologie, de végétation et d'organisation des travaux, l'Axe Côtier Souterrain est proposé avec des voiries superposées sur deux niveaux, à 2 ou 3 voies dans chaque sens selon les tronçons. En plus des accès aux extrémités, des accès intermédiaires sont proposés, ainsi que des correspondances avec l'une des gares routières et avec les parkings. Il vise à résoudre le trafic passant par la zone centrale, sans faciliter l'accès au Centre en véhicule privé.

Il est prévu d'équiper l'infrastructure souterraine des dernières technologies pour le bon fonctionnement du tunnel, qui supportera quelque 50 000 véhicules par jour dès la première année de mise en service. En particulier, compte tenu de sa mise en œuvre dans la zone centrale à faibles émissions, les installations de ventilation et de filtrage des gaz nocifs deviennent pertinentes.

1. MÁLAGA, HISTORIA Y PERSPECTIVAS DE FUTURO.

El establecimiento hace casi 3.000 años de colonias fenicias en las costas mediterráneas ibéricas, a partir de la extensión de las actividades de esta cultura mediooriental hacia el Oeste en búsqueda de materias primas y de comercio en general, se reconoce comúnmente como el inicio de los asentamientos poblacionales en lo que hoy conocemos como Málaga. Es así que las actividades relacionadas con la existencia de un puerto de importancia han influido de manera muy significativa en todos los avatares de la ciudad. A partir de esta circunstancia histórica, la relación de Málaga con el Mediterráneo es elemento esencial de su cultura y de su realidad actual.

Otro elemento esencial a tener en cuenta en la historia de Málaga es la configuración del relieve que, rodeando el amplio litoral de Málaga, ha dificultado hasta tiempos muy recientes las relaciones económicas y sociales con el resto de la Península, pues ha constituido de forma natural un borde casi insalvable. Esta circunstancia ha venido determinando hasta hace no muchas décadas la accesibilidad y las comunicaciones, contribuyendo a delimitar espacios semicerrados que han venido teniendo, consecuentemente, serias dificultades para su desarrollo.

La agricultura y la pesca, por una parte, y el comercio marítimo por otra, han venido siendo el soporte económico sustancial de Málaga hasta el inicio de la industrialización que se abordó en Málaga de forma pionera en España a mediados del siglo XIX. La construcción de la línea férrea Córdoba-Málaga en 1865 vino a ofrecer un soporte principal a alguna de estas nuevas industrias y al transporte de diversas materias primas y productos del interior de Andalucía para su exportación a través del puerto.

Sin olvidar la importancia histórica ya reseñada del Puerto, dos elementos podemos considerar que en los tiempos modernos han venido a determinar la evolución de Málaga en todos los órdenes: la construcción de la carretera de Nuevo Acceso a Málaga desde Las Pedrizas (1973), que permitió olvidar para siempre la barrera montañosa que la limitaba muy fuertemente en sus relaciones con el resto de España, y el Aeropuerto, que en sus sucesivas y acertadas ampliaciones ha establecido la base principal para su desarrollo económico reciente y para su apertura al mundo, constituyéndose en la práctica en la principal "puerta" de Andalucía al exterior. Otros elementos de muy diversa índole han contribuido también poderosamente en las últimas décadas a la transformación social y económica de nuestra provincia: Universidad, AVE, autopistas y autovías y nuevos espacios urbanos son los más significativos.

En Málaga se han realizado actuaciones de gran relevancia en el campo de las infraestructuras, con significativa eficacia derivada de los aciertos en las soluciones más que por su magnificencia o atrevimiento, lo que está siendo corroborado por las grandes utilidades y rentabilidades que están aportando, con reconocimiento generalizado de la población. Pero estas inversiones, aun siendo considerables no han llegado a alcanzar a paliar los grandes déficits acumulados, lo que unido a la paralización de nuevas inversiones desde el año 2010 como consecuencia de la crisis económica que ha afectado a España y a otros muchos países, está reproduciendo problemáticas pasadas, que se ven agravadas por los importantes crecimientos de población.

El desarrollo de las actividades turísticas, por una parte, y el asentamiento de actividades tecnológicas avanzadas, por otra, son dos elementos que, a partir de las nuevas infraestructuras y equipamientos reseñados en los párrafos anteriores, han venido a crear soportes de gran interés y de todo punto esenciales para fundamentar la realidad de la Málaga – ciudad y provincia – actual. Los avances en la agricultura plantean también interesantes campos para el desarrollo económico y social de algunos espacios provinciales. Málaga es hoy un destino preferido de forma generalizada por la calidad de vida que ofrece, por sus infraestructuras, por su clima, por su oferta cultural y por su ambiente social.

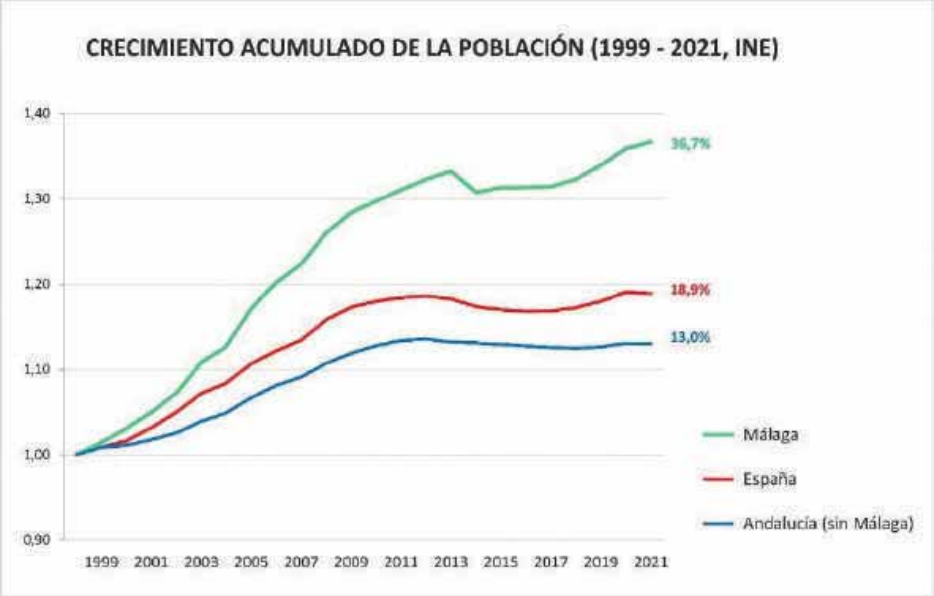


Fig. nº1: Crecimiento acumulado de la población (Datos: INE).

El turismo, las tecnologías y la agricultura están favoreciendo la consolidación de diversos polos principales tales como Marbella, Antequera y Vélez-Málaga, además de la capital Málaga, que, junto a otros, crean una estructura multipolar de gran interés con vistas a un futuro de articulación interna en forma de ciudad – región. Las infraestructuras de transporte terrestre (autopistas y autovías y AVE, principalmente) y aeropuerto y puerto son elementos en los que se viene apoyando de manera muy eficiente esta estructuración.

Málaga es hoy lugar en el que se miran muchas otras poblaciones españolas y es también foco de atracción para ciudadanos españoles y europeos, tanto como lugar de residencia como para la implantación de actividades económicas, en un mundo ya muy globalizado e intercomunicado. Málaga es hoy un lugar con posibilidades de desarrollo inimaginables, fruto de las acciones llevadas a cabo a partir de 1970, fundamentalmente.

Los datos de crecimiento de la población y del empleo en Málaga en las dos últimas décadas avalan la afirmación del párrafo anterior, lo que siendo una circunstancia esperanzadora para el futuro de los jóvenes y de las nuevas generaciones, no deja de plantear cierta inquietud respecto al mantenimiento de los estándares de calidad en el servicio de las infraestructuras y equipamientos hoy disponibles, máxime cuando existen ya insuficiencias pendientes de solución.

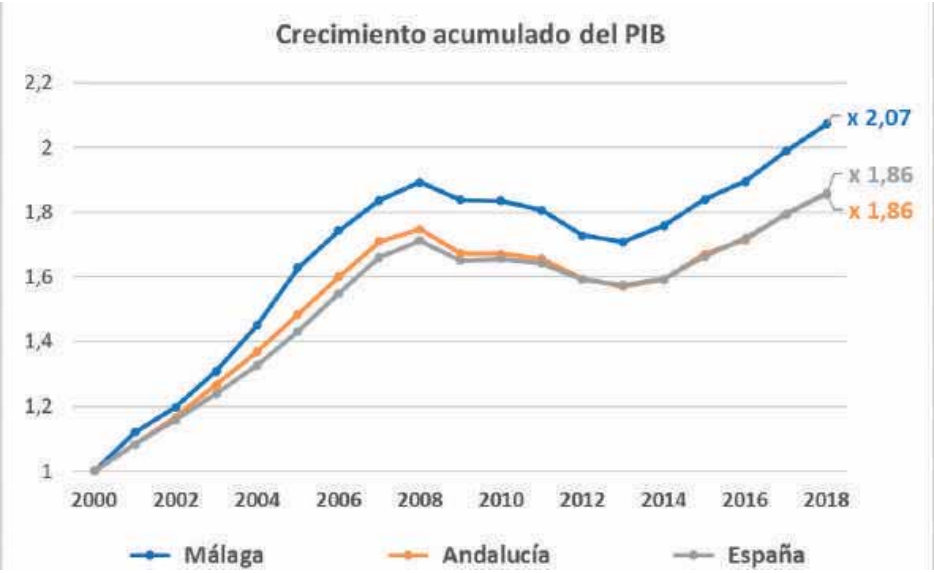


Fig. nº2: Crecimiento acumulado del PIB (Fuente: INE).

En lo concerniente al ámbito urbano de la capital, Málaga, resulta necesario acomodar las dimensiones y las ofertas del Centro de la ciudad a las demandas actuales, imposibles de atender exclusivamente por el Centro Histórico, correspondiente a la Málaga del siglo XIX. La inmediatez de lo urbano al litoral, que en el caso de Málaga alcanza unos 13 km de recorrido, ofrece importantes oportunidades para desarrollar proyectos innovadores de integración urbana y que contribuyan también a consolidar su papel de liderazgo a través de la mejora de las comunicaciones y servicios.

2. EL PLAN MÁLAGA LITORAL.

2.1. Antecedentes

En las dos últimas décadas se han desarrollado por el Ayuntamiento de Málaga distintos estudios y trabajos técnicos encaminados a analizar las condiciones y plantear propuestas de actuación relativas a las terminales de autobuses interurbanos de Málaga, por una parte, y a la solución de las interferencias de la circulación general en los ejes viarios Oeste – Este con la vida del área central de la ciudad y con sus relaciones con los espacios del litoral marítimo, por otra.

Tanto el Plan de Ordenación del Territorial del Área Urbana de Málaga (POTAUM), elaborado por la Junta de Andalucía (aprobado en el año 2009), como el Plan General de Ordenación Urbana, redactado por el Ayuntamiento y aprobado definitivamente en julio de 2011, recogen en sus propuestas dos de los elementos principales de lo que hoy conocemos como Plan Málaga Litoral: una nueva terminal para autobuses interurbanos subterránea junto a la Estación de ferrocarril María Zambrano, y el soterramiento de la vía principal de circulación en la Avenida de Cánovas del Castillo y en un tramo del Paseo Marítimo Pablo Ruiz Picasso. También se redactó un Anteproyecto para intercambiador de transportes bajo la Plaza de La Marina, aunque no llegó a ser recogido en los planeamientos antes citados.

En 2019, por encargo de la Empresa Municipal de Transportes (EMT), el arquitecto Salvador Moreno y quien suscribe esta ponencia elaboraron sendos Informes en los que se planteaban propuestas de actuaciones adicionales integradas, junto a las dos antes citadas, en un Plan global que propugna alcanzar objetivos de mayor alcance, tanto en el campo de los transportes de personas como en el desarrollo urbano de los espacios centrales de la ciudad, enmarcado todo ello en unas visiones estratégicas que presentan soluciones más ambiciosas y, a la vez, más sostenibles.

Es así que las propuestas del Plan Málaga Litoral complementan y desarrollan las incluidas en los planeamientos en vigor, ampliando sus objetivos en el campo de la creación de nuevos e importantes espacios verdes y peatonales en la zona más valiosa de la ciudad y en la solución de los conflictos que plantean los grandes ejes viarios con la vida urbana en el Centro.

2.2. Funcionalidad actual.

Actualmente, los servicios de transporte interurbano de viajeros prestan sus servicios desde las dos estaciones existentes en Los Tilos y Avenida de Heredia. La Estación de Heredia, emplazada junto al Centro Histórico, presta un importante servicio a los viajeros con origen o destino en el Área de Influencia Metropolitana, mientras que la estación de Los Tilos, si bien también presta servicio a estos usuarios, es la única estación de Málaga para los servicios de autobuses interurbanos nacionales e internacionales.

El Eje Litoral, formado por el Paseo Marítimo Antonio Machado, la Avenida M.A. Heredia, el Paseo de Los Curas, la Avenida Cánovas del Castillo y el Paseo Marítimo Pablo R. Picasso, soporta las relaciones internas Oeste – Este, y viceversa, de la ciudad de Málaga.

El Eje Parque – Alameda Principal funciona actualmente sólo en sentido Oeste, pues el sentido Este está limitado su uso al transporte público. La intención del Ayuntamiento de la ciudad es extender esta limitación al sentido Oeste.

Cuando esto ocurra, el Eje Litoral pasará a ser el único eje de transporte general habilitado en la ciudad para las relaciones Oeste – Este, pasando a soportar intensidades medias diarias de entre 60.000 y 65.000 vehículos en su tramo central, justo donde se ubica la Estación de Avenida de Heredia antes mencionada.

Este Eje Litoral presenta numerosas intersecciones semaforizadas que limitan su capacidad, al mismo tiempo que el propio vial genera una interrupción de los flujos peatonales entre el Centro Histórico y los desarrollos más recientes en los Muelles 1 y 2 del Puerto.

En las horas de mayor congestión, los autobuses interurbanos sufren demoras en sus tiempos de recorrido, lo que afecta a la calidad del servicio y resta atractivo al uso del transporte colectivo en comparación con el vehículo privado.

2.3. Actuaciones del Plan Málaga Litoral.

El Plan Málaga Litoral se plantea basado en los siguientes tres objetivos principales:

- Acceso directo y rápido para los servicios de transporte interurbano de viajeros a las nuevas terminales previstas junto a la estación de ferrocarril María Zambrano y en Plaza de la Marina, en ambos casos subterráneas, contribuyendo así a facilitar y promover tales servicios de transporte público.
- Integración de los espacios centrales de la ciudad con los portuarios ya regenerados (muelles 1 y 2) y con el litoral y playas, con notable ampliación de espacios verdes y peatonales y anulación completa del "efecto barrera" que perturba la relación de dichos espacios centrales urbanos, y de la ciudad en general, con el área litoral.
- Solución para las comunicaciones internas Oeste-Este y viceversa entre los barrios ubicados próximos al Centro que han de atravesarlo para relacionarse entre sí como consecuencia de la especial configuración de la ciudad, muy condicionada por el relieve del terreno, y sin por ello favorecer el acceso a dicho Centro de los vehículos privados.

Se pretende facilitar, y en la medida de lo posible priorizar, los accesos en transportes públicos al área central ampliada, con el objetivo de crear condiciones de equidad en favor de las poblaciones integradas en el Área de Influencia Metropolitana, equilibrando sus oportunidades de acceso a las terminales de transporte (AVE y Aeropuerto, especialmente) y al Centro de Málaga con las de los barrios de la propia ciudad.

Los residentes en las poblaciones del Área de Influencia Metropolitana podrían llegar así a considerar sus actuales "viajes" a la capital como simples desplazamientos dentro de una misma ciudad, en tanto en cuanto el tiempo que les consuma y las condiciones en que se realicen sean los idóneos: menos de una hora y calidad y ubicación de las terminales. A partir de ahí se habrán creado condiciones de disuasión del uso del vehículo privado para tales movimientos, lo que se debe traducir en descarga de la circulación en las vías de acceso a la capital y en reducción significativa de las emisiones de gases nocivos y de otras externalidades de los transportes.

Ante todo, es preciso destacar el carácter de proyecto global del Plan Málaga Litoral, que agrupa un conjunto de actuaciones de diverso alcance y contenido alrededor de unos objetivos orientados a la mejora de las condiciones de vida de los habitantes de Málaga y de buena parte de la provincia.

Se trata de un Plan con proyección de largo plazo y de grandes efectos transformadores, que complementará lo ya realizado en las últimas décadas, potenciando sus posibilidades e incrementando la rentabilidad social y económica para la ciudad y provincia.

Es un Plan de la ciudad de Málaga pensado para impulsar la cercanía con otras poblaciones, para avanzar en la cohesión social, para favorecer la idea de proyecto común para el desarrollo de todas las poblaciones, y para proyectar internacionalmente una imagen de gran avance y modernidad.

Se recogen a continuación las actuaciones incluidas en el Plan Málaga Litoral:

a) Terminales de transporte.

b) Eje Litoral Soterrado.

c) Centralidad.

d) Nuevos espacios libres y verdes.

e) Áreas libres de emisiones.

f) Aparcamientos.

g) Centro de negocios en la parcela de los Tilos.

h) Rehabilitación de barrios.

i) Reutilización de aguas.

3. EJE LITORAL SOTERRADO: TÚNEL URBANO.

El actual Eje Litoral, formado por la Avenida de Heredia, el Paseo de los Curas, la Avenida Cánovas del Castillo y el Paseo Marítimo Pablo Ruiz Picasso, discurre en gran parte de su longitud por terrenos ganados al mar. Entre ellos, el "Parque" de Málaga, creación urbana de poco más de 100 años de antigüedad.

No es ocasión ni lugar para incorporar un análisis de la historia de este importantísimo espacio de la ciudad de Málaga, creado a partir de la visión y voluntad del Marqués de Larios y de D. Antonio Cánovas del Castillo. Mediante el relleno de un amplio espacio portuario que supuso el traslado hacia el Sur en unos 150 m de la línea de los muelles, al inicio del siglo XX se abordó la creación de un amplio espacio urbano con dos funciones prevalentes: espacio de parque dotado de una vegetación singular y valiosa, y elemento de solución para la articulación y conexión de los entonces pequeños asentamientos poblacionales ubicados al Este del Centro con éste y con el resto de la ciudad. La actuación de modificación y ampliación del Puerto se convirtió así en el desencadenante de la mayor transformación de la ciudad, al menos en los tiempos modernos.

Figura nº3. Plano de Málaga de 1880, realizado por L. Thuillier. (Fuente: Archivo Municipal de Málaga

Figura nº4: Plano general de la prolongación de la Alameda y establecimiento del "Parque" (Fuente: Archivo Municipal de Málaga)

El Eje Litoral Soterrado, sobre el que ya en la década de los 2000 se habían planteado actuaciones parciales (Av. de Cánovas e inicio del Paseo Marítimo Pablo R. Picasso), era el elemento más novedoso y ambicioso en el Informe elaborado por este mismo autor en 2019, que dio origen al Plan Málaga Litoral.

Desde entonces, se han elaborado sendos estudios encaminados a analizar, el primero de ellos (Estudio de alternativas de soterramiento en el tramo del Paseo de los Curas del Vial Litoral, julio 2020, ARCS), las posibles alternativas para la sección del soterramiento y los trazados alternativos en el tramo entre la Plaza de la Marina y la Avenida Cánovas del Castillo; y, el segundo de ellos (Estudio de alternativas de ordenación viaria del Eje Litoral Soterrado, junio 2021, ARCS), las alternativas de ordenación viaria tras el soterramiento del Eje Litoral, lo que ha requerido avanzar en la definición geométrica de éste y sus accesos.

Para ello, los estudios parten de los objetivos principales que se han recogido en el apartado 2.3 de este documento. A estos objetivos se ha incorporado, como condicionante para la organización de la movilidad en el área central, la restricción al uso exclusivo del eje Alameda – Parque por parte del transporte público y de los vehículos autorizados.

El Estudio de 2020, concluye que la sección considerada como más adecuada para su implantación bajo el viario existente es aquella formada por dos niveles superpuestos con dos o tres carriles por sentido, en función de la demanda de cada subtramo. La sección con niveles superpuestos facilita, desde ambas márgenes del túnel, la disposición de accesos intermedios y conexiones con el intercambiador y aparcamientos, existentes y futuros. Asimismo, la disposición en niveles superpuestos permite reducir la ocupación en planta, lo que posibilita menores afecciones durante las obras (a usuarios, a comercios, a empresas de servicios, etc.) y ofrece ventajas para la disposición del túnel en el Paseo de los Curas, evitando la afección a las hileras arboladas y dejando libre de obras la calzada más próxima al parque. Además, la menor ocupación en planta facilita la organización de la obra y de los desvíos de tráfico necesarios para su ejecución.

En este mismo Estudio de 2020 y como consecuencia de un análisis comparado de los trazados propuestos, sus afecciones, ventajes a inconvenientes, se deduce que tanto la solución por el Paseo de los Curas como la propuesta por el Paseo del Parque son viables. No obstante, se concluye como solución más adecuada el soterramiento del Eje Litoral bajo la calzada sur del Paseo de los Curas.

En el Estudio de 2021 se analizaron y se plantearon soluciones básicas para los principales elementos y condicionantes que afectan al diseño del túnel, cuestión que ha de ser objeto de trabajos técnicos posteriores.

Como primer parámetro de diseño a considerar se ha establecido la velocidad de proyecto de 50 km/hora, congruente con la autorizada en espacios urbanos, por una parte, y por otra con el objetivo de evitar variaciones en las velocidades de circulación que vendrían derivadas de los condicionantes con los que se ha de enfrentar el trazado en planta. Esta velocidad de proyecto se aplica al trazado del tronco del vial soterrado, para los dos sentidos de circulación que se prevén superpuestos. Asimismo, se ha considerado como vehículo tipo para el diseño el autocar rígido, contando con que se autorizará la circulación de todo tipo de vehículo no calificado como especial. En las rampas de acceso la velocidad se limitará a las condiciones que se presenten en cada caso, particularmente tomando en consideración la incorporación a la circulación en superficie o el desvío desde ésta.

Los trazados en alzado (perfil longitudinal) se adaptan básicamente a las rasantes de los viales actuales, que discurren sensiblemente horizontales. No obstante, se tienen en cuenta los cruces con canalizaciones de servicios, particularmente relacionadas con el drenaje y el saneamiento. Asimismo, se incorporan pendientes longitudinales suficientes para el drenaje superficial de los propios viales soterrados.

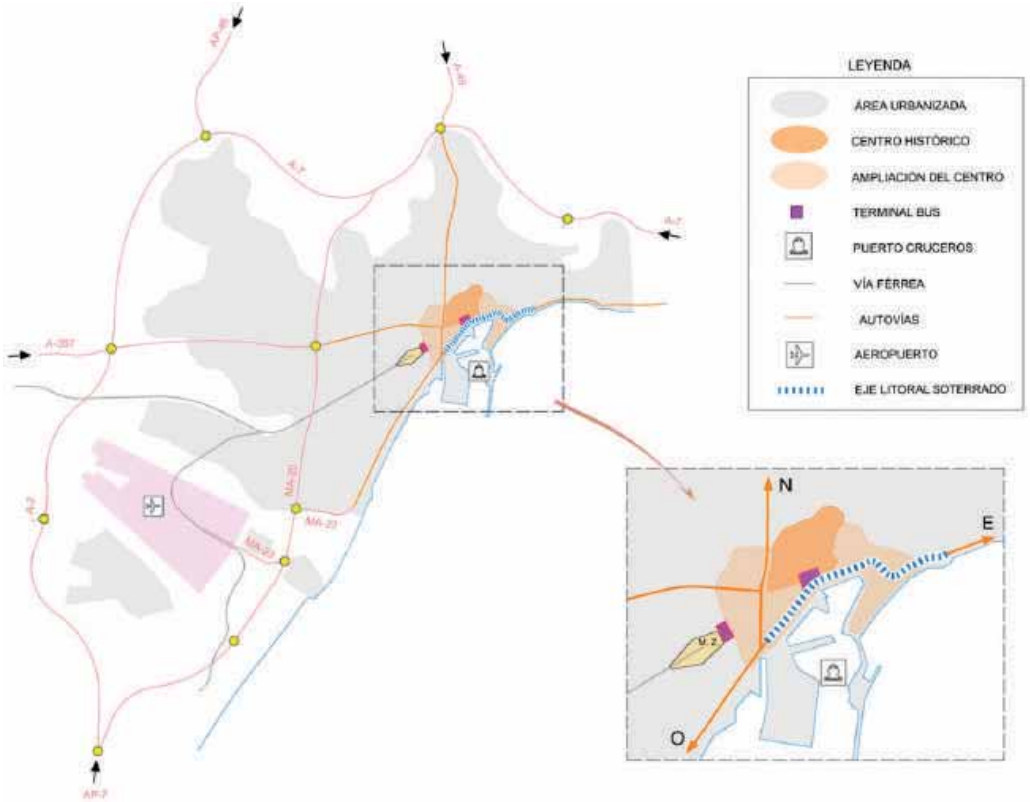


Fig. nº5: Esquema del Plan Málaga Litoral.

Aspecto de particular atención en un caso como el que nos ocupa es el de los gálibos, tanto verticales como horizontales. En el primer aspecto se han tomado en consideración en el presente Estudio los espacios a prever tanto para la señalización como para la ventilación e iluminación. Para proponer dimensiones de anchos de carril y de espacios laterales se ha pretendido establecer dimensiones congruentes con la velocidad autorizada de 50 km/h.

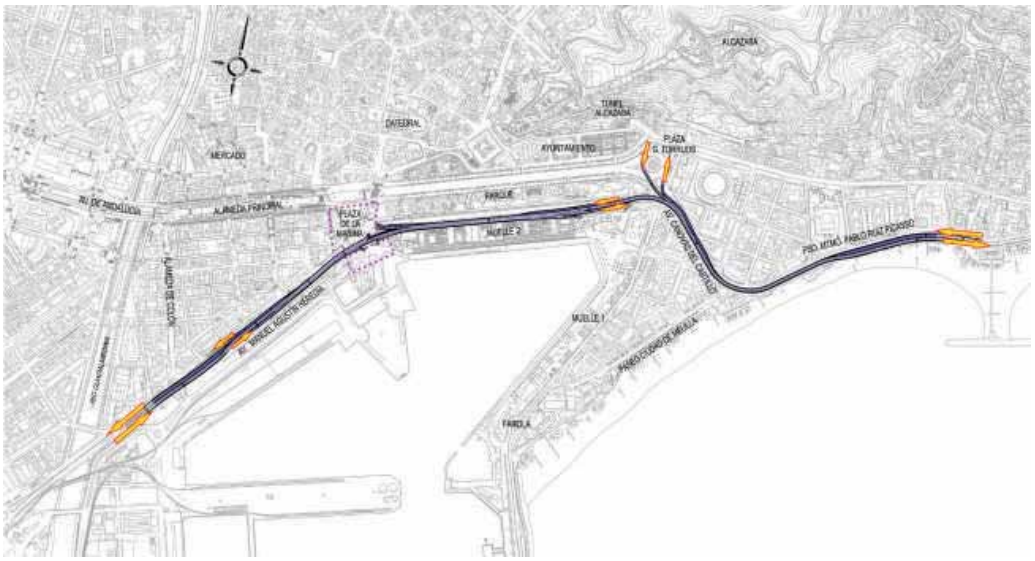


Fig. nº6: Eje Litoral Soterrado (Fuente: Estudio de Junio 2021, ARCS).

La implantación de las rampas de entrada o salida a los viales soterrados se ha cuidado en consideración a su mejor integración en el paisaje urbano y a evitar interferencias con la circulación general. Para ofrecer la mejor continuidad en los flujos de circulación en superficie se plantean los accesos en los dos extremos del Eje Litoral al mismo nivel y paralelos, realizándose bajo rasante la superposición de la calzada de un sentido sobre la otra, quedando la correspondiente al sentido Oeste-Este en el nivel -1, y la inversa en el -2. En general, se consigue la superposición completa de los anchos de las dos calzadas unidireccionales, evitando así sobreanchos inútiles.

Junto con la velocidad, para el diseño de la sección tipo se ha considerado la composición del tráfico, teniendo en cuenta la presencia de vehículos voluminosos (autocares rígidos, autobuses articulados y, en menor medidas, vehículos pesados de carga).

En cuanto a la funcionalidad y seguridad en la operación, se ha estimado la necesidad de disponer de franjas laterales destinadas a cumplir varias funciones: posible detención de un vehículo por avería, flujo de peatones en caso de incidente y operaciones de mantenimiento. En este último aspecto es importante señalar que estas operaciones, por motivos de seguridad de los operarios, requerirán siempre la ocupación del carril más próximo, por lo que no es un aspecto crítico en el diseño de estas franjas laterales.

Finalmente, también se han considerado los elementos de seguridad, señalización y ventilación necesarios para la operación del Eje Litoral Soterrado.

El Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado, tiene por objeto garantizar un nivel suficiente de seguridad a los usuarios en los túneles de la Red de Carreteras del Estado. No es, por tanto, de aplicación directa a la vía soterrada objeto de la presente actuación, al no pertenecer a dicha Red, si bien se considera que debe ser tenido en cuenta lo recogido en este Real Decreto, en las fases de diseño y construcción, en particular todo lo relativo a túneles urbanos.

Para mayor profundidad en el estudio de la sección tipo, también se ha tenido en cuenta la publicación "Dossier pilote des tunnels, 2 Géométrie", del Centre d'Études des Tunnels de Francia.

Atendiendo a todos estos condicionantes, así como a las limitaciones físicas que impone el espacio disponible, los parámetros establecidos en el Estudio de 2021 para las diferentes secciones del túnel (con 2, 3 o 4 carriles por sentido) son:

- Carriles de 3,25 metros.
- Franja lateral derecha de 1,75 metros.
- Franja lateral izquierda de 0,70 metros.
- Gálibo vertical entre losas de 6,00 metros.
- Gálibo vertical libre de 4,20 metros.

En el caso de las rampas de acceso, se establecen los siguientes parámetros:

- Carriles de 3,50 metros.
- Franja lateral derecha de 0,75 metros.
- Franja lateral izquierda de 0,30 metros.
- Gálibo vertical entre losas de 4,50 metros.

Fig. nº7: Secciones tipo del Eje Litoral Soterrado (Fuente: Estudio de Junio 2021, ARCS).

La implantación del túnel en el Eje Litoral es viable bajo la consideración de los siguientes condicionantes:

- Aspectos geotécnicos – estructurales (detallados más adelante).
- Continuidad del freático: el Eje Litoral Soterrado, semiparalelo a la línea de Costa, intercepta los flujos subálveos.
- Evacuación de aguas procedentes de escorrentías superficiales y filtración.
- Edificaciones y otras construcciones próximas al Eje Litoral.
- Consideración de los accesos intermedios (Muelle Heredia – Alameda de Colón y Plaza de Torrijos) y conexión con la nueva terminal de transporte de la Plaza de la Marina y con el aparcamiento subterráneo de la esquina de los Muelles 1 y 2.
- Vegetación singular y zonas arboladas en hilera en Plaza de la Marina, Paseo de Los Curas y Plaza de Torrijos.
- Evacuación de aguas procedentes de escorrentías superficiales y filtración.
- Redes de servicios: siendo las redes de saneamiento y pluviales las más críticas.
- Coordinación con otras obras municipales en fase de diseño.
- Consideración de los límites administrativos de dominio público (Puerto y Costas).

A partir de estos condicionantes y consideraciones, se elabora un diseño en planta y alzado a partir del encaje de la sección tipo bajo el viario existente.

Fig. nº8: Eje Litoral Soterrado bajo el Paseo de Los Curas (Fuente: ARCS).

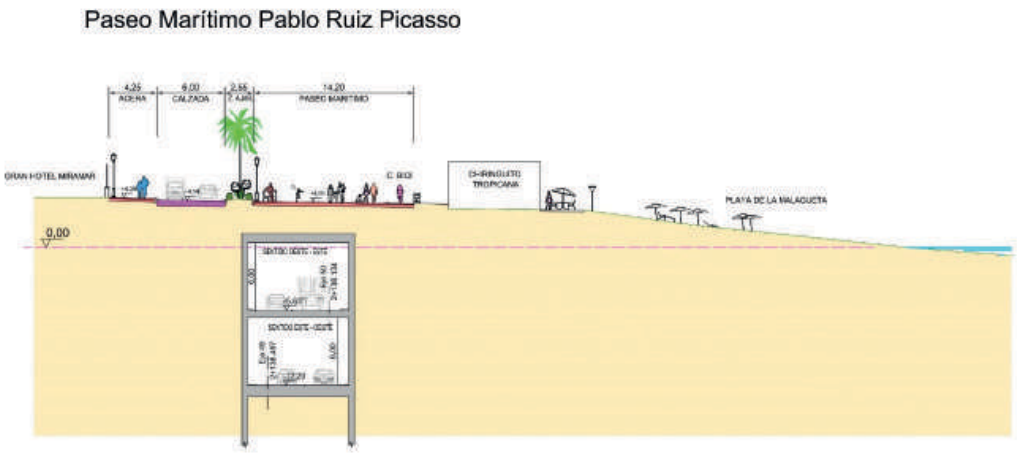


Fig. nº9: Eje Litoral Soterrado bajo el Paseo Marítimo Pablo Ruiz Picasso (Fuente: ARCS).

El trazado del Eje Litoral Soterrado trascurre por dos dominios geológicos bien diferenciados:

- Guadalmedina – Plaza de la Marina: materiales tipo suelo, pliocenos arcillosos y cuaternarios aluviales y marinos, correspondientes al relleno de la Cuenca Neógena de Málaga.
- Plaza de la Marina – P.M. Pablo Ruiz Picasso: este tramo se caracteriza por un substrato rocoso constituido por filitas y grauwacas carboníferas del Complejo Maláguide, sobre el que se disponen suelos cuaternarios.

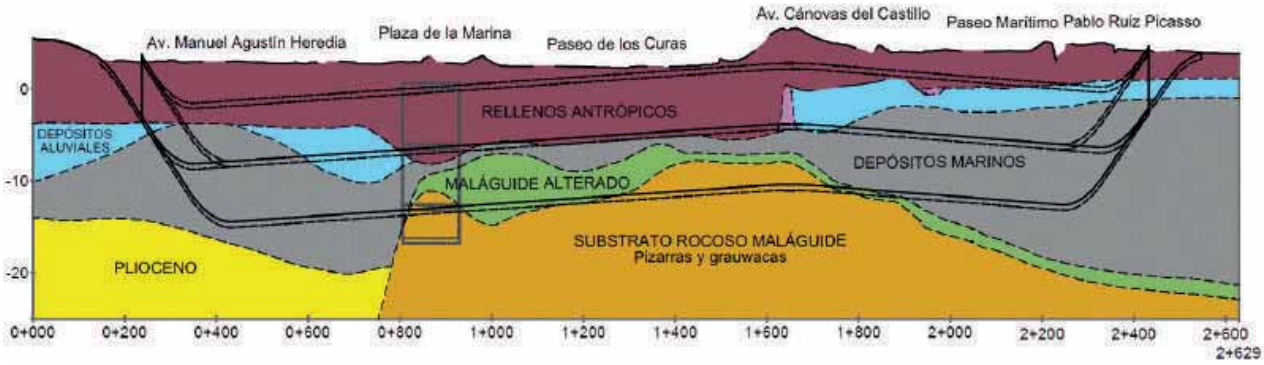


Fig. nº10: Esquema geológico del Eje Litoral Soterrado (Fuente: ARCS).

Ambos sectores presentan un recubrimiento continuo de rellenos antrópicos heterogéneos, correspondiente al desarrollo urbano de la ciudad, con espesores comprendidos entre 4-12 metros, correspondientes a etapas históricas relativamente recientes.

La geometría de las rampas intermedias condiciona el diseño longitudinal del túnel, requiriendo reducir la montera hasta el mínimo requerido para la reposición de los servicios afectados, en especial colectores de saneamiento y pluviales. La reducida montera resultante desaconseja emplear métodos constructivos de excavación en mina o mediante tuneladoras, resultando como más ventajoso el método cut&cover, mediante la ejecución de muros-pantalla y losa de cubrición. Este método permite restituir la funcionalidad en la superficie mientras se continúa con la ejecución del túnel bajo la losa, reduciendo así las afecciones durante las obras. También hace posible sectorizar la obra, colaborando en flexibilizar los desvíos de tráfico y en reducir los plazos estimados para su ejecución.

Los muros-pantalla deben empotrarse en el terreno a una profundidad tal que garantice la estabilidad estructural de los mismos y del fondo de la excavación, con atención especial a posibles fenómenos de sifonamiento, erosión interna y levantamiento de fondo por acumulación de presiones intersticiales.

Pueden distinguirse dos tipos de problemáticas geotécnicas previsibles:

- Deformaciones de los elementos de contención.
- Infiltración del agua freática y alteraciones en las leyes de presiones.

Ambas problemáticas tienen como elemento común la naturaleza del terreno y su estado. La respuesta de las pantallas frente a los empujes estará directamente relacionada con la granulometría y la densidad relativa, además de la permeabilidad, dependiente de los anteriores parámetros. El caudal de infiltración bajo el pie de las pantallas dependerá de la permeabilidad y la posición del nivel freático, así como del ancho y la profundidad de la excavación.

Los posibles tratamientos del terreno a considerar serán los tapones de fondo y estampidores ejecutados bajo el fondo de excavación mediante jet-grouting, así como los bataches de hormigón armado para anclaje y acortamiento de la luz del tapón de fondo.

Dadas las características del túnel que se proyecta (longitud, sección, accesos) y las especiales condiciones de operación (caracterización del tráfico, velocidad, etc.), se requerirá el diseño de las instalaciones necesarias para el permanente control y vigilancia de la infraestructura, para lo que será necesario disponer de una sala de control donde se reciba y tramite la información. Se enumeran a continuación las principales instalaciones a disponer en el Eje Litoral Soterrado:

- Iluminación: a parte de la iluminación normal, se dispondrá una iluminación de seguridad en caso de avería del sistema normal y una iluminación de emergencia en caso de evacuación. Se opta por la tecnología LED y el control automatizado del grado de iluminación.
- Ventilación: con el objetivo de mantener las condiciones ambientales a partir de la monitorización de los niveles de Nox y CO. En caso de emergencia, asegurar las condiciones adecuadas para la evacuación. Contempla también la presurización de las salidas de emergencia y la climatización de cuartos técnicos.
- Suministro de Energía: se deberá de prever al menos la conexión con dos puntos de suministro de energía que, de forma independiente, tengan capacidad para hacer frente a la demanda que se establezca como base para el funcionamiento en caso de incidente. Además, se deberá estudiar la posible instalación de generadores de emergencia y equipos SAI (sistemas de alimentación ininterrumpida) que garanticen el servicio hasta el restablecimiento del funcionamiento normal.
- Detección y extinción de incendios: estrechamente relacionado con el punto anterior, el túnel deberá disponer también de instalaciones que permitan la detección (sensorización) y la extinción (extintores, BIEs) de un incendio.
- Señalización y salidas de emergencia: teniendo en cuenta la longitud del Eje Litoral soterrado (unos 2,5 km), así como las altas demandas de tráfico a atender, se considera necesario habilitar pozos de servicio con salida directa a la superficie, distanciados convenientemente.
- ITS – Gestión del tráfico: con el objetivo de poder establecer en cualquier momento medidas activas de control sobre el flujo que circula por el interior de los túneles, será preciso prever la instalación de:
    - Sistema CCTV (circuito cerrado de televisión).
    - Señalización y balizamiento de emergencia: semáforos, barreras, paneles de señalización variable, control de gálibos, etc.
    - Aforadores de tráfico, control de velocidad, etc.

- Comunicaciones: se garantizará en todo momento que sea posible establecer comunicación entre los distintos participantes en la gestión del túnel: centro de control, equipos de emergencia, equipos de explotación, equipos operativos del Ayuntamiento y otros. Además, se deberá posibilitar la comunicación entre usuarios y centro de control en caso de incidente.

Finalmente, deberá analizarse la posibilidad de incorporar al diseño del túnel elementos de auscultación de la obra civil, que permitan detectar, por ejemplo, filtraciones de agua, asientos diferenciales, etc.

4. IMPACTOS DE LA ACTUACIÓN.

La ejecución del Eje Litoral Soterrado como elemento estructurante del Plan Málaga Litoral colaborará en alcanzar los objetivos planteados, trasladándose los beneficios a los usuarios directos, en forma de reducción de tiempos de recorrido y costes del desplazamiento y en aumento de la seguridad y el confort; y al resto de la sociedad, mediante la generación de nuevos espacios peatonales y verdes, la eliminación del efecto barrera ocasionado por el importante volumen del tráfico actualmente en superficie y la significativa reducción de las externalidades del transporte (polución, congestiones, ruido, etc.).

Aparecen también otros efectos derivados del importante conjunto de actuaciones previsto en el Plan Málaga Litoral, tales como la integración definitiva de la ciudad con el litoral al eliminarse la principal "barrera" que ahora los separa, la reordenación de la playa de La Malagueta como una unidad servida por un nuevo Paseo Marítimo dotado de la amplitud y tratamiento adecuados, la creación de una solución de continuidad que ofrezca la salida del Parque al mar que se preconizaba cuando se creó, la ampliación del Parque sobre el actual vial Paseo de los Curas uniéndolo de manera continua con el Palmeral de las Sorpresas (muelle 2), la limitación al transporte público del eje Alameda – Parque, la posibilidad de peatonalización parcial de calles como Córdoba, Puerta del Mar y Atarazanas y algunas otras adicionales.

En la siguiente figura puede observarse el resultado que se espera alcanzar con la ejecución del Eje Litoral Soterrado, en lo que se refiere a la reducción de los efectos nocivos del tráfico en superficie, como son la intrusión visual, el ruido, la polución y el efecto barrera.

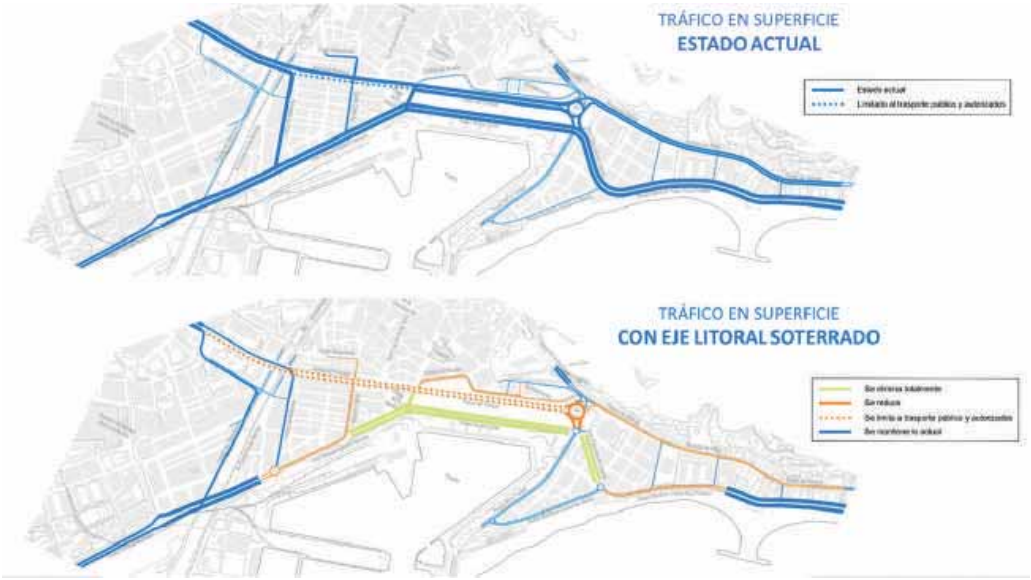


Fig. nº11: Tráficos en superficie ANTES y DESPUÉS del Eje Litoral Soterrado (Fuente: ARCS).

La ejecución de las actuaciones contempladas en el Plan Málaga Litoral, especialmente el Eje Litoral Soterrado y las actuaciones de reurbanización a él asociadas, permitirán recuperar 64.700 m2 que actualmente son superficies mayoritariamente destinadas a calzadas. El desglose por zonas de estos espacios queda reflejado en la siguiente tabla:

Tabla. nº1: Superficies que se incorporan al uso peatonal o verde (Fuente: Estudio de Junio 2021, ARCS)

Superficies que se incorporan al uso peatonal o verde	
Avenida de M. A. Heredia	15.100 m^2
Plaza de la Marina	10.200 m^2
Paseo de los Curas	17.700 m^2
Plaza General Torrijos y Glorieta Cánovas del Castillo	5.200 m^2
Avenida Cánovas del Castillo	3.400 m^2
P.M. Ciudad de Melilla y P.M. Pablo R. Picasso	13.100 m^2
TOTAL	**64.700 m^2**

En la siguiente imagen se esquematiza la ubicación de las nuevas superficies de uso peatonal o verde:

Fig. nº12: Superficies que se incorporan al uso peatonal o verde (Fuente: ARCS).

Para la evaluación de los beneficios obtenidos por los usuarios del Eje Litoral Soterrado, se estima el ahorro logrado, tanto en coste de operación como en tiempos de recorrido, frente a la situación actual del tráfico en superficie. Esta estimación se realiza aplicando distintos valores para los parámetros unitarios de costes de operación por kilómetro y velocidades medias de recorrido para los escenarios "actual" y "con Eje Litoral Soterrado".

De esta manera, con el Eje Litoral Soterrado, los ahorros anuales para los usuarios ascienden a:

Tabla nº2: Ahorros globales generados para los usuarios en el año inicial (Fuente: ARCS).

AHORROS PARA LOS USUARIOS	Eje Litoral Soterrado
En costes de operación	1,9
Por menores tiempos de recorrido	23,1
TOTALES (Mill. € / año)	**25,0**

Por otra parte, los beneficios generados para la sociedad en su conjunto provienen de la reducción de los efectos nocivos de las externalidades del transporte: polución, ruido, congestiones, cambio climático, efectos barrera, etc. De acuerdo con los parámetros estimados por la publicación "Handbook on External Costs of Transport" (Comisión Europea, 2019), se estima en 25,5 millones de euros /año el ahorro generado por menores externalidades del transporte gracias a la ejecución del Eje Litoral Soterrado.

Para la evaluación del beneficio obtenido en un periodo de 25 años desde la puesta en funcionamiento del Eje Litoral Soterrado, se aplica una tasa anual de incremento de la demanda del 0,5%. Por aplicación de esta tasa, se obtienen los ahorros generados tanto para los usuarios como para el conjunto de la sociedad en los primero 25 años de funcionamiento de la infraestructura:

Tabla nº3: Beneficios generados en 25 años con el Eje Litoral Soterrado (Fuente: ARCS).

BENEFICIOS GENERADOS EN 25 AÑOS (Mill. €)	Eje Litoral Soterrado
Ahorros para los usuarios	664
Reducción de costes externos del transporte	677
TOTALES (Mill. €)	**1.341**

Para mitigar los posibles efectos negativos que la ejecución de las actuaciones contempladas en el Plan Málaga Litoral, y en especial del Eje Litoral Soterrado, es imprescindible llevar a cabo una adecuada programación de las obras, con plazos acordes a los rendimientos previstos y con un exhaustivo análisis en fase de proyecto que permita identificar todos los posibles elementos y cuestiones que pudieran suponer una alteración del plazo previsto, previendo planes de contingencia para afrontar dichas alteraciones.

Uno de los aspectos clave en la construcción del Eje Litoral Soterrado es la planificación de los desvíos de tráfico durante la ejecución de las obras, de forma que se asegure una correcta continuidad del flujo en condiciones similares de capacidad y seguridad a las actuales. La consideración de estos aspectos en las fases iniciales de concepción y diseño de la infraestructura colabora significativamente a la reducción de afecciones al entorno, tanto en superficie de ocupación como en plazos de ejecución.

Así, la disposición superpuesta de las calzadas del Eje Litoral Soterrado en dos niveles permite reducir considerablemente la superficie de ocupación, habilitando mayores espacios para el mantenimiento del tráfico. De igual forma, la propuesta reflejada en la siguiente figura permite que del orden del 80% del soterramiento se ejecute sin interferencias con los flujos de tráfico, lo que posibilitará un mayor rendimiento en su construcción y, por tanto, menores plazos.

Otro elemento de sustancial relevancia en los plazos constructivos es la existencia de restos arqueológicos en la traza de la obra. En el caso del Eje Litoral Soterrado, que discurre mayoritariamente por terrenos ganados al mar en los últimos 100 o 200 años, no son previsibles afecciones de este tipo.

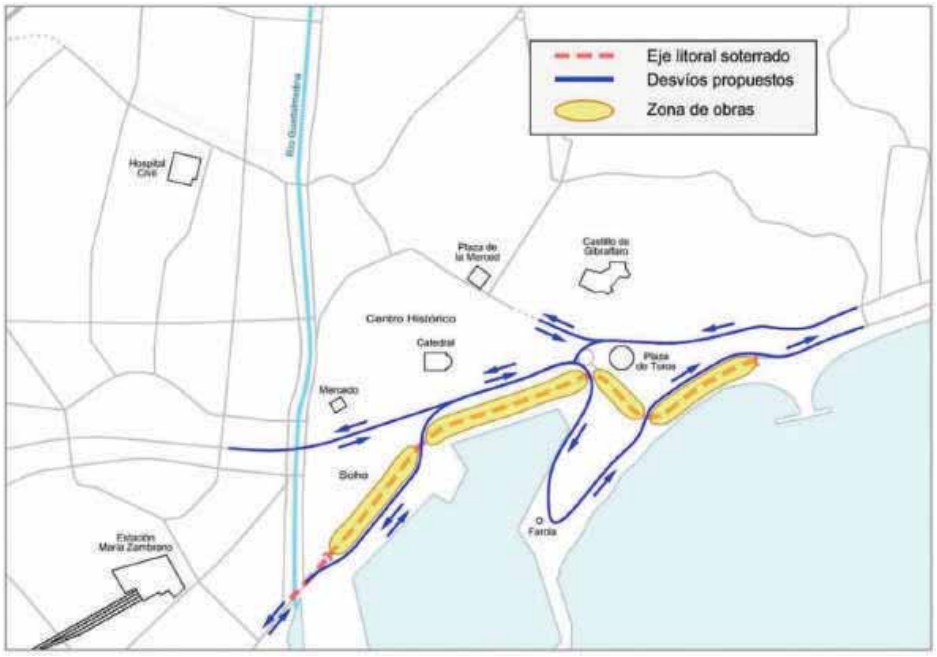


Fig. nº13: Esquema de desvíos y zonas de obras (Fuente: ARCS).

La ejecución del Plan Málaga Litoral colaborará significativamente en la integración definitiva Ciudad – Litoral, mediante la completa supresión del efecto barrera ocasionado por el tráfico actual en superficie.

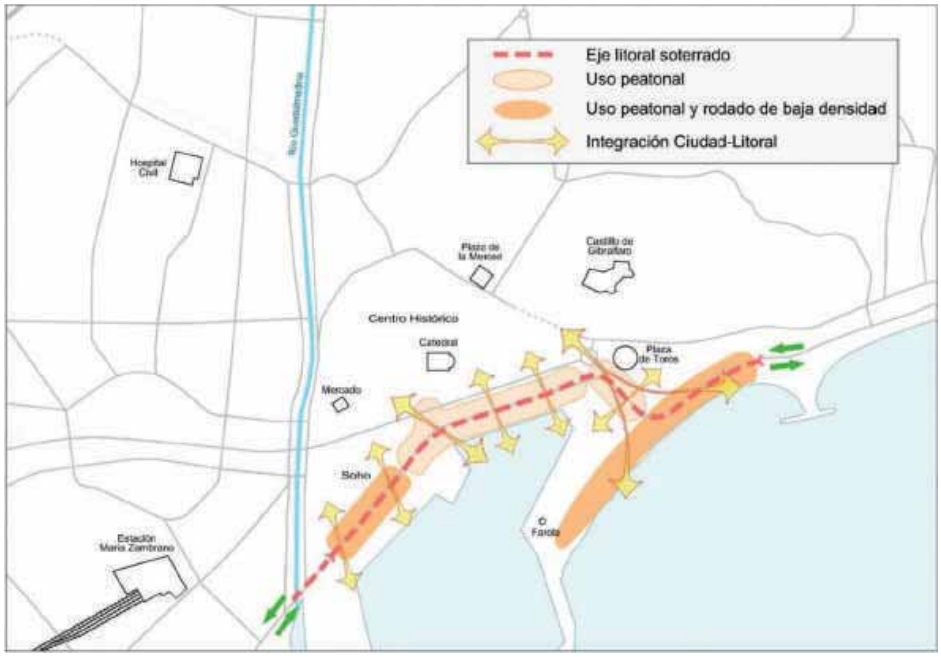


Fig. nº14: Mejora de la integración Ciudad – Litoral (Fuente: ARCS).

Cabe destacar a continuación otros impactos positivos que la ejecución del Plan Málaga Litoral permitirá alcanzar:

- Reducción de la intrusión visual por la presencia del flujo vehicular en superficie.
- Reducción del volumen de gases emitidos como consecuencia de la mayor homogeneidad y continuidad del flujo de tráfico en el interior del soterramieto, posibilitando además el tratamiento de estos antes de su liberación a la atmósfera, colaborando así de forma principal con los objetivos del Área Central de Bajas Emisiones.
- Oportunidad para nuevas fórmulas de gestión del tráfico en el Área Central.
- Reducción significativa de los niveles de ruido generados por el tráfico en el Área Central.
- Mejora sustancial de la seguridad viaria, tanto para los vehículos como para peatones y ciclistas, gracias a la supresión de cruces de peatones semaforizados, a la eliminación de tramos de convivencia peatón – calzada y a la creación de más de 6 km de nuevos carriles ciclistas.
- Plena integración entre los sectores del barrio de la Malagueta por la supresión del tráfico en la Av. Cánovas.
- Reactivación de la economía y potenciación de los atractivos para la generación de nuevas actividades.
- Creación de puestos de trabajo, tanto en fase de construcción (2.500 sólo el Eje Litoral Soterrado) como en fase operativa.

5. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PLAN MÁLAGA LITORAL.

A continuación, se incluye la información disponible sobre la evaluación económica de las actuaciones contempladas en el Plan Málaga Litoral, a partir de los estudios y análisis que se han venido realizando desde 2019 por los distintos equipos técnicos que han participado en su elaboración.

Las valoraciones reflejadas deben considerarse como estimaciones iniciales fundamentadas en los estudios realizados hasta la fecha, sin menoscabo de que en estudios más avanzados pudieran verse modificadas.

Tabla nº4: Valoración económica del Plan Málaga Litoral (Fuente: Ayuntamiento de Málaga).

ACTUACIÓN	Coste sin IVA
(millones €)	15.100 m^2
Área de bajas emisiones	5
Intercambiador Explanada de la Estación	63
Intercambiador La Marina	44
Eje Litoral Soterrado (Solución A)	162
Zonas verdes y espacios libres	33
Aparcamientos (residentes y rotación)	42
Tratamiento y Reutilización de aguas	16
Total	**365**

En el caso de que el Plan Málaga Litoral no llegara a realizarse, pero se mantuvieran los crecimientos poblacionales a que nos venimos refiriendo, el agotamiento que ya se presenta en la oferta de espacios de centralidad, así como en la capacidad de las terminales de autobuses, se vería incrementado de manera muy significativa, lo que, probablemente, se traduciría en algunas formas de "expulsión" de los autóctonos de esos espacios o, al menos, de seria perturbación de su uso. Resulta así ineludible abordar actuaciones del tipo del Plan Málaga Litoral, cuyos objetivos se orientan prioritariamente al servicio de los habitantes de Málaga y de su provincia, incrementando paralelamente los atractivos para visitantes e inversores, en un marco de equilibrio de intereses y beneficios.

Como ya se ha expuesto en apartados anteriores, los beneficios económicos, ambientales y sociales que se espera obtener de la realización del Plan Málaga Litoral dejarían de conseguirse en caso de que no se llevara a cabo, lo que repercutiría en un sensible freno a la mejora de la calidad de vida y al desarrollo en favor de las nuevas generaciones. Solamente en lo referente al nuevo Eje Litoral Soterrado, el coste de no actuar supondría que se dejarían de ahorrar por los usuarios entre 25 y 46 millones de euros cada año, amén de otras deseconomías por externalidades no evitadas y otros efectos negativos. El Plan Málaga Litoral viene también a ofrecer continuidad en los procesos de renovación urbana en los que Málaga ha trabajado intensamente en las últimas décadas; su no realización se traduciría en un estancamiento, si no parálisis, en esos avances.

6. CONCLUSIONES.

El Plan Málaga Litoral, en proceso avanzado de definición técnica y económico-financiera, es una propuesta que se presenta a la sociedad y a las administraciones públicas con competencia en las materias tratadas, para promover el desarrollo conjunto de las mismas. Es un Plan global que incorpora diversas actuaciones coordinadas, que se justifican y apoyan entre sí, y que requieren la ejecución de todas ellas, dentro de un plan de etapas adecuado a las características y servicios de cada una de ellas.

Es un Plan VIABLE técnicamente, no obstante la importancia de las actuaciones programadas, es EJECUTABLE sin especiales problemas y en plazos razonables, presenta altos BENEFICIOS para la población, tanto a nivel de cada individuo como socialmente, y resulta FINANCIABLE tanto en base a los ingresos directos que puede proporcionar la operación de algunos de sus elementos como mediante aportaciones de fondos públicos de diversa procedencia. Se trata, pues, de un Plan SOSTENIBLE y plenamente acorde a los objetivos que en la actualidad se persiguen en las sociedades avanzadas. Así pues, se pueden mantener las favorables conclusiones del Informe de 2019 elaborado por este autor, reforzadas, si cabe, por las nuevas informaciones y datos disponibles que permiten afianzar las hipótesis y propuestas realizadas entonces.

EL DISEÑO DE LA MOVILIDAD EN TUNELES URBANOS

David Soler Grima
Socio y Director de proyectos de DOyMO

A medida que las ciudades se humanizan y el concepto de movilidad activa sin barreras y sostenibilidad ambiental constituye el patrón del desarrollo, los túneles urbanos diseñados para mejorar la capacidad o conectividad del tráfico motorizado han dejado de tener sentido.

Actualmente, la congestión se acepta como herramienta de gestión del tráfico, se gestiona y es un instrumento de potenciación de los modos alternativos de movilidad y de las nuevas formas de gestionar los flujos a través de las nuevas tecnologías de la información y el big data.

Los túneles urbanos que se estan diseñando en estos momentos en las ciudades del primer mundo se proyectan para proporcionar espacios de calidad al resto de modos de transporte, a la movilidad activa y generar ciudad vital y eficiente, parques, corredores cívicos de movilidad, etc.

Por estos túneles urbanos (túnel Glorias o A5) se prohíbe el paso a los modos vulnerables porque se ha generado un amplio espacio público en superficie con toda la prioridad para los mismos, el tráfico privado motorizado, es el que utiliza el túnel para su desplazamiento.

Los retos de este nuevo diseño, donde la movilidad de ciudad y sus redes de transporte sostenible (a pie, bici, transporte público, servicios al ciudadano, carga y descarga, seguridad, residuos) estan en superficie, se basan en:

a. Ser capaces de dimensionar de forma precisa la posición de las bocas, afectando lo mínimo posible al entorno.

b. Proporcionar un número y una forma a las conexiones con la superficie integradas, minimizando el impacto y tratando de que todo el túnel funcione como un conjunto en el caso de que haya más de una salida o entrada.

c. Dimensionar un sistema de canalización y tratado de emisiones que permita minimizar todo lo posible el impacto ambiental y que su mantenimiento también sea sostenible.

MOBILITY DESIGN IN URBAN TUNNELS

As cities become more humanised and the concept of barrier-free active mobility and environmental sustainability becomes the pattern of development, urban tunnels designed to improve motorised traffic capacity or connectivity no longer make sense.

Today, congestion is accepted as a traffic management tool, it is managed and is an instrument to promote alternative modes of mobility and new ways of managing flows through new information technologies and big data.

The urban tunnels currently being designed in first world cities are designed to provide quality spaces for other modes of transport, active mobility and to generate vital and efficient cities, parks, civic mobility corridors, etc.

In these urban tunnels (Glorias or A5 tunnels), vulnerable modes of transport are prohibited because a large public space has been created on the surface with full priority for them, while private motorised traffic uses the tunnel for its movement.

The challenges of this new design, where city mobility and its sustainable transport networks (walking, cycling, public transport, citizen services, loading and unloading, security, waste) are on the surface, are based on:

a. Be able to precisely dimension the position of the nozzles, affecting the environment as little as possible.
b. Provide a number and shape to the integrated surface connections, minimising the impact and trying to make the whole tunnel work as a whole in case there is more than one exit or entrance.
c. Design a system for channelling and treatment of emissions that minimises the environmental impact as much as possible and that its maintenance is also sustainable.

CONCEPTION DE LA MOBILITÉ DANS LES TUNNELS URBAINS

À mesure que les villes s'humanisent et que le concept de mobilité active sans obstacles et de durabilité environnementale devient le modèle de développement, les tunnels urbains conçus pour améliorer la capacité ou la connectivité du trafic motorisé n'ont plus de sens.

Aujourd'hui, la congestion est acceptée comme un outil de gestion du trafic, elle est gérée et constitue un instrument pour promouvoir des modes de mobilité alternatifs et de nouvelles façons de gérer les flux grâce aux nouvelles technologies de l'information et au big data.

Les tunnels urbains actuellement en cours de conception dans les villes du premier monde sont destinés à offrir des espaces de qualité aux autres modes de transport, à la mobilité active et à générer des villes vitales et efficaces, des parcs, des corridors de mobilité civique, etc.

Dans ces tunnels urbains (tunnels Glorias ou A5), les modes de transport vulnérables sont interdits car un grand espace public a été créé en surface avec une priorité totale pour eux, tandis que le trafic motorisé privé utilise le tunnel pour sa circulation.

Les défis de cette nouvelle conception, où la mobilité de la ville et ses réseaux de transport durable (marche, vélo, transports publics, services aux citoyens, chargement et déchargement, sécurité, déchets) sont à la surface, sont fondés :

a. Pouvoir dimensionner avec précision la position des buses, en affectant le moins possible l'environnement.
b. Donner un nombre et une forme aux connexions de surface intégrées, en minimisant l'impact et en essayant de faire fonctionner l'ensemble du tunnel comme un tout au cas où il y aurait plus d'une sortie ou entrée.
c. Concevoir un système de canalisation et de traitement des émissions qui minimise autant que possible l'impact sur l'environnement et dont l'entretien est également durable.

1. REFLEXIÓN PREVIA

Cuando me ofrecieron la posibilidad de exponer alguna idea o concepto relacionado con mi experiencia en proyectos relacionados con túneles en la 2ª Conferencia Internacional sobre Túneles de Granada, me surgió la necesidad de pensar por qué me habían invitado y como podría ser interesante mi intervención ante este fantástico elenco de profesionales de todo el mundo con gran experiencia y reputación en la construcción, equipamiento, explotación de túneles, etc.

Entendí pues, que esta invitación, estaba relacionada con mi experiencia en la movilidad en el diseño de túneles urbanos, no solo des del punto de vista del túnel, sino también des del punto de vista de lo que pasa encima y alrededor del túnel.

La idea pues, es intentar dar unas pinceladas de como se analiza lo que pasa en el exterior y en los alrededores del túnel (mirándolo des de arriba, como si fuéramos montados en un dron), en lugar de analizar lo que pasa en su interior, ya que lo realmente interesante es como varia el funcionamiento de una ciudad en su superficie y en la zona de las bocas, rampas de entradas y salidas del túnel, etc.

Con todo ello, me gusta explicar que nuestra misión como ingenieros civiles en nuestras ciudades es, hacer túneles urbanos, pero no para que funcionalmente ayuden a mejorar el tráfico de vehículos privados, sino para dotar a la ciudad de parques, zonas verdes, equipamientos públicos, de convivencia, es decir espacios para las personas.

Imagen del proyecto "Canopia Urbana" sobre el túnel de la Plaza de Les Glòries. Barcelona

En definitiva, los proyectos de túneles urbanos necesitan pues de expertos en la planificación y gestión de la movilidad urbana que conozcan las problemáticas, los objetivos y las necesidades de las ciudades donde se proyectan, y su aportación, es fundamental. Tanto es así, que la redacción del proyecto no puede iniciarse desarrollarse si no se tiene clara la movilidad del túnel y de su zona de influencia en superficie.

De estos análisis destaca la importancia de las modelizaciones de movilidad de las ciudades, dado que un túnel urbano puede suponer cambios importantes en una ciudad. Para ello se utilizan sistemas de simulación dinámica que permitan tomar decisiones sobre el uso de las redes de movilidad de la ciudad.

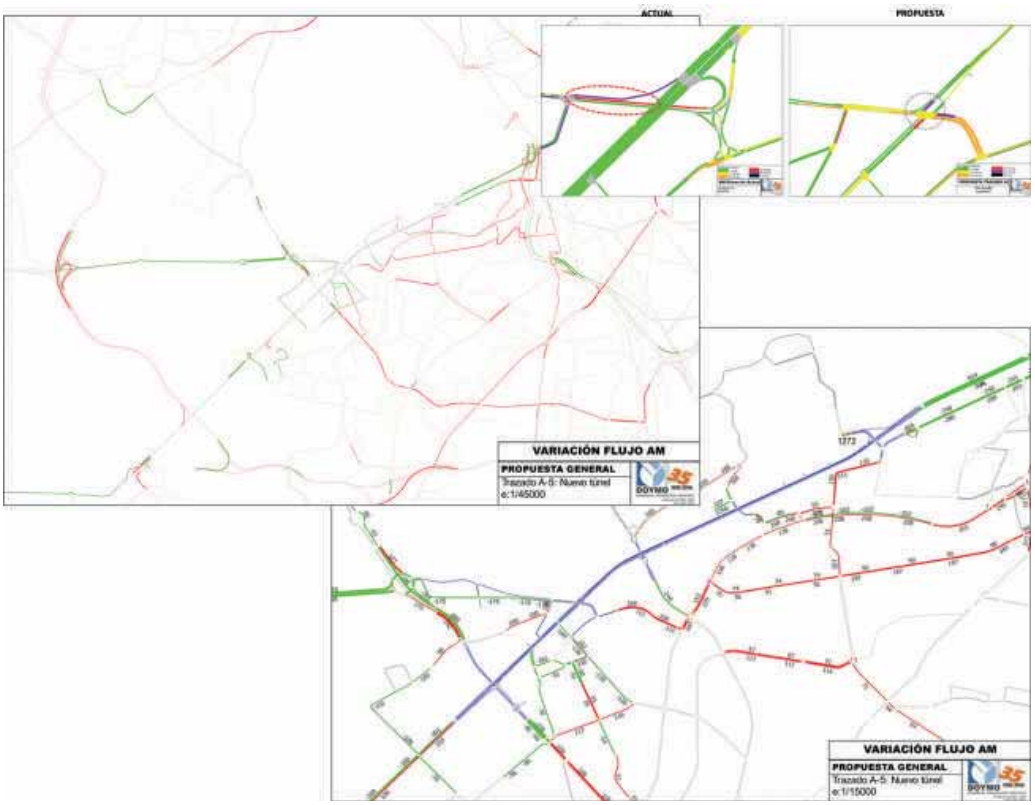


Imagen modelización de la movilidad de los efectos del túnel de la A5. Madrid.

2. CONCEPTOS GENERALES

A medida que las ciudades se pacifican o humanizan y el concepto de movilidad activa sin barreras y de sostenibilidad ambiental constituye el patrón del desarrollo, los túneles urbanos diseñados para mejorar la capacidad o conectividad del tráfico motorizado han dejado de tener sentido.

Por ello, la principal "idea fuerza" de mi intervención se basa en que el túnel urbano se diseña y construye pensando en el peatón, no en el vehículo.

Actualmente, la congestión se acepta como herramienta de gestión del tráfico, se planifica teniendo en cuenta y es un instrumento de potenciación de los modos alternativos de movilidad y de las nuevas formas de gestionar los flujos a través de las nuevas tecnologías de la información y el big data.

Los túneles urbanos que se están diseñando y se diseñaran en las ciudades del primer mundo se proyectan primordialmente para proporcionar espacios de calidad al resto de modos de transporte, a la movilidad activa y generar ciudad vital y eficiente, parques, corredores cívicos de movilidad, etc.

Con esta idea intentaré describir someramente algunos parámetros básicos de diseño de un túnel urbano y todo lo que hay que tener en cuenta a su alrededor des del punto de vista de la movilidad de la ciudad.

Imagen de gestión de la congestión en la entrada del túnel de la Plaza de Les Glòries en Barcelona

Para ello, explicaré algunas de las experiencias más determinantes de los últimos proyectos en los que he participado: túnel de Glòries (ya en funcionamiento), de la estación del AVE de Sagrera y de la Ronda de Dalt en Barcelona, soterramiento del Paseo Extremadura, A5 en Madrid y el túnel del eje litoral centro de Málaga.

En definitiva, por estos túneles urbanos, se canaliza el tráfico motorizado y se prohíbe el paso a los modos activos, mientras que en superficie se maximiza todo lo posible el espacio público y se limita el paso del tráfico motorizado privado.

Imagen del "Plan Málaga Litoral" sobre el túnel previsto bajo el Paseo de los Curas en Málaga.

El diseño de la movilidad de todo lo que se contempla en el entorno y en el propio túnel considera aspectos conceptuales de vital importancia como son:

- SEGURIDAD VIAL (Safe System)
- INTEGRACIÓN URBANA
- CAPACIDAD
- SOSTENIBILIDAD
- CONECTIVIDAD

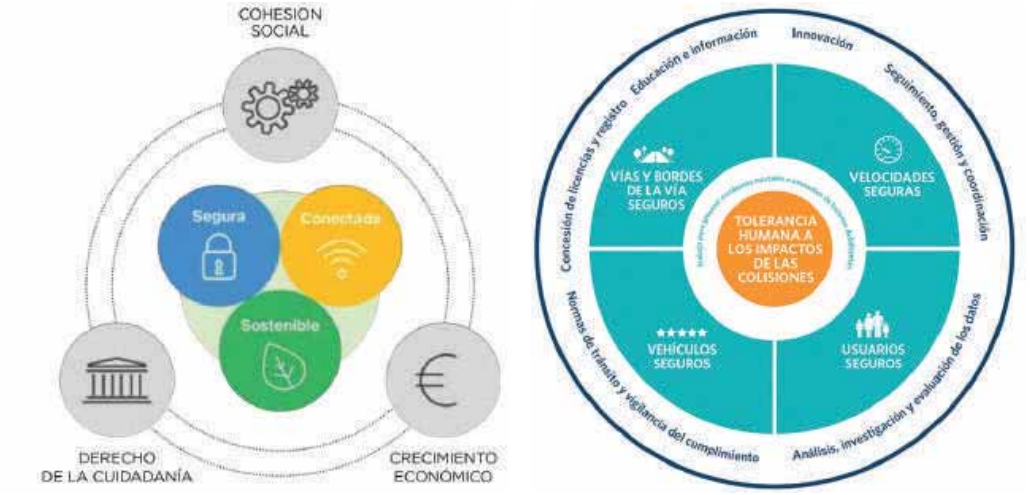


Imagen de los conceptos que influyen en el diseño de la movilidad.

También es objetivo de mi intervención, destacar la interacción entre el túnel y su superficie son los puntos más débiles del sistema y suelen ser elementos de segregación:

- Las bocas del túnel son elementos segregadores para la movilidad peatonal longitudinal y transversal importantes, sobre todo en túneles cortos.
- En túneles largos, las rampas de entrada y salida vuelven a tener efectos similares a los de las bocas.
- Las salidas de ventilación, emergencias, etc. también afectan en el espacio en superficie.

Otra idea fuerza fundamental en el diseño de la movilidad en los túneles urbanos estriba en la importancia que tienen los planes de contingencia en estos túneles, dado que, en función del tipo de incidencia, no solo afecta al funcionamiento de túnel, sino que puede afectar a gran parte de la movilidad de la ciudad.

Los planes de contingencia no solo afectan a la movilidad en vehículo privado en superficie, sino que podrían afectar a las líneas de transporte público que cruzan por encima o por debajo de la traza del túnel y pueden condicionar la movilidad de miles de personas, suponiendo la activación de decenas de programas y acciones de intervención y refuerzo relacionados con la movilidad.

3. ASPECTOS FUNDAMENTALES EN EL DISEÑO DE LA MOVILIDAD

Para el diseño de la movilidad es imprescindible el uso de herramientas de macro y microsimulación que permitan ayudar en el diagnostico de lo que va a ocurrir una vez dimensionado el túnel y su entorno, y que permita emprender acciones en la movilidad de la ciudad tanto para el ámbito del túnel como para el conjunto de la ciudad.

Las simulaciones permiten conocer los puntos débiles de la red viaria y dimensionar las secciones, corredores de transporte, calles y conectividades que permitan desarrollar el proyecto con las máximas garantías de éxito en su funcionalidad.

Imagen del modelo de macrosimulación de la movilidad de Málaga.

Imagen del modelo de microsimulación del ámbito del túnel de eje litoral de Málaga.

3.1. Aspectos relacionados con el diseño de la movilidad sostenible en superficie de la ciudad

Los retos de la construcción del túnel en superficie, donde la movilidad de ciudad y sus cinco redes de transporte son las realmente importantes se basa en ordenar la movilidad de:

1. Red de movilidad peatonal y espacios de para estar.
2. Red de movilidad en bicicleta y de vehículos de movilidad personal, teniendo en cuenta los espacios seguros para aparcar.
3. Red de transporte público, individual (taxi) y colectivo incluyendo sus paradas o estaciones.
4. Red viaria local para los servicios al ciudadano, llegadas al hogar, emergencias, recogida de residuos. También dimensionando las zonas de parada o estacionamiento.
5. Red viaria para la distribución urbana de mercancías y espacios de parada.

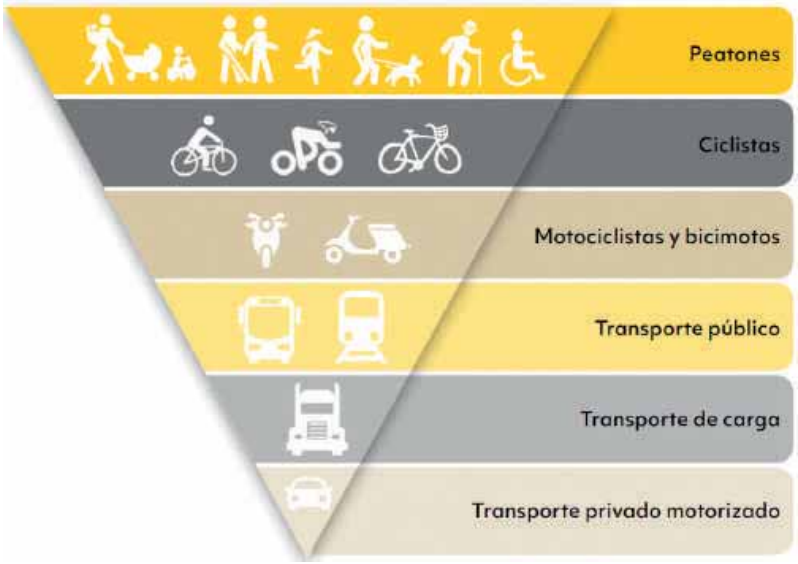


Imagen de la pirámide de priorización de la movilidad sostenible.

El diseño vial debe considerar cuatro aspectos transversales, la seguridad vial (Safe System, la accesibilidad universal, la conectividad y la sostenibilidad ambiental.

Imagen de los aspectos que integran el concepto de movilidad sostenible.

3.1.1. Concepto de sistema seguro

Según la nueva filosofía adoptada por todas las Entidades Internacionales, y encabezada por las Naciones Unidas, el SAFE SYSTEM (SISTEMA SEGURO) prioriza la vida humana sobre cualquier otro interés, enfocando evitar fallecimientos y heridos graves en el plan de Acción Estratégico basado en este sistema seguro.

A este respecto, el enfoque del «Sistema Seguro» implica adaptar la función del túnel y su entorno, de sus calles de aproximación, de su diseño, de su trazado y de los límites de velocidad a los errores humanos, de manera que los posibles accidentes no provoquen muertes ni lesiones graves.

En el momento de diseño hay que evitar los riesgos principales para evitar pues son las velocidades a partir de las cuales existe la posibilidad clara de tener siniestros viales con pérdida de vidas y/o heridos graves:

Imagen representativa de situaciones de riesgo de accidente grave.

Es decir, hay que tener en cuenta que todas las situaciones siguientes conllevan GRAVE RIESGO DE MUERTES:

- Riesgo de atropello de peatón, o usuario vulnerable a 30 km/h o superior
- Riesgo de impacto lateral de un vehículo con objeto adyacente a la vía a 30 km/h o superior
- Riesgo de impacto frontal con objeto adyacente a la vía a 40 km/h o superior
- Riesgo de impacto por alcance a un vehículo a 40 km/h o superior (siendo 40 la diferencia entre la velocidad del vehículo que impacta con el impactado)
- Riesgo de impacto lateral entre vehículos a 50 km/h o superior
- Riesgo de impacto por choque frontal entre vehículos a 70 km/h o superior (siendo 70 la suma de las velocidades de ambos vehículos)

En definitiva, la posibilidad de ocurrir estas situaciones serán las claves para seguir en el desarrollo de los proyectos de movilidad y seguridad vial en túneles y sus entornos.

Lenguaje o interpretación de la red: otro de los aspectos fundamentales a la hora proyectar es asegurar que el lenguaje interpretativo del sistema de movilidad y seguridad vial sea coherente en todo el proyecto, es decir, que todos los elementos que lo componen dispongan de características que sean interpretables de forma natural, por ejemplo:

- Un lenguaje en el pavimento que invite a cada usuario identificar su espacio, sabiendo por ejemplo que una calle pacificada con aceras y asfalto el conductor tiende a ir más deprisa que la misma calle con plataforma única y loseta rayada.
- Una señalización leíble, sin exceso de información y con unas dimensiones adaptadas a la velocidad de cada usuario, ya sea peatón, ciclista, conductor, etc. Priorizando más los gráficos o esquemas que la letra.
- Una solución de enlaces o intersecciones común y uniforme en toda la red de la carretera, con radios de giro, visibilidad, etc.
- Una uniformidad en las soluciones de seguridad vial propuestas, en las distancias de parada o visibilidad, en los gálibos, en la posición de la señalización informativa o elementos de publicidad, etc.

Es decir, se comprobará que el sistema de movilidad y seguridad vial sea fácilmente interpretable y no sobrevenga con sorpresas en el diseño que pudieran llevar a distracciones, sobresaltos o incidentes que pudieran provocar accidentes.

Visión Cero Accidentes

Pensamiento Tradicional	Pensamiento Visión Cero
El hombre se adapta al sistema.	El sistema se adapta a las capacidades humanas.
Diseño para la máxima capacidad y movilidad.	La seguridad no compromete la movilidad.
Focalizarse en los accidentes.	Focalizarse en muertos y heridos graves.
Conducta humana perfecta.	Integrar la falla humana en el diseño.
La responsabilidad recae en el usuario.	Las responsabilidades se comparten entre los que diseñan, administran y mantienen el sistema.
La industria debe ser forzada.	La industria puede ser estimulada.

Imagen Visión Cero

3.1.2. Diseño de la red peatonal

Como se ha introducido con anterioridad, el peatón es el elemento principal del diseño del túnel dado que los espacios que se consiguen en superficie se caracterizan, normalmente para maximizar los espacios verdes para estar y disfrutar de la ciudad.

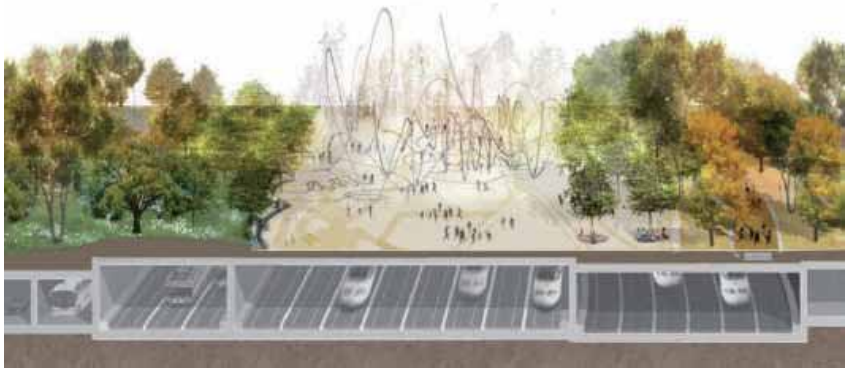


Imagen Parque Lineal estación Ave de Sagrera en Barcelona

Además de ser completamente sensible con los colectivos de personas de movilidad reducida, hay que tener en cuenta que toda persona durante el transcurso de su vida, al menos un 30% de su tiempo precisa de una ciudad adaptada.

Por consiguiente, estos espacios deben disponer de sendas peatonales que cumplan la Orden TMA/851/2021, de 23 de julio, por la que se desarrolla el documento técnico de condiciones básicas de accesibilidad y no discriminación para el acceso y la utilización de los espacios públicos urbanizados y deben conectar los diferentes puntos o polos de demanda peatonales.

- Estaciones de ferrocarril y de autobuses y otros nodos de transporte colectivo.
- Equipamientos comunitarios, como equipamientos sanitarios, educativos, culturales y administrativos.
- Mercados, zonas y centros comerciales.
- Instalaciones recreativas y deportivas.
- Espacios libres con una fuerte frecuentación como zonas verdes, parques urbanos, franja costera y bordes de ríos.
- Áreas de actividad laboral, como polígonos industriales, parques tecnológicos, etc.
- Zonas de alta concentración turística, parques naturales, etc.

La red de itinerarios principales para peatones debe esta correctamente iluminada y definirse en base a criterios que permitan evitar los accidentes de tráfico. A tales efectos:

- Se consideran las calles de uso exclusivo para peatones, las calles de convivencia y las calles de zona 30, en este orden, como espacios idóneos para establecer los itinerarios para los movimientos de los peatones.
- Los ejes en planta de estos itinerarios deben tener un trazado lo más directo y natural posible y, en consecuencia, tanto la reordenación de los cruces como su concepción deben tener en cuenta este criterio.
- En ramblas y paseos centrales destinados a la circulación de peatones, se deben evitar los cambios de trayectoria debidos a la falta de pasos de peatones alineados con el eje principal de la circulación de estos.

Los itinerarios principales para peatones deben proporcionar una total accesibilidad para los usuarios con movilidad reducida. En su caso, esta red accesible se debe coordinar con la del resto de la ciudad.

Los itinerarios principales para peatones tienen que estar coordinados con los itinerarios para transporte público y colectivo, se recomienda que se generen espacios de descanso, que permitan el asiento en condiciones de seguridad vial y personal.

Respecto a los pasos de peatones, todos los itinerarios de peatones deben ser continuos incluso en las intersecciones, se buscará la máxima permeabilidad en los pasos de peatones, fomentando que se construyan siempre todos los posibles en cada intersección.

La visibilidad de la señalización vertical y horizontal y su iluminación nocturna son factores importantes para dar seguridad al paso. Por lo que se refiere a la señalización horizontal, hay que comprobar que no resbale en caso de lluvia y para la señalización vertical, que su situación quede dentro de la elipse de visibilidad tanto del peatón como del conductor del vehículo.

Conviene apuntar la importancia de priorizar el paso de peatones en las intersecciones semaforizas dado que la superficie del túnel debe ser un espacio fundamentalmente para los peatones.

3.1.3. Diseño de la red ciclista y de vehiculos de movilidad personal (VMP)

En superficie, se recomienda que deben existir dos itinerarios que permitan el paso de las bicicletas y los vehículos de movilidad personal:

a. Itinerario de ciudad: Compuesto por un carril bici lo más lineal y directo posible, con el objeto de canalizar la movilidad de conexión de ciudad.

b. Itinerario de paseo: Compuesto por senderos o itinerarios donde poder circular cómodamente, en familia por el interior del parque.

Imagen Parque Lineal estación Ave de Sagrera en Barcelona

La red de itinerarios para bicicletas tiene que asegurar la conectividad con los lugares donde se generen el mayor número de desplazamientos, tienen que ser continuos, formando una red y preferentemente tendrían que discurrir por vías ciclistas segregadas o carriles-bici protegidos, este hecho sirve para separar los flujos de peatones y de bicicletas, que en ocasiones pueden producir fricciones indeseadas.

La red de itinerarios para bicicletas debe preverse conectada con la red de bicicletas del resto del territorio y, en su caso, con la de una zona 30 o un espacio donde la bicicleta pueda circular con seguridad y se debe coordinar con la red de itinerarios para transporte público y colectivo.

Se pueden prever itinerarios de bicicletas por calles de zona 30 en cohabitación con el resto de los vehículos siempre que la intensidad media diaria de vehículos no sea superior a 3.000 vehículos al día. A partir de esta intensidad, es deseable la segregación de la vía mediante mecanismos adecuados de protección.

Respecto a las conexiones y los pasos ciclistas o VMP, los pasos de los carriles bici por las intersecciones deben ser lo más naturales posibles, separándose lo máximo la bici o patinete del peatón para evitar fricciones entre ellos. Si en una intersección se diseñan formas de conexión complejas o no intuitivas, el usuario o usuaria tenderá a seguir la línea directa más segura desde su origen hasta su destino, lo que puede generar accidentes.

La señalización de estos puntos de decisión debe ser especifica de la bicicleta o patinete, de forma que el se reconozca cuál es su itinerario y no tienda a utilizar los espacios de otros modos de transporte.

Respecto a los aparcamientos de bicicletas o VMP, el proyecto debe tener en cuenta zonas de estacionamiento seguro para las bicicletas y patinetes, estos dispositivos se suelen instalar cerca de los lugares donde se genera mayor número de desplazamientos y sobre todo en puntos de intercambio modal.

Es recomendable que en las proximidades a estaciones o paradas importantes de transporte público o colectivo se instalen aparcamientos seguros para bicicletas, de forma que las personas usuarias tengan la seguridad de que sus vehículos están bien protegidos.

3.1.4. Diseño de la red de transporte público

La red de itinerarios para transporte colectivo de superficie, urbano e interurbano, debe tener en cuenta la llegada de líneas de autobús, de tranvías y de otros sistemas de transporte colectivo, existentes y previstos en el momento de redacción del proyecto.

La red debería tener en cuenta la posibilidad de incorporar la previsión de carriles bus, la implantación de nuevas líneas, la prolongación o el cambio de trazado de las existentes.

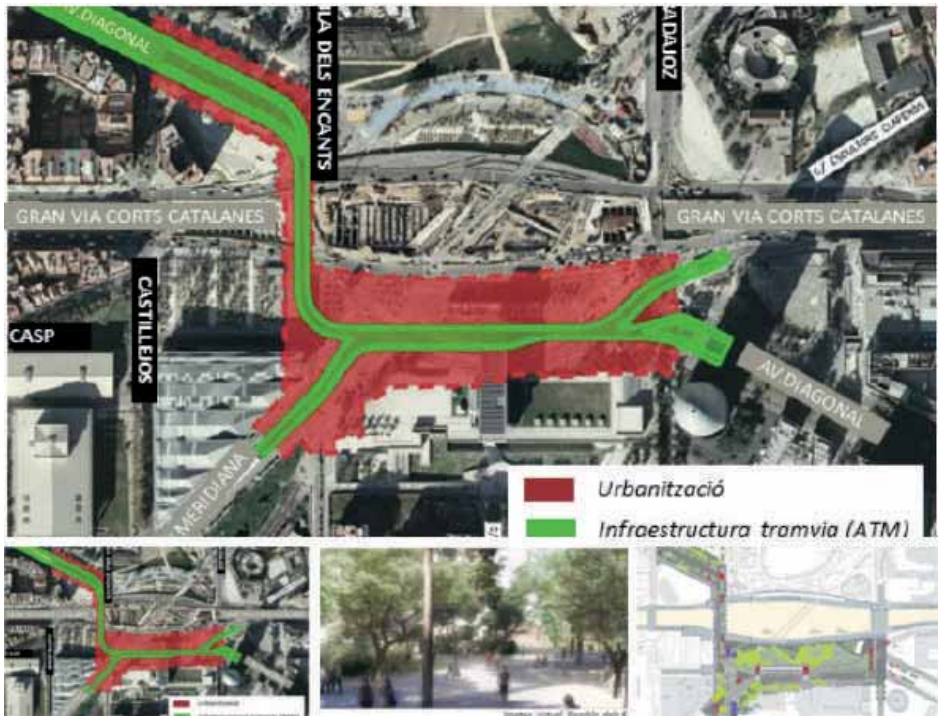


Imagen del diseño de la línea de tranvía por encima del túnel de la Plaza de les Glòries en Barcelona

Estos itinerarios tienen que asegurar la conectividad con los lugares de la ciudad donde se genere un número de desplazamientos muy elevado y se tienen que conectar con la red para transporte público y colectivo del resto del territorio.

Respecto a la maniobrabilidad de estos vehículos, condicionada por su longitud, las el proyecto, comprobará que el trazado de los recorridos y los radios de giro previstos en los planeamientos estén dimensionados para la movilidad de estos vehículos.

Respecto a las paradas o estaciones, se observará si las paradas de las líneas se sitúan de forma coordinada con los itinerarios del resto de usuarios de la red y deben situarse de forma que la distancia máxima de acceso mesurada sobre la red peatonal sea suficiente para el acceso a pie.

El espacio destinado a las paradas para el transporte colectivo y/o paradas de taxi debe configurarse de forma que se garantice el paso lateral de los peatones y las bicicletas y que se garantice la seguridad de las personas, tanto las que se desplazan por las aceras como las que suben o bajan de los autobuses.

Las paradas deben ser completamente accesibles a las personas con movilidad reducida, teniéndose en cuenta los encaminamientos, las zonas de protección, los espacios útiles, la señalización integrada, etc.

Es importante que el proyecto contemple sistemas de información dinámica basados en los Sistemas de Ayuda a la Explotación (SAE) de las líneas que utilicen cada parada, de forma que el usuario disponga de información en tiempo real de la localización de la flota de autobuses.

3.1.5. Diseño de la red de transporte privado y de distribución urbana de mercancias

La red básica para vehículos prevista en superficie debe asegurar la conectividad con los lugares donde se generen desplazamientos interiores, ha de ser la mínima, normalmente de un solo carril y continua.

La funcionalidad de esta red debe ser:

- Acceder a las posibles zonas habitadas, con acceso regulado para los residentes.
- Acceder a las zonas comerciales si las hubiera durante los periodos acordados (provisionamiento de mercancías). La ultima milla del reparto de mercancías.
- Acceder en caso de emergencia (bomberos, ambulancia, policia…)
- Acceder a los servicios urbanos: recogida de basuras, limpieza, jardineria, equipamientos, etc.

Imagen de las calles accesibles en el interior de la Plaza de les Glòries en Barcelona

La velocidad de la red será siempre de entre 10 y 30 km/h y viene condicionada por su señalización, pero se considera la velocidad de su diseño para tener en cuenta los elementos de seguridad vial y dimensionamiento adaptándose a la velocidad de circulación de los modos sostenibles.

Además, como punto clave en temas de accidentalidad, se analizará con detalle la composición de los nuevos pavimentos o en el mantenimiento de las superficies de rodadura existentes, poniendo énfasis en que la lectura de los pavimentos invite a circular a muy baja velocidad.

Respecto a los vehículos de servicios urbanos (bomberos o camión de recogida de residuos urbanos), el proyecto debe incidir en que los sistemas viarios deben dimensionarse teniendo en cuenta que son estos vehículos son los que dan los gálibos mínimos de todo dimensionamiento.

Para acabar y respecto a la distribución urbana de mercancías, es importante identificar su tipología y pensar en el tipo de vehículos que la van a realizar para ordenar sus accesos, horarios, etc.

Imagen de las tipologías de DUM

Sobre estos vehículos se suelen priorizan las bicicletas de carga o cargobikes o aquellos que pequeños vehículos eléctricos que permiten mayor eficiencia ambiental en las entregas.

Imagen de los tipos de vehículos utilizados en la DUM

3.2. Aspectos relacionados con el diseño de la movilidad del tunel

Y, por lo que respecta a la interacción del túnel en la superficie de la ciudad, es fundamental tener en cuenta los factores siguientes:

1. Diseñar una sección suficiente para canalizar el tráfico de paso por cada tubo con un número de carriles coherente con lo que hay aguas arriba de la circulación, es decir, la capacidad del túnel debe ser igual a la del primer semáforo urbano.
2. Se recomiendan secciones de 2 a 3 carriles por sentido con un carril especializado para dar prioridad al Bus o al Bus con VAO (vehículos de alta ocupación), normalmente se diseña:
   - o Carril bus en túneles urbanos interiores a las ciudades.
   - o Carril bus VAO si se construye en los accesos a las ciudades (tipo túnel A5 de Madrid o Túnel de Glòries en Barcelona)
3. Regular los accesos al túnel con semáforos que eviten las colas en su interior, es decir, sincronismo con el primer semáforo aguas arriba.
4. Limitar la velocidad máxima a 50 km/h, pudiendo se variable en determinados casos.
5. Dimensionar de forma precisa la posición de las bocas, afectando lo mínimo posible al entorno, tanto en afectación física como en emisiones atmosféricas, ruido o polución.

Imagen de la posición de la boca de entrada a la ciudad del túnel de Glòries en Barcelona.

6. Proporcionar un número y una forma de las posibles rampas de conexión con la superficie integradas, minimizando el impacto y tratando de que todo el túnel funcione como un conjunto en el caso de que haya más de una salida o entrada.
7. Dimensionar un sistema de canalización y tratado de emisiones que permita minimizar todo lo posible el impacto ambiental y que su mantenimiento también sea sostenible.
   En este aspecto, hay que tener en cuenta que el parque de vehículos cada vez va a ser más limpio y que las emisiones van a reducirse progresivamente en los próximos años, más teniendo en cuenta la implantación de Zonas de Bajas emisiones en 149 ciudades de nuestro país, afectando a 25 millones de coches.

8. Implementar una sensorización del túnel que permita su gestión inteligente, evitando incidencias incluso previendo lo que puede pasar en función de los parámetros de detección.
9. Diseñar unos dispositivos de ventilación, salidas de emergencia, etc que afecten lo mínimo posible a la superficie.
10. Etc.

3.3. Aspectos relacionados con el diseño de la movilidad en caso de contingencia

Los planes de contingencia en túneles tienen la misión de prevenir y controlar sucesos no planificados, pero previsibles, y describir la capacidad y las actividades de respuesta inmediata para controlar las emergencias de manera oportuna y eficaz.

Estos planes llevan asociados un plan de comunicación especifico que debe llegar a todas las personas afectadas por la incidencia.

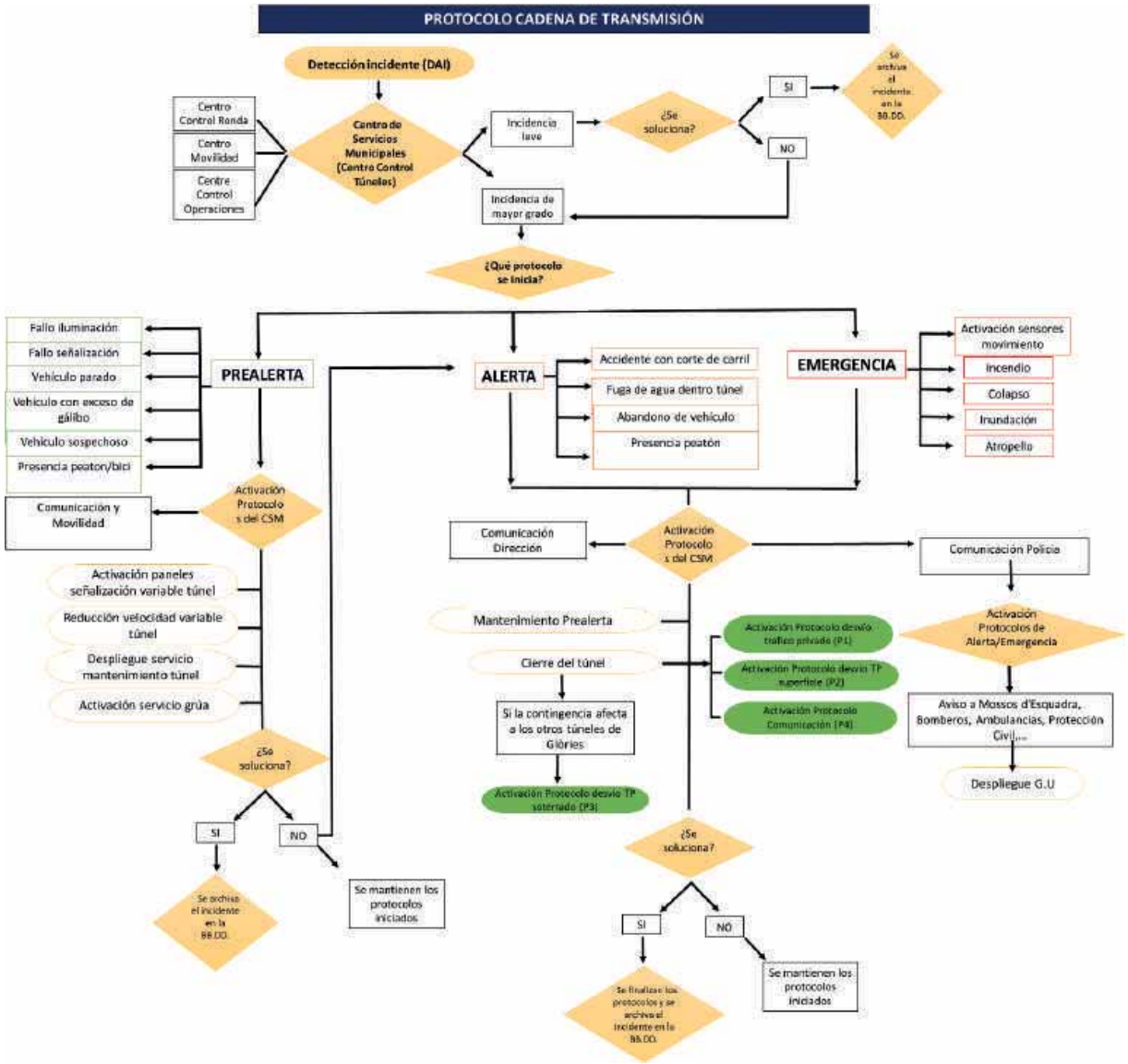


Imagen del "Protocolo de Cadena de Transmisión" sobre una incidencia en un túnel urbano.

Los objetivos específicos del plan se basan en:

- Establecer un procedimiento formal y escrito que indique las acciones a seguir para afrontar con éxito una PREALERTA / ALERTA o EMERGENCIA, de tal manera que cause el menor impacto en el funcionamiento de la ciudad.
    - Las PREALERTAS se asocian a incidentes que pueden afectar a la movilidad de la ciudad, pero se gestionan internamente.
    - Las ALERTAS suponen una acción inmediata y un aviso a los responsables de la movilidad de la ciudad.
    - Las EMERGENCIAS exigen el desarrollo completo de los protocolos de actuación de cada gestor de la ciudad.
- Optimizar y prever el uso de los recursos materiales comprometidos para regular los posibles desvíos o incidentes.
- Establecer procedimientos a seguir para lograr una comunicación efectiva con los operadores y gestores de las diferentes redes de transporte, entre ellos, la propia administración.

Por un lado, este plan contiene la estrategia de respuesta para cada tipo de accidentes y/o emergencias potenciales que podrían ocurrir, y permite flexibilidad para responder eficazmente a situaciones imprevistas.

Por otro lado, contempla acciones de respuesta para casos de desastres y emergencias con implicaciones sobre el medio natural o social. Él se diseña para hacer frente a situaciones cuya magnitud será evaluada en cada caso.

Las contingencias que se prevén en materia de movilidad en el túnel y que afectan a la ciudad son las siguientes:

a. Posibles emergencias que obliguen a cortar las dos bocas del túnel con riesgo alto de colapso y por lo tanto a desviar todo lo que pasa tanto dentro del túnel como las líneas de transporte (metro, cercanías…) que lo cruzan.

b. Posibles emergencias que obliguen a cortar alguna de las bocas y por lo tanto solo al tráfico de paso por su interior en un tubo o en los dos y que obliguen a desviar solo al tráfico de paso por el túnel.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones de mi intervención quieren dar relevancia a los siguientes aspectos:

- El diseño de la movilidad de un túnel urbano tiene que ver más con lo que pasa fuera que con lo que pasa dentro del túnel.
- La redacción del proyecto no puede desarrollarse si no se tiene clara la movilidad del túnel y de su zona de influencia en superficie. Es necesario el uso de herramientas de simulación de la movilidad (nivel ciudad y ámbito de afectación) que ayuden en la toma de decisiones.
- El túnel urbano se diseña y construye para el peatón, no para el vehículo, por lo que todo gira en torno a lo que pasa encima.

- El diseño de la movilidad de todo lo que se contempla en el entorno y en el propio túnel debe considerar aspectos conceptuales de vital importancia:
  - Seguridad vial (safe system)
  - Integración urbana
  - Capacidad
  - Sostenibilidad ambiental
  - Conectividad
- El diseño vial en superficie debe considerar las 5 redes de movilidad enmarcadas en cuatro aspectos transversales, la seguridad vial, la accesibilidad universal, la conectividad y la sostenibilidad ambiental.
- Además, esta red en superficie debe considerar que pueden ocurrir contingencias que deben preverse y que pueden tener consecuencia en la movilidad de gran parte o de toda la ciudad.
- Respecto al túnel: la sección, la regulación de los accesos para que no haya colas en su interior, la limitación de velocidad, la posición de las bocas y de los elementos de evacuación son aspectos que como se ha introducido anteriormente, condicionan la movilidad tanto del túnel como de lo que pasa encima suyo.

BUILDING INFORMATION MODELLING FOR AN OPTIMIZED AND SAFE OPERATION OF ROAD TUNNELS

Götz Vollmann ; Markus Thewes (A)
Hendrik Wahl; Anne Lehan (B)
Markus König; Marcel Stepien (C)
Werner Riepe; Ferdinand Weißbrod (D)

(A) Institute for Tunneling and Construction Management; Ruhr University Bochum
(B) Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
(C) Chair of Computing in Engineering; Ruhr University Bochum
(D) BUNG Ingenieure AG

During the operating phase of a road tunnel, maintaining or increasing the availability in the network but also optimizing it economically regarding the structures' life cycle costs are important priorities. A consistent application of the BIM methodology ("Building Information Modeling") can theoretically make a useful and targeted contribution, as it provides a complete digital model of the structure with all its elements and the required information for the tasks of the tunnel operators.

Within the research project FE 15.0623/2016/RRB "Building Information Modeling (BIM) in Tunneling", which is funded by the Federal Highway Research Institute on behalf of the Federal Ministry of Digital and Transport, the Institute for Tunneling and Construction Management as well as the Chair of Computing in Engineering (both Ruhr University Bochum) developed in cooperation with BUNG Ingenieure AG the basics for a BIM-based operating model of road tunnels. The article presents the research results and demonstrates the implementation by means of an exemplary generation of a BIM-based operating model. In addition, it outlines the application of BIM with a special focus on the operator's requirements.

BUILDING INFORMATION MODELLING PARA UN FUNCIONAMIENTO OPTIMIZADO Y SEGURO DE LOS TÚNELES DE CARRETERA

Durante la fase de explotación de un túnel de carretera, mantener o aumentar la disponibilidad en la red, pero también optimizarla económicamente respecto a los costes del ciclo de vida de las estructuras, son prioridades importantes. Una aplicación coherente de la metodología BIM ("Building Information Modeling") puede aportar teóricamente una contribución útil y específica, ya que proporciona un modelo digital completo de la estructura con todos sus elementos y la información necesaria para las tareas de los operadores de túneles.

En el marco del proyecto de investigación FE 15.0623/2016/RRB "Building Information Modeling (BIM) in Tunneling", financiado por el Instituto Federal de Investigación de Carreteras en nombre del Ministerio Federal de Asuntos Digitales y Transporte, el Instituto de Gestión de Túneles y Construcciones, así como la Cátedra de Informática en Ingeniería (ambos de la Universidad del Ruhr de Bochum), desarrollaron en colaboración con BUNG Ingenieure AG los fundamentos de un modelo de explotación de túneles de carretera basado en BIM. El artículo presenta los resultados de la investigación y demuestra la aplicación mediante la generación de un modelo de explotación basado en BIM. Además, se expone la aplicación de BIM centrándose especialmente en los requisitos del operador.

MODÉLISATION DES DONNÉES DU BÂTIMENT POUR UNE EXPLOITATION OPTIMISÉE ET SÛRE DES TUNNELS ROUTIERS

Pendant la phase d'exploitation d'un tunnel routier, le maintien ou l'augmentation de la disponibilité du réseau mais aussi son optimisation économique en fonction des coûts du cycle de vie des structures sont des priorités importantes. Une application cohérente de la méthodologie BIM (« Building Information Modeling ») peut théoriquement apporter une contribution utile et ciblée, car elle fournit un modèle numérique complet de la structure avec tous ses éléments et les informations requises pour les tâches des exploitants de tunnels.

Dans le cadre du projet de recherche FE 15.0623/2016/RRB « Building Information Modeling (BIM) in Tunneling », financé par l'Institut fédéral de recherche sur les autoroutes pour le compte du ministère fédéral du Numérique et des Transports, l'Institut de gestion des tunnels et de la construction ainsi que la chaire d'informatique en ingénierie (tous deux de l'Université de la Ruhr à Bochum) ont développé en coopération avec BUNG Ingenieure AG les bases d'un modèle d'exploitation des tunnels routiers basé sur le BIM. L'article présente les résultats de la recherche et démontre la mise en œuvre au moyen d'une génération exemplaire d'un modèle d'exploitation basé sur le BIM. En outre, il décrit l'application du BIM avec un accent particulier sur les exigences de l'opérateur.

1. INTRODUCTION

In times of increasing digitalization and promoted by political initiatives such as the Stage Plan of the German Federal Ministry for Traffic and Infrastructure (BMVI) [1] and following on from this the "Masterplan BIM Bundesfernstraßen" [2], both published by the Federal Ministry for Digital and Transport (Bundesministerium für Digitales und Verkehr), the cooperative working methodology Building Information Modeling (BIM) is gaining importance all across Europe. In addition to supporting the planning and execution phases, a consistent data model can also optimize operation and maintenance processes as part of a holistic lifecycle approach.

However, current developments show that the focus in the application of the BIM methodology has so far been on the execution and planning phase. Despite this, the "Masterplan BIM Bundesfernstraßen" specifies that BIM is to be used nationwide as a standard process by 2025 and explicitly addresses the operation of the federal highway infrastructure.

The requirements for a BIM-based model to support and optimize the operational phase of road tunnels are described below. This also includes the consideration of already existing, model-theoretical principles as well as a supplementary coverage of requirements of the client and the operator. This also takes into account the operational aspects during the life cycle, such as the maintenance of components of the safety equipment. Finally, these basic principles were implemented on an existing BIM model for the purpose of illustration and evaluation. Together with the BASt the authors have developed a handbook for the implementation of BIM procedures for road tunnel operation, which is going to be introduced briefly in this publication

The authors would like to point out, that since this research was based on a German project and dealt with German constraints, the referred documents and boundary conditions focus mainly on the German situation, which naturally differs in part from what other countries might require.

2. BASICS OF A BIM-BASED OPERATION AND MAINTENANCE MANAGEMENT

Following the working group BIM4INFRA [3], the starting point for a BIM-based operating model is represented by the so-called as-built model, which ideally fully represents the actual status at the time of tunnel completion. The as-built model is in turn based on the coordination model, which is an aggregation of different subject specific models created by the individual crafts. For the operating model, on the other hand, not all information from the previous phases is relevant. However new information and documents are added with the commissioning of the road tunnel, which need to be mapped to or implemented in the operating model accordingly.

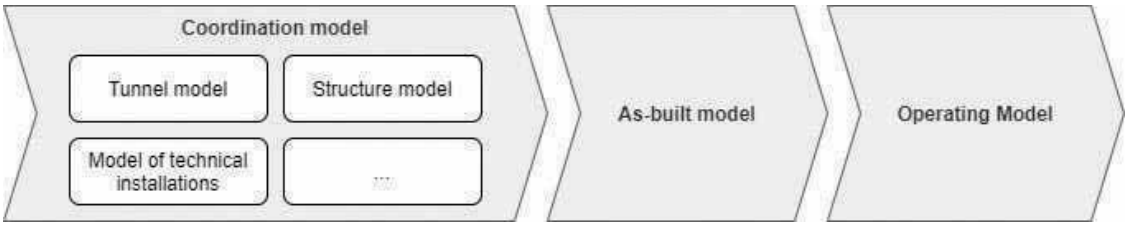


Figure 1: Compilation of an operating model following BIM4INFRA [3]

To implement a BIM-based operation and maintenance management for road tunnels, the first step is to identify the essential operator requirements. It needs to be performed both, regarding the significant operational information that already arise during the planning and execution phase and regarding the individual operational processes. Based on this, corresponding information requirements are to be derived, which also include the definition of certain exchange points and the technical requirements for a data exchange.

2.1. Operator requirements

Two essential process steps were carried out to determine the operator requirements. On the one hand, operation-relevant regulations, guidelines, and recommendations were examined in an analysis (including EA-BT-80/100 [4] and ZTV-ING Part 5 [5]) to identify administrative, operational, and regulatory constraints. In addition, expert interviews were also conducted with various institutions of road tunnel operation for being able to map specific peculiarities of operation in a BIM-based operation and maintenance management, and thus to ensure practicability.

In detail, the analysis was able to define specific requirements for as-built documentation as well as regarding the collection and structuring of data (including condition data, building data). By conducting the expert interviews, in a further step, among other things, the following potential use cases for a BIM-based operating model based on typical operating processes were identified:

- Holistic BIM-based document management
- Visualization and evaluation of operation-relevant data
- Digitization of operational processes and their documentation (e.g., maintenance and inspection based on digital work sheets)
- Model-based billing of outsourced services
- Model checking in regard of operational issues (amongst others early in the planning phase)

In addition, the actual creation of the operating model based on the as-built model (also called the handover model) as well as the management and maintenance of the model itself must be distinguished as further use cases, as these processes generally involve an increased effort.

2.2. Information requirements

Based on the operator requirements, information requirements were derived for individual use cases and their corresponding processes. The formulation was mainly done in the form of Information Delivery Manuals (IDMs) according to ISO standard 29841-1 [6]. The IDMs cover both the mapping of BIM-based processes and the definition of exchange requirements, particularly with regard to the technical implementation. Specific information requirements for individual exchange points and objects within the mapped processes (or use cases) were also defined based on the Level of Information Need (LOIN) according to DIN EN 17412 [7].

The organization of the BIM-based information exchange between the actors is based on information containers (ICDD - Information Container for linked Document Delivery) according to ISO 21597-1 [8]. The contents of the containers are the data model (e.g., an IFC file), on the one hand, and documents associated with the respective process, on the other hand. Furthermore, semantic links between individual model objects and documents can be created with the help of RDF graphs (Resource Description Framework) and OWL ontologies (Web Ontology Language). Using this so-called Linked Data approach makes a (partially) automated processing and evaluation generally possible.

Figure 2 shows an example of the developed BIM process for the maintenance and inspection of the operational equipment with a total of two exchange points (represented by letter box symbols). Corresponding LOINs were defined for both points. The central information objects here are both the BIM model for maintenance and inspection (here based on IFC), as well as digital work maps in XML format for the purpose of computer-aided evaluation.

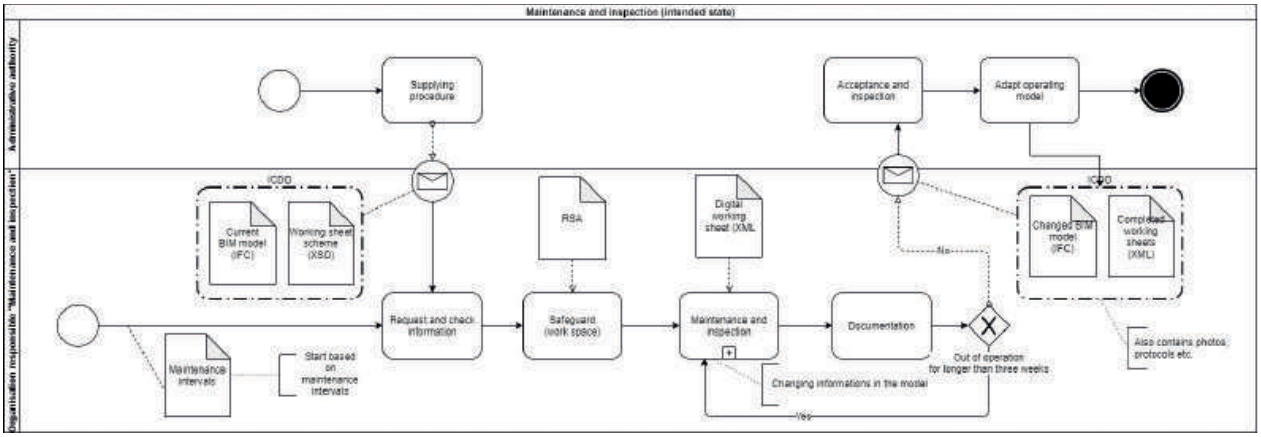


Figure 2: Process diagram "pm_maintenance+inspection_ICDD" for the implementation of a BIM-based maintenance and inspection, symbolizes the intended state

The specific container contents that need to be delivered at the respective exchange points, have been defined as corresponding LOINs within the scope of the project. In this context, the container consists of the following components according to ISO 21597-1 [8]: the Index.rdf file is a header for the archive itself and contains meta-information about the contained documents, such as name, folder path and date. The Ontology resources folder contains the definitions and the schema for the linking. Inside the Payload documents folder all action items (here exemplarily inventory and operational documents) are stored. In this example, TunnelModel.ifc represents an IFC model that contains the structure together with the operational equipment in a suitable Level of Geometry (LoG) and Level of Information (LoI) according to the defined LOINs.

The representation of individual contents in the IFC model (here as Tunnelbauwerk.ifc) respectively their linking is described in Section 2.3.

2.3. Development of a complementary data model

In order to map the information requirements in a data model, an extension of the current IFC standard was carried out within the scope of the research project. This standard has established itself on an international level as the authoritative data exchange format and is supported in numerous applications. In the infrastructure sector in particular, corresponding developments are currently taking place with regard to domain-specific classes and methods. With regard to tunnel structures, the buildingSMART working group IFC Tunnel is currently developing specific components with regard to tunnel equipment as well as different construction methods. Previous findings have been taken into account in the context of this research project.

Since national standard often deviate and differ to a certain extent – representing cultural National requirements are largely not reflected in the international standard. For this purpose, national regulations and guidelines such as ASB-ING [9] and OKSTRA [10] were analyzed, which were taken into account in the structuring of the model and the adoption of corresponding semantic information in the form of features (properties) and feature groups (set of properties).

Figure 3 shows that approach, here for a tunnel ventilation system as an example. The developed data model provides linked feature groups for semantic labeling of relevant information for tunnel operation. Model objects are semantically distinguished and typified by specifying the feature groups. The linking of a model object with the characteristic group "inventory information" (contains, among other things, the characteristics device number, material, date of commissioning) identifies all objects with relevance for the maintenance process. This means that all maintenance-relevant objects can be identified on the basis of the characteristic group by means of a corresponding query.

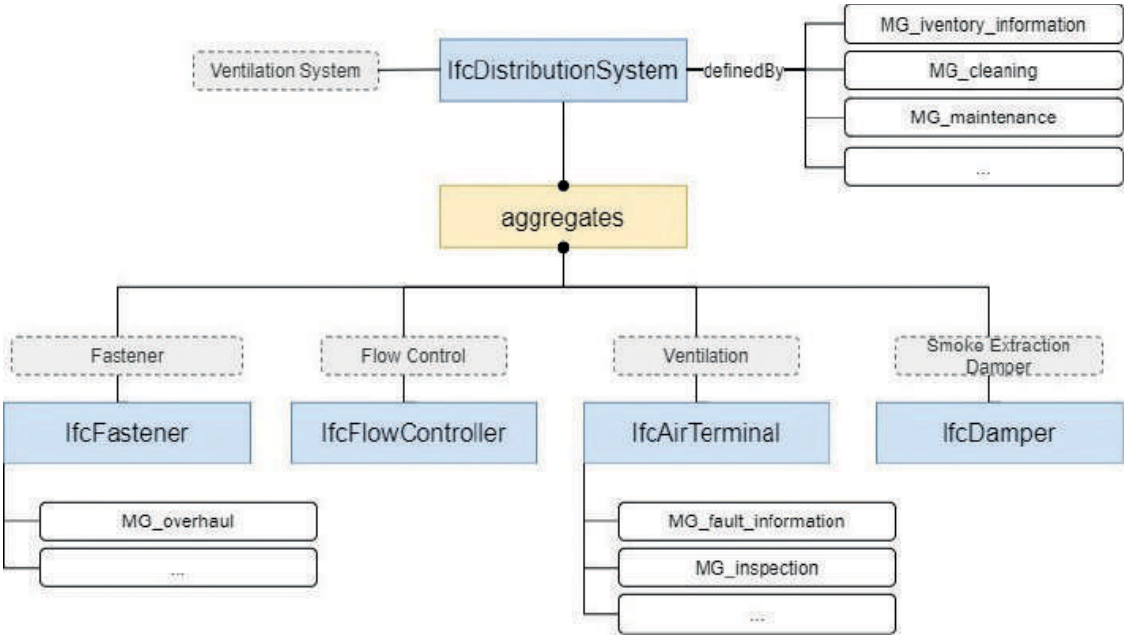


Figure 3: Allocation of IFC classes for the ventilation system

3. DEMONSTRATION OF A BIM-BASED WORKING PROCEDURE

In order to illustrate the elaborated, model-theoretical basics, a demonstration was carried out using an existing IFC model of a real road tunnel, which is currently under construction (see Figure 4). For the purpose of creating a corresponding operating model an artificial inventory information was used based on the identified operator requirements. In order to be able to implement the processes accordingly, a prototypical imple-

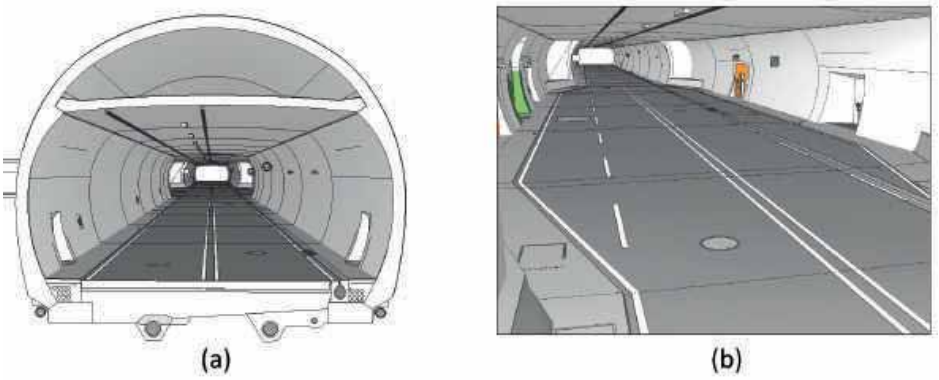


Figure 4: Cross-section of the demonstrator tunnel model (a) and a view of the technical installations inside the tunnel model (b).

mentation of inspection and auxiliary tools took place in advance, from which the application "ICDD-Inspektor" emerged within the framework of the project. Especially with regard to the formulated information requirements, the following functionalities have been implemented in the application:

- Initialization of information containers for information exchange.
- Creation/management of semantic links in the form of RDF graphs, e.g. individual documents and model objects

- Creation and execution of queries based on SPARQL
- Implementation of Model View Definitions (MVDs)

The focus of the demonstration was on the concrete information exchange points from the considered processes and should ideally show how the processing of the information can be done in the BIM-based approach. Another goal was the evaluation of the developed software solutions, especially with regard to their applicability.

Feeding the IFC model and initialization of the container

The basis for all further use cases is the operating model, which is derived from the as-built model and supplemented by additional as-built documents. Therefore, the existing IFC model was first tagged with corresponding feature groups - based on the developed LOINs for the handover. In connection with further operationally relevant documents, the container for the exchange was initialized with the "ICDD Inspector" (see Figure 5).

Exchange Requirements Model		
Name:	Acceptance and check of the operating model	
Identifier:	ER4_ICDD_Handover	
Description:	**Name**	**Type**
Index:		
	Index	rdf
Ontology Resources:		
	Container	rdf
	LinkSet	rdf
Payload Documents:		
	Machinery labeling	Folder/pdf
	Inventory plans	Folder/pdf
	Inventory documents	Folder
	↳Installation plan	Folder/pdf
	↳Description of the function of the overall system and all sub-systems	Folder/pdf
	↳Inventory card	Folder/pdf
	↳List of data points for monitoring	Folder/pdf
	↳Earthing plan	Folder/pdf
	↳Explanation of the fault messages	Folder/pdf
	↳Cable layout plans	Folder/pdf
	↳Clamping diagrams and circuit diagram for each distribution boar	Folder/pdf
	↳Assembly plans	Folder/pdf
	↳Transcripts of the test results	Folder/pdf
	↳Connection diagrams	Folder/pdf
	↳Programs with current, complete software documentation	Folder/pdf
	↳Control scheme	Folder/pdf
	↳Circuit diagrams	Folder/pdf
	Building file	zip
	Building book	zip
	Building directory	zip
	Product data sheet	Folder/pdf
	Tunnel	ifc
Payload triples:		
	Linkset-Dataset	rdf

Figure 5: Content of the ICDD container for the final data exchange step within the BIM-based handover process.

The container resulting from the handover process with the linked as-built documents and the prepared IFC model forms the basis for further model-based work in the course of the operation and maintenance processes, whereby the containers must be initialized again for each process or use case depending on the defined requirements.

Figure 6 shows an example of the containers that are to be transferred in the BIM-based maintenance and inspection process on the basis of the defined LOINs at two exchange points (provisioning process, acceptance and inspection, see also Figure 2).

Exchange Requirements Model		
Name:	Providing the maintenance and inspection documentation	
Identifier:	ER1_ICDD_Tunnel_Maintenance_Assessment	
Description:	**Name**	**Type**
Index:		
	Index	rdf
Ontology Resources:		
	Container	rdf
	LinkSet	rdf
Payload Documents:		
	Maintenance instructions	Folder/pdf
	03.00_Lamps_Tunnel-Working_Sheet	xml
	03.01_Light_Value_Detection-Working_Shee	xml
	Working Sheet Scheme	xsd
	Tunnel	ifc
Payload triples:		
	Linkset-Dataset	rdf

Exchange Requirements Model		
Name:	Tunnel maintenance documentation	
Identifier:	ER2_ICDD_Tunnel_Maintenance_Assessement	
Description:	**Name**	**Type**
Index:		
	Index	rdf
Ontology Resources:		
	Container	rdf
	LinkSet	rdf
Payload Documents:		
	Report	Folder/pdf
	03.00_Lamps_Tunnel-Working_Sheet (completed)	xml
	03.01_Light_Value_Detection-Working_Sheet (complete	xml
	Working Sheet Scheme	xsd
	Tunnel_v2	ifc
Payload triples:		
	Linkset-Data	rdf

Figure 6: Content of the ICDD containers for the data exchange points within the BIM-based maintenance and inspection process (Payload documents completed on the right).

Checking the container contents

In the course of the information exchange, the verification of the delivered container contents is an essential step. Depending on the desired test results, the project developed appropriate test tools based on the existing test documents (e.g., schemas, query languages). Figure 7 shows an overview of the relationship between individual container contents, test tools and the associated test results.

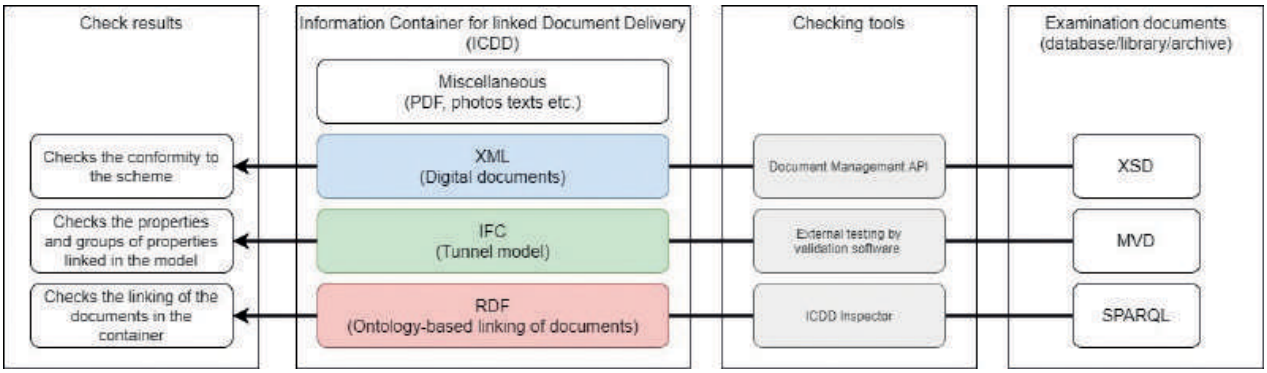


Figure 7: Overview of container contents, checking tools and the required examination documents

On the basis of the RDF graphs, for example, a holistic check of the linked documents can be carried out with regard to the quantitative scope. This makes it possible to check whether all the required documents have been supplied in full. In addition, a partial check of the documents is also possible on the basis of the RDF graphs, in which the digitized documents are checked with regard to qualitative requirements (including correct

semantic linking) based on the XML schema. A content check of the XML documents is performed by a validation within the programming interface for generating and editing the documents (document management API, see Section 3.3).

In addition to the documents which are exchanged within the ICDD container, the model must also be checked with regard to the completeness of linked property records. In the BIM-based working methodology, the so-called Model View Definition (MVD) is usually used as a check routine for this purpose, which generates a check result for each checked object. A comprehensive catalog of MVD specifications thus makes it possible to check a large part of defined information requirements on the model and thus to avoid potential errors in the course of further model processing.

In addition to the check approaches, targeted filtering with regard to certain requirements or specific properties is also possible. Thus, for example, model objects to which the defined requirements apply can be selected.

Concept for digitized information processing

The digitization of operational processes - especially with regard to automated information processing - was a central result of the operator requirements analysis. As part of the research project, the key documents within individual processes were identified and analyzed for this purpose. Machine-readable work cards based on the XML format were developed as an example for the maintenance process. For this purpose, standardly used work cards were first analyzed and then converted into a corresponding XSD schema. Based on the schema, corresponding work cards can then be created in XML format.

To support users in the digital creation and editing of work cards, a form view was built into the "ICDD Inspector" application (see Figure 8). This is based primarily on an object-oriented data model, which includes the requirements from the defined XSD schema and was supplemented by additional classes for the basic management of the digital documents. A programming interface ("document management API") was designed for integration into the ICDD inspector, which integrates the data model of the work cards into corresponding software applications (here using the example of the "ICDD inspector").

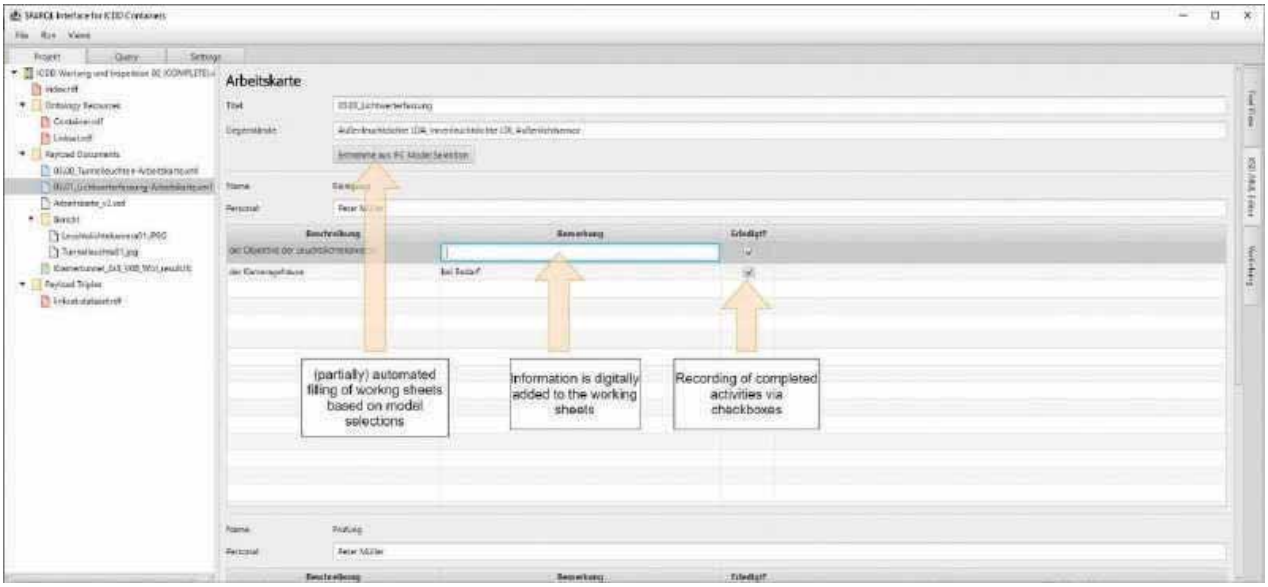


Figure 8: Working sheet layout, integrated into the ICDD Inspector for editing digital working sheets upon selected in the project view

In principle, it is also possible to transfer documentation content to the operating model and vice versa on the basis of digital work maps. However, this is associated with a significant implementation effort because, as a rule, corresponding routines have to be written that clearly define where information in the model is to be linked with information in the digital document.

Web Platform as Connection to a Common Data Environment

An important prerequisite for ensuring functionalities such as the interactive, digital editing of work maps is the networking of all involved actors. In this respect, the implementation of the developed inspection and support tools (in the application "ICDD-Inspektor") in a web-based application is suitable, via which corresponding container contents are forwarded to an environment for data management (CDE - Common Data Environment).

In addition, a web platform can also be used to optimize other operational processes, such as the coordination of maintenance personnel with the tunnel operator in the course of fault clearance:

In the case of a registered fault, a BIM-based online ticket system can be used as a web platform for the exchange of information, in which corresponding information is recorded in a ticket and exchanged with supplementary documents in the form of an ICDD container. One approach for the technical implementation of the exchange requirements is provided by the so-called BCF (BIM Collaboration Format), which enables the exchange of ticket information (e.g. contact data of the responsible personnel, type of fault, etc.) and relevant model views on the basis of a ZIP container.

4. REPORT AND RECOMMENDATIONS – DEVELOPMENT OF A MANUAL

The results of the research report were summarized in a corresponding project report [11], that is going to be published in the nearer future. In addition, a manual [12] has been developed to support operators in the tendering of BIM services and defining use cases for the operating phase of road tunnels. In a nutshell, the manual contains the following tools and recommendations:

- Basics of the tendering of BIM services
- How to develop an operation model via the handover of the BIM model from the construction phase to the operation phase
- Information requirements of the operator during the operation phase and how to translate them into process maps and mandatory data delivery requirements
- Communication between operating authority and service providers
- Fundamentals of modeling and generating model content for the operation phase

Again, it has to be noted that these recommendations are based on the German legislative and administrative boundary conditions and constraints and therefore can only partly be adopted to other countries with differing structures. For instance, the German federal structure, with 16 standalone federal states and partly differing legislations, have a huge impact the information requirements of the operators and the layout of the communication and the data exchange. Nonetheless, the idea of a coherent data model for the TERN tunnels seem like an idea worth contemplating.

With the help of the results, the compliant modeling of a BIM-supported tool for operation and maintenance management for new buildings and existing structures is definitely possible. It is necessary to transfer the approach to a suitable software environment and to take into account the sequence outlined here in order to ensure consistency with the principles developed in [2] and [3]. But for starters, the catalog of specifications forms an initial starting platform based on the requirements identified in the project. Further adaptation, in particular through feedback from future practical experience, is recommended and obviously needed.

Annex 6 of the manual provides an example of the implementation of a call for tenders for the creation of an operating model and can be used as a basis for project-specific adaptations. This appendix thus supplements the modeling guideline of the project report, which is also provided here in the form of Appendices 1-5.

The most important principle here is that the guidelines formulated here can only be of a prototypical nature and must be specifically adapted for each individual project. It also has to be considered that one of the biggest obstacle for the upcoming years will be to implement the existing building stock in a BIM-based information environment. Future research need seem indicated on this matter, especially in terms of a structurized and formalized approach for the required 3-D scanning of the existing structures and their transformation into reliable and usable operation models. It should also be noted that the creation of an operating model differs fundamentally from that for models for the planning and construction of a tunnel in some respects. Whereas the latter, for example, extend over many phases of the project and require a clear organizational structure of the various stakeholders and service providers, operating models are located purely formally in the operation phase (phase 9 according to the German HOAI) and usually require only a comparatively limited number of participants.

For these reasons, existing structures and procedures cannot be adopted 1:1 here but must be adapted on a case- and project-specific basis. The addressed manual provides more detailed information and shows the differences between the principles developed according to BIM4INFRA [10] and the framework document on the client information requirements [13] in the course of the "Masterplan BIM Bundesfernstraßen".

5. SUMMARY AND OUTLOOK

The objective of the research project was to investigate and develop model-theoretical principles for BIM-based operation and maintenance management, which could be successfully implemented using an IFC model of a tunnel structure. The derived information requirements in the form of the Information Delivery Manuals, the LOINs and the corresponding properties and property groups form the basis for a modelling guideline for BIM-based operating models of road tunnels. In the future, this can be used in the course of invitations to tender for operating models as the basis for the so-called client information requirements (AIA), in which the client's information needs are recorded. For this purpose, corresponding recommendations with individual steps for the implementation of a BIM-supported operation and maintenance management were summarized from the project results in the form of a manual (incl. sample AIA). In the future, the manual is to support the operators with the implementation of BIM for the operating phase of road tunnels.

In addition to the content requirements, which were comprehensively developed in the project, further organizational aspects will also have to be clarified in the future. These relate, for example, to the distribution of roles within the road construction administration responsible for a tunnel, in which corresponding BIM competencies should be established, especially to accompany the BIM tender and to check the delivery items. In addition, technological issues such as the implementation of a CDE-platform as a common data environment and the further use of software tools must be clarified, especially regarding the requirements for a vendor-neutral data exchange (e.g., with IFC).

REFERENCES:

[1] Bundesministerium für Digitales und Verkehr. Stufenplan Digitales Planen und Bauen: Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken. Berlin; 2015.

[2] Bundesministerium für Digitales und Verkehr. Masterplan BIM Bundesfernstraßen: Digitalisierung des Planens, Bauens, Erhaltens und Betreibens im Bundesfernstraßenbau mit der Methode Building Information Modeling (BIM). Berlin; 2021.

[3] BIM4INFRA: Umsetzung des Stufenplans „Digitales Planen und Bauen“ – Teil 1: Grundlagen und BIM-Gesamtprozess. Berlin, 2019.

[4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Empfehlungen für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln mit einer Planungsgeschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h. Köln, 2019.

[5] Bundesanstalt für Straßenwesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING – Teil 5: Tunnelbau. Bergisch Gladbach, 2018.

[6] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 29481-1 Bauwerksinformationsmodelle – Handbuch der Informationslieferungen. Teil 1: Methodik und Format. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.

[7] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 17412 (Entwurf) Building Information Modelling – Level of Information Need – Konzepte und Definitionen. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2018.

[8] International Organization for Standardization: ISO 21597-1 Information container for linked document delivery – Exchange specification. Part 1: Container.

[9] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Rahmendokument: BIM-Anwendungsfälle und rechtliche Rahmenbedingungen. Version 1.0. Berlin, 2021.

[10] BIM4INFRA: Umsetzung des Stufenplans „Digitales Planen und Bauen“ – Teil 2: Leitfaden und Muster für Auftraggeber-Informationsanforderungen. Berlin, 2019.

[11] Thewes, M; Vollmann, G.; Wahl, H.; König, M.; Stepien, M.; Riepe, W.; Weißbrod, F.: Building Information Modeling (BIM) im Tunnelbau (FE 15.0623/2016/RRB). Projektbericht der Ruhr-Universität Bochum und des Ingenieurbüros BUNG im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2022.

[12] Thewes, M; Vollmann, G.; Wahl, H.; König, M.; Stepien, M.; Riepe, W.; Weißbrod, F.: Building Information Modeling (BIM) im Tunnelbau (FE 15.0623/2016/RRB). Handbuch. Ruhr-Universität Bochum und Ingenieurbüro BUNG im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2022.

[13] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Rahmendokument: Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA). Version 1.0. Berlin, 2021.

PLATAFORMA PARA LA EXPLOTACIÓN Y COMUNICACIÓN EN TIEMPO REAL CON AUTÓMATA (PLECTRA)

Lucía Ruiz Rivero
EMESA

Desde el centro de Control de la M-30, se gestionan los túneles urbanos más largos de Europa. Diariamente se realizan unos 500.000 desplazamientos por los túneles de la M30 y se atienden una media de 13.000 incidencias anuales, en el total de la vía.

Cuentan con una gran variedad de instalaciones, entre ellas, circuito cerrado de televisión, con más de 1.600 cámaras, tanto en calzada, como en los cuartos técnicos, 1.000 ventiladores, 100 bombas de drenaje, 127 puntos de medida de tráfico y los diferentes cuartos de instalaciones en los que se ubican centros de transformación, salas de baja tensión, salas de comunicaciones, etc., todos estos sistemas, generan un gran volumen de datos que también se gestionan, desde el Centro de Control de túneles de la M-30.

Todo ello hace que, se produzca un elevado número de comunicaciones, tanto internas, como externas.

Por ello, se pensó que, una forma de agilizar el servicio sería crear una plataforma, que en tiempo real y desde cualquier punto del mundo, permitiera consultar la información que llega de forma continua a los Servidores de MC30. En ese momento, comienza el desarrollo de PLECTRA, utilizando TELEGRAM, como aplicación de mensajería instantánea. A día de hoy, no solamente se ha conseguido el objetivo inicial, que era en una reducción significativa del número de llamadas, sino que también se han creado funcionalidades para los departamentos de conservación y mantenimiento, e incluso para los Servicios de Emergencia Externa.

A modo de ejemplo, una de las incidencias más importantes que se ha producido en los túneles, ha sido la rotura de un colector que ha provocado la entrada de agua al túnel. Gracias a PLECTRA se ha podido consultar durante el transcurso de la incidencia los recursos activados, tanto internos, como externos (Policía, Bomberos, SAMUR), las imágenes de por donde entra el agua, las zonas afectadas, la formación de retenciones, o el funcionamiento de las bombas.

PLATFORM FOR REAL-TIME OPERATION AND COMMUNICATION WITH AUTOMATON (PLECTRA)

The M-30 Control Centre manages Europe's longest urban tunnels. Every day, some 500,000 journeys are made through the M-30 tunnels and an average of 3,500 incidents occur annually.

The M-30 tunnels have a wide variety of installations, including closed CCTV, with more than 1,600 cameras, on the road and in the technical rooms alike, 1,000 fans, 100 drainage pumps, 127 traffic measurement points and the different installation rooms in which transformation centres, low voltage rooms, communications rooms, etc. are located. All these systems generate a large volume of data that is also managed from the M-30 Tunnel Control Centre.

All of this leads to a wealth of internal and external communications.

Therefore, it was thought that one way to speed up the service would be to create a platform that, in real time and from anywhere in the world, would allow the information that continuously reaches the MC30 servers to be consulted. At that point, the development of PLECTRA got underway, using TELEGRAM as an instant messaging application. Today, not only has the initial objective been achieved, which was a significant reduction in the number of calls, but also functionalities have been put in place for the conservation and maintenance departments.

By way of example, one of the most important incidents that occurred in the tunnels was a broken collector that caused water to make its way into the tunnel. Thanks to PLECTRA, during the course of the incident the internal and external resources activated (Police, Fire Brigade, SAMUR) could be consulted as well as the images of where the water was seeping in, the areas affected, the tailbacks and the operation of the pumps.

PLATEFORME D'EXPLOITATION ET DE COMMUNICATION EN TEMPS RÉEL AVEC AUTOMATE (PLECTRA)

Les tunnels urbains les plus longs d'Europe sont gérés depuis le centre de contrôle de la M-30. Environ 500 000 déplacements sont effectués chaque jour dans les tunnels de la M30 et il y a en moyenne 3 500 incidents par an.

Ils possèdent des installations très variées dont la télévision en circuit fermé, avec plus de 1 600 caméras, aussi bien sur la chaussée que dans les salles techniques, 1 000 ventilateurs, 100 pompes de drainage, 127 points de mesure de la circulation et les différentes salles d'installations où sont situés des centres de transformation, des salles de basse tension, des salles de communication, etc., tous ces systèmes génèrent un grand volume de données qui sont également gérées depuis le Centre de Contrôle des tunnels de la M-30.

Tout cela fait qu'il y a un grand nombre de communications, tant internes qu'externes.

Nous avons donc pensé qu'un moyen d'accélérer le service serait de créer une plateforme qui, en temps réel et de n'importe où dans le monde, permettrait de consulter les informations qui parviennent de manière continue aux Serveurs de MC30. C'est à ce moment-là que le développement de PLECTRA commence, en utilisant TELEGRAM comme application de messagerie instantanée. À ce jour, non seulement l'objectif initial, qui était de réduire considérablement le nombre d'appels, a été atteint, mais des fonctionnalités ont également été créées pour les services dédiés à l'entretien et la maintenance.

À titre d'exemple, l'un des incidents les plus importants survenus dans les tunnels a été la rupture d'un collecteur qui a provoqué l'entrée d'eau dans le tunnel. Grâce à PLECTRA, nous avons pu consulter, au cours de l'incident, les ressources activées, tant internes qu'externes (Police, Pompiers, SAMU), les images d'où entrait l'eau, les zones affectées, la formation de rétentions, ou le fonctionnement des pompes.

a denominada M-30 es una vía de circunvalación, que rodea el centro («almendra central») de la ciudad de Madrid, es una vía compuesta por 200 kilómetros, de los cuales, 150 discurren a cielo abierto y 50 son túneles. Esta vía cuenta con 30 enlaces, tanto de autovías principales como son, la autovía del Norte A1, Autovía del Nordeste A2, Autovía del Este A3, Autovía del Sur A4, Autovía del Suroeste A5 y Autovía del Noroeste A6, como de calles o avenidas que son las arterias principales de la ciudad de Madrid.

La singularidad y complejidad, de una vía como la M30, es debida a varios factores:

1. Por el número de usuarios que la recorren, ya que, la M-30 es utilizada a diario por un millón y medio de personas.
2. Por los niveles de tráfico en horas punta, la M-30 tiene unas horas punta que están comprendidas entre las 07:00 a 09:30 y las 17:00 a las 19:30, con unas secciones de hasta 18 carriles, que alcanzan los 225.000 vehículos diarios.
3. Por la complejidad de los túneles con 21 bocas de entrada y 24 bocas de salida.
4. Por el número de kilómetros de túnel, que hacen que sea el túnel urbano más largo de Europa.
5. Por el número de incidencias que se gestionan anualmente.
6. Por la necesidad de la inmediatez en la atención de dichas incidencias, sobre todo en aquellas que suceden en los túneles, con un tiempo de atención en los túneles menor a 6 minutos y en cielo abierto de 12.
7. Por el número de instalaciones que forman parte de la M-30. Algunos de los números más relevantes: 1.000 Ventiladores, 1.600 CCTV, PSOS, BIE, etc…

   Añadir, que cada uno de estos sistemas, genera un gran número de datos, que, si se analizan correctamente, prestan un gran valor en la gestión y explotación de la M-30.
8. Por los más de 300 trabajadores que intervienen de forma continua 24/7, en el mantenimiento, conservación y explotación de la vía.

Todos estos factores, hacen que cualquier incidencia o situación anómala en la M-30, o en los accesos a la misma, tenga una gran repercusión, por lo que es imprescindible tener la mayor agilidad posible tanto en la detección, como en la activación y coordinación de los recursos internos, externos y servicios de emergencia.

Es el Centro de Control de la M30, quien realiza las labores de detección, activación y coordinación, además de tareas de comprobación de estado de los equipos, que efectúan junto al personal de mantenimiento. Para ello el personal de mantenimiento se desplaza a cada instalación realizando de manera coordinada con el Centro de Control, las distintas comprobaciones de los equipos. Estas tareas, conllevan un gran número de comunicaciones gestionadas por los operadores del Centro de Control.

Por lo que, sumando, el número de llamadas necesarias para realizar los trabajos de mantenimiento, además de las necesarias, para la gestión de incidencias, y las llamadas en las que se solicita información sobre lo que están ocurriendo, se produce una situación de sobrecarga en las comunicaciones realizadas y recibidas, para los operadores del centro de control de los túneles de la M30.

Al analizar esta situación, y en la búsqueda de dar el mejor servicio posible, se determina que, es necesario, que se disminuya el número de llamadas, pero a la vez, que la información sea accesible para todos.

Por ello, se crea una plataforma, que permita tener toda la información con la que se cuenta en los servidores de MC30, a tiempo real, y en cualquier dispositivo móvil, de aquellas personas o entidades que se determinas.

El ser ágiles, en el análisis y tratamiento de los datos recibidos de todas las instalaciones que se ubican a lo largo de la M-30, ofrece un gran apoyo, no solamente para la explotación de la vía, sino también para el mantenimiento y conservación de sus instalaciones.

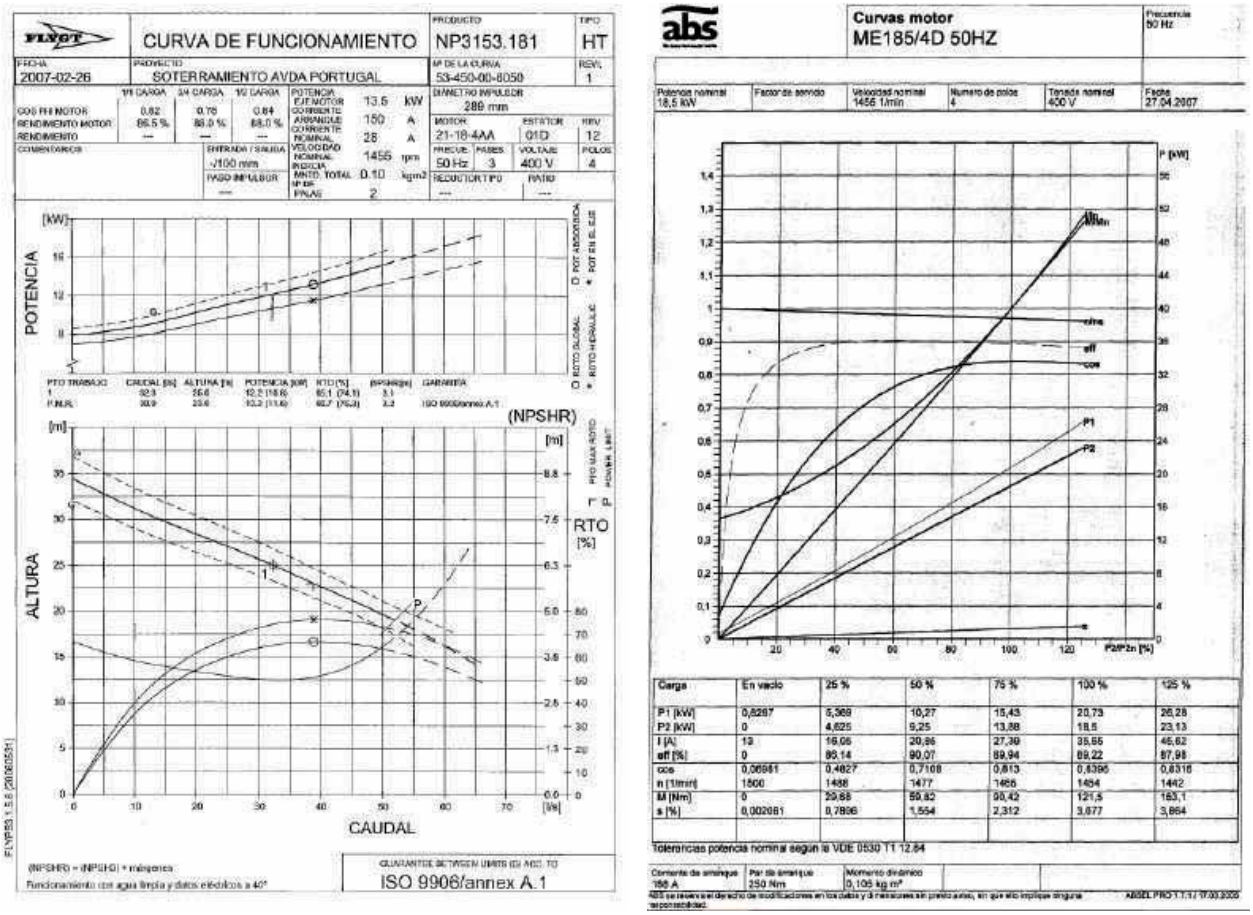
Para conseguir el mejor resultado, con la información que llega al Centro de Control, es imprescindible, una buena comunicación de los equipos de campo con el centro de control, procesar los datos y por último establecer patrones de comportamiento y si fuera necesario, elaborar algoritmos que controlen de forma automática los sistemas.

Estos análisis, se han utilizado para tomar decisiones de forma anticipada a nivel de mantenimiento, siendo necesario, en este caso, la prognosis, es decir, la predicción del funcionamiento futuro de los equipos. Así, se consigue cambiar el mantenimiento correctivo y preventivo, por el predictivo.

Uno de los grandes logros en la utilización del Big Data en la Explotación de MC30, ha sido utilizado en las bombas de drenaje, que están a lo largo de los túneles de la M30.

En la M30, se bombean al día mas de 15.000 metros cúbicos de agua, con 100 bombas repartidas en 32 cuartos técnicos, por lo que un fallo en una de las bombas puede provocar, que el agua llegue a calzada, con los consecuentes problemas de tráfico o en instalaciones, que puede ocasionar. Por ello, se pensó en que sería un gran apoyo en el mantenimiento y explotación, el realizar un análisis del comportamiento de la instalación, para pasar del clásico mantenimiento preventivo, que se estaba haciendo hasta el momento, al predictivo, reduciendo con ello, el número de intervenciones, los tiempos de parada y los desplazamientos.

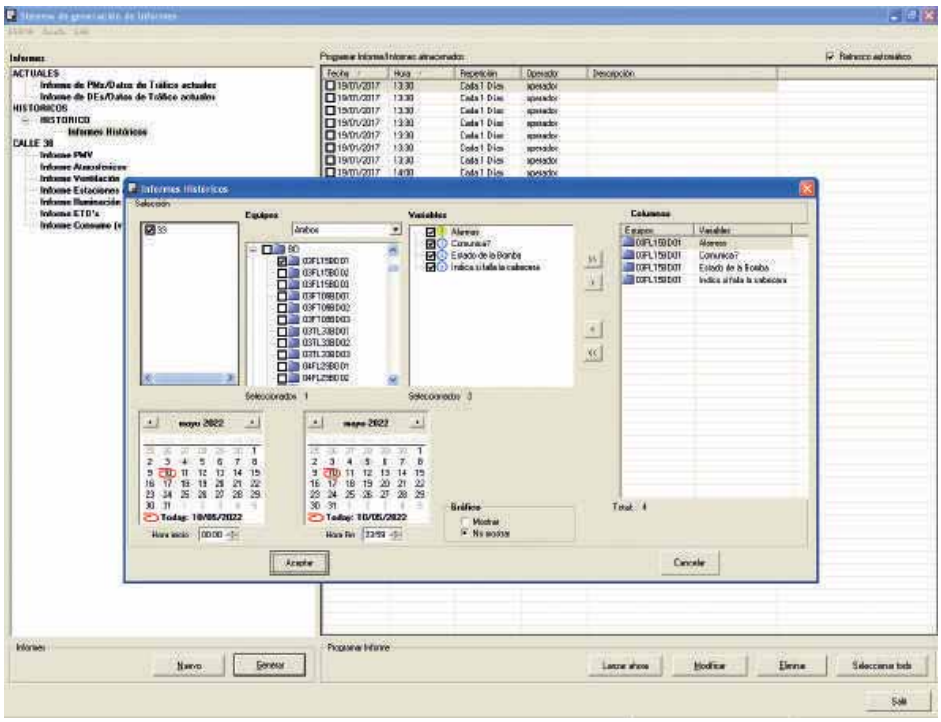
Para ello se partió de los datos de las bombas, por un lado, los descritos por el fabricante. Gracias a sus curvas de funcionamiento, se puede conocer el volumen bombeado, en un periodo de tiempo.



Ejemplo de curvas de funcionamiento de bombas de drenaje

Por otro lado, los datos que llegan a los servidores de MC30.

ITS, arroja en tiempo real, las paradas y arranques, de cada una de las bombas, por lo que es fácil saber los tiempos de funcionamiento.



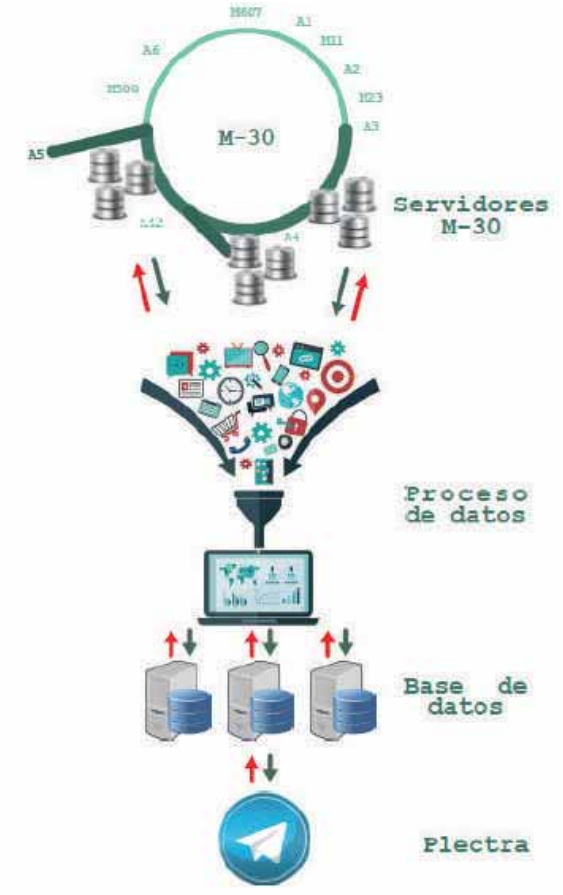
Ejemplo de información de bombas de drenaje en ITS

Teniendo ambas fuentes de datos, se analizan y cruzan, y se llega a un modelo de comportamiento, y se establecen parámetros como son, que bombas van a arrancar, cuando y durante cuánto tiempo.

Además, se puede estudiar varios puntos:

- si la situación prevista y la real es la misma o presenta desviaciones, pudiendo así detectar incidencias o fallos .
- si hay un comportamiento análogo, de las bombas dentro del grupo, ya que, los grupos de drenaje, están compuestos por 2 ó 3 bombas, y puede que no todas estén teniendo el mismo rendimiento, arranques.
- si el pozo de drenaje esta sobredimensionado o infradimensionado.
- o si hay bombas que están trabajando en vacío.

Para conseguir que toda esta información llegara a todos los integrantes del mantenimiento, conservación y explotación de la M-30, en abril de 2020, se comienza a utilizar, la aplicación de mensajería instantánea, TELEGRAM, para la difusión de estos datos, bautizada con el nombre de, PLECTRA, Plataforma para La Explotación y Comunicación en Tiempo Real con Autómata.



PLECTRA es una aplicación en la que se puede consultar todos los desarrollos que se han ido creando. Para ello se han desarrollados varios BOTs, donde poder consultarlos.

¿Qué es un BOT? Los bot, son pequeños programas que pueden desarrollarse por el propio usuario, usando la API de bots de TELEGRAM.

De hecho, todos los bots que utilizamos son desarrollos internos, hechos a medida para cubrir las distintas necesidades.

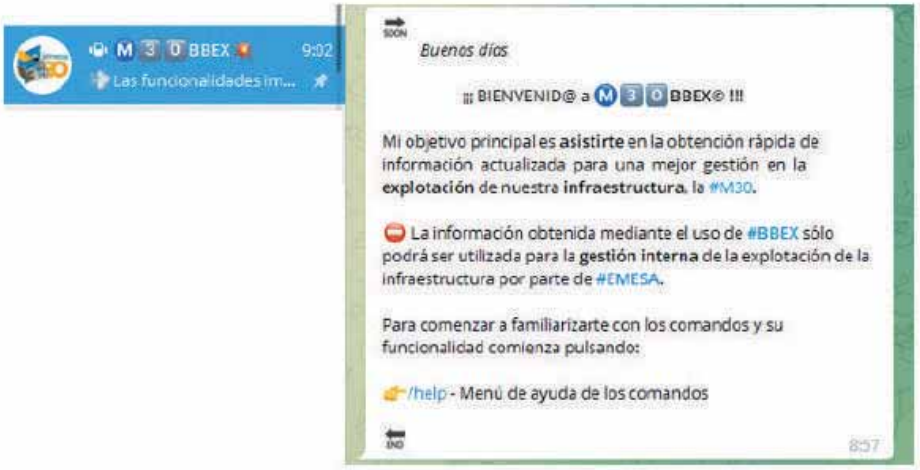
En el bot se programan una serie de consultas y el administrador del bot, de permisos a los usuarios, para poder acceder a esta información.

Si un usuario, tiene permiso para acceder al bot, este, realizara las consultas que necesite, y se dispararán los procesos necesarios, para dar respuesta a la consulta.

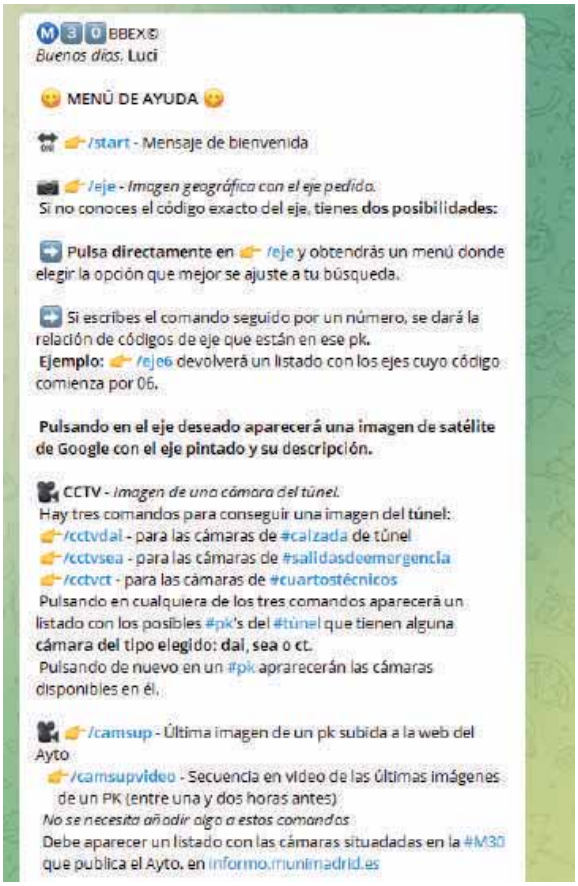
Los bots creados hasta la fecha por EMESA han sido:

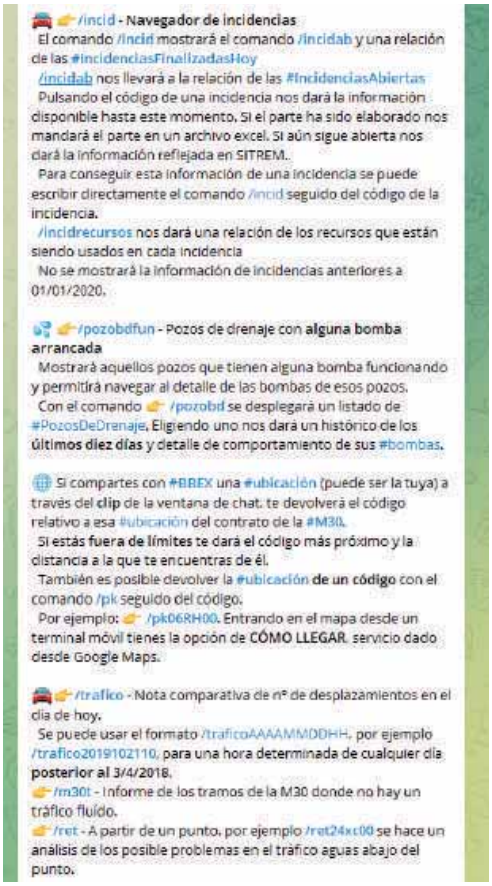
@EmesaBot, programado íntegramente en Mathematica 10. En el que hay desarrollados una serie de comandos que te permite realizar, un gran número de consultas predefinidas.

La primera de ellas el comando /start, para informar de en que consiste el bot, y que se trata de un bot de uso exclusivo, para la gestión interna de la explotación de la infraestructura por parte de #EMESA.



Desde aquí, se accede al comando x/help - menú de ayuda de los comandos desarrollados.

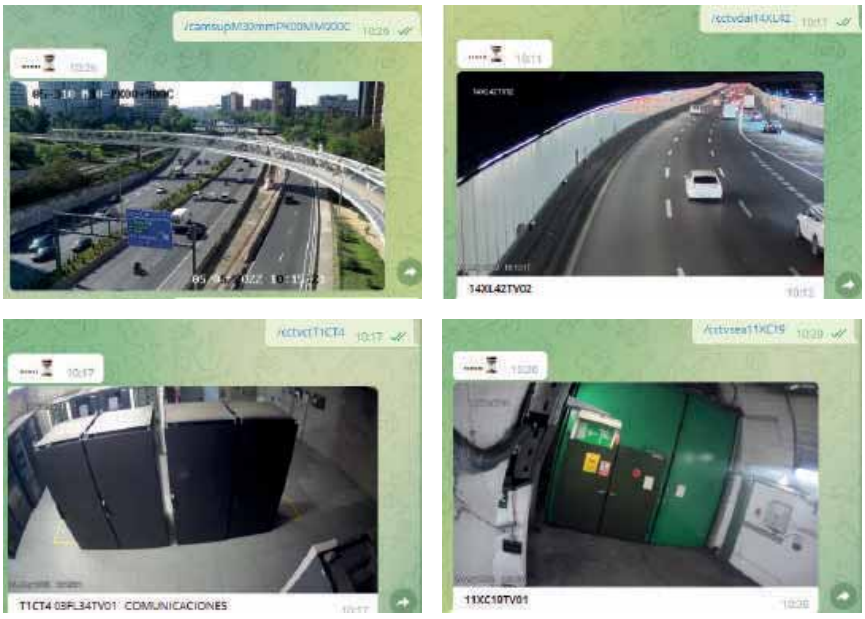




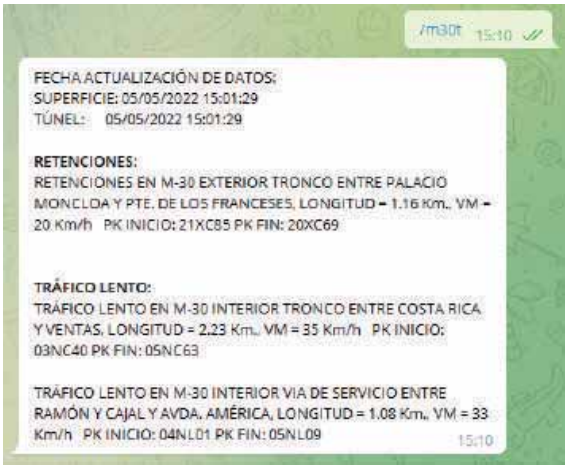
Algunas de las herramientas que más ayudaron al objetivo inicial, que era, la disminución de llamadas fueron:

- Incidentes abiertos /inciab y recursos activados en cada uno de ellos /incidrecursos

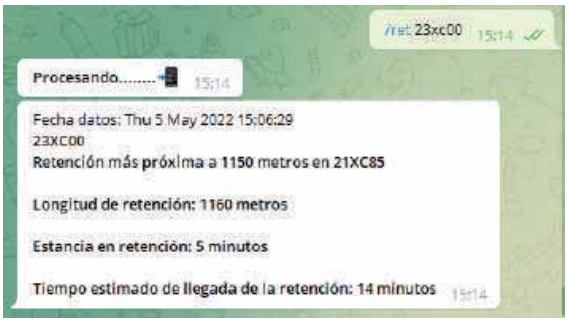
- Última imagen que se dispone de las más de 1600 cámaras ubicadas a lo largo de la M30, tanto de, /camsup superficie, /cctvdai túnel, /cctvct cada sala de los cuartos técnicos o /cctvsea salidas de emergencia.



- El estado del tráfico de toda la M30 /m30t, en el que se especifica según los datos de los puntos de medida, las zonas con retenciones o tráfico lento.



- Datos de retenciones aguas debajo de un punto /ret . En el que se especifica, la distancia a la retención más próxima, la longitud de la retención y la estancia a la retención.



Con estas consultas, se consiguió, que no fuera únicamente el centro de control, quien tuviera la información de la gestión de las incidencias. Gracias a estos desarrollos, cualquier usuario de EMESA, podría acceder desde su dispositivo móvil, por ejemplo, a la ubicación de las incidencias, imágenes de lo que está ocurriendo, o las incidencias abiertas y los recursos activado. Por lo que, se minimizaban las llamadas al centro de control para solicitar esta información.

En PLECTRA, también se han creado grupos con uno o varios administradores que deciden, los usuarios que formen parte del grupo. Los integrantes podrán escribir, o enviar archivos de hasta 2 GB cada uno.

Además, a estos grupos, el bot puede enviar información programada de forma periódica o si se produce una situación, como puede ser una alarma, un tipo de incidencia o una situación previamente definida.

Conociendo estas utilidades, se analizó qué información sería interesante tener dentro del grupo de Incidencias, sin necesidad de preguntar a la sala del Centro de Control o al bot, sino que, los datos se mostraran de forma automática. Así, se concluyó que, se mejoraría la atención al usuario si, el personal que va al punto pudiera tener los siguientes datos:

- Punto exacto de la incidencia
- Denominación
- Recursos activados
- Navegador a la ubicación a nivel rodadura

- Navegador a la ubicación de la salida de emergencia aguas arriba y aguas debajo de la incidencia, a nivel de superficie.
- Última imagen del punto donde ha ocurrido la incidencia

- En caso de incidencia en cuarto técnico se muestra imagen de cada una de las salas, que forman parte de ese CT y los planos del mismo.

Ante la gran utilidad de estos desarrollos se dio traslado a los servicios de emergencia con los que colaboramos habitualmente, en concreto al Cuerpo de Bomberos del Ayuntamiento de Madrid.

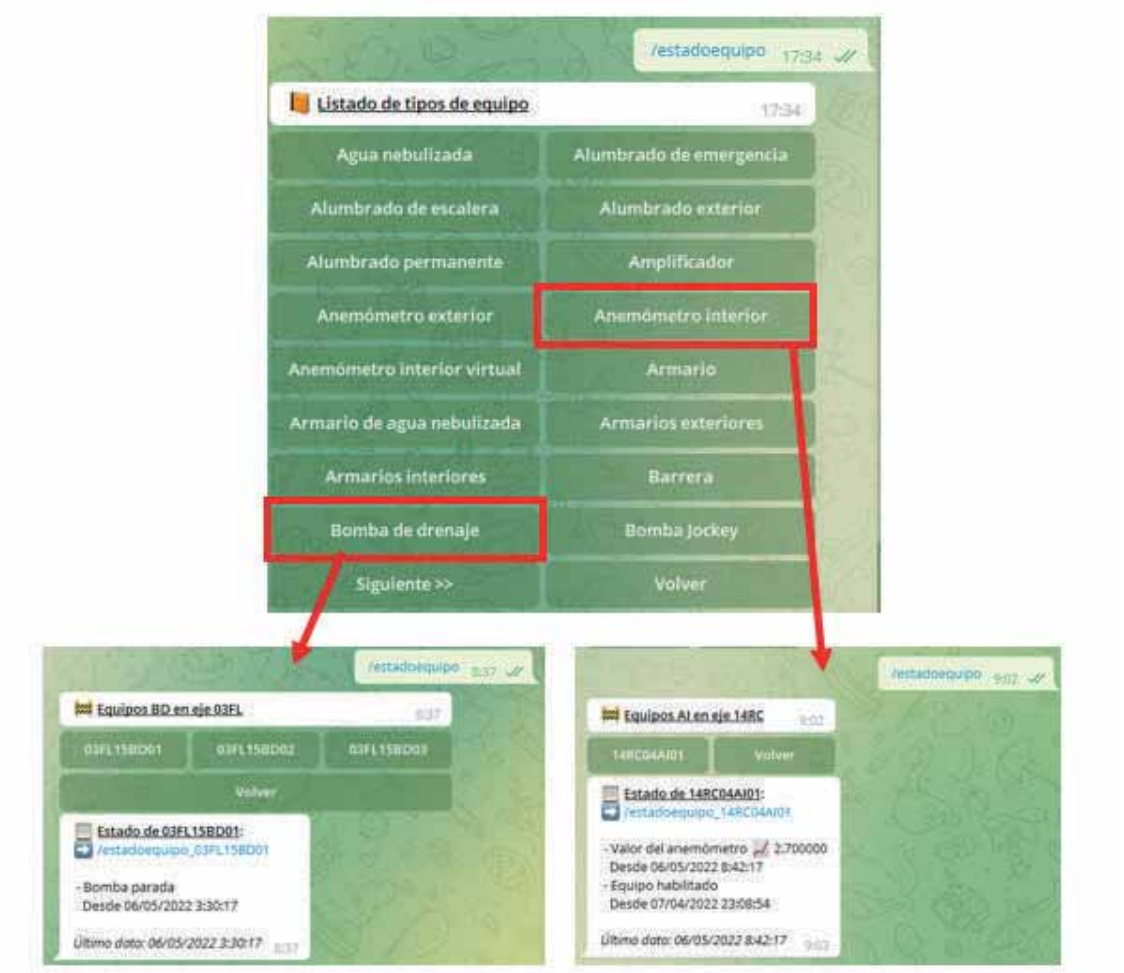
Quienes lo acogieron de forma muy positiva, creándose así, un grupo con personal de MC30, EMESA y Bomberos, donde se informa de las incidencias en las que está activado bomberos y de forma automática se envía la información solicitada por bomberos, como son: ubicación exacta del incidente y navegador para llegar al punto, planos de los cuartos técnicos, imágenes de dentro de los cuartos o de calzada según sea la incidencia.

Otra de las utilidades que presta TELEGRAM, y que se está utilizando con PLECTRA son los CANALES.

Así se creó el bot **@EmesaIncidenciasBot**, programado en Visual Basic, con el fin de eliminar el sistema de aviso por SMS, ya que, no tenía las prestaciones de TELEGRAM, y canales privados de difusión en los que se avisa a los miembros de cada uno de ellos cuando se produce una incidencia.

- Emesa - Incidencias no prioritarias
- Emesa - Averías y eventos
- Emesa – Incidencias prioritarias

Otro bot que se creó, principalmente para el personal de mantenimiento fue, **@EmesaInstalacionesBot**, programado en C#. Gracias a este bot, el personal desplazado a revisar las instalaciones puede tener la información de estado de cualquier equipo o de la existencia de alarmas, en sus dispositivos móviles, por lo que ya no es necesario, llamar al centro de control para realizar las comprobaciones.



Si bien, todos los bots se podrían unificar en uno, se ha optado por mantenerlo por separado, ya que, en momentos de gran demanda de consultas, se pueden saturar los procesos. Así al tener varios bots, se favorece la inmediatez en la respuesta de las consultas, y se evita la saturación.

Como ya se ha destacado anteriormente PLECTRA, es un desarrollo interno, en continua evolución.

Se ha continuado elaborando distintos algoritmos, que permiten una gestión automática del sistema, de tal forma que, por ejemplo, se pueda controlar el sistema de ventilación sanitaria, por los datos de ocupación de la vía y de atmosféricos.

En estos momentos, se está trabajando en dar apoyo en la gestión del mantenimiento de las estructuras.

M30 cuenta con, 84 puentes, 16 pasarelas, más de 100 muros de contención y mas de 250 pórticos, cada uno de estos elementos, tiene una inspección trimestral, lo que hace que cada trimestre, haya que realizar unas 500 revisiones en M30 y su entorno.

Por lo que, poder tener la mayor información posible, de accesibilidad, tráfico, cortes de calzada, etc…en tiempo real, hace que se disponga de una mayor seguridad para los trabajadores y eficacia en los trabajos, ya que, el personal del departamento de estructuras tendrá en su móvil información acerca de: tiempos de desplazamiento, utilización de cortes programados, datos relevantes de la estructura, mejores puntos para realizar cada una de las inspecciones, etc…

Como se puede desprender de todo lo descrito en este artículo, PLECTRA, es una aplicación versátil, que se puede utilizar en cualquier actividad y que estamos convencidos mejorará la gestión tanto de los Centros de Control, como de todas los entornos en los que se aplique.

CONCLUSIONES

La GESTIÓN DE TÚNELES URBANOS Y DE ELEVADO TRÁFICO, como son, los túneles de la M-30, requieren el análisis y tratamiento de todos los datos que se generan en la multitud de instalaciones que la componen.

El análisis Big Data es necesario, para poder optimizar la conservación, explotación y mantenimiento de una vía que cuenta más de 65.000 señales mensuales, que llegan al Centro de Control.

La recogida y procesamiento de datos, con los que llegar a patrones de comportamiento y elaboración de algoritmos, aportan un valor añadido en la gestión de la vía, y a esto se le suma, que estos análisis los pueden consultarse desde cualquier parte del mundo.

Por ello, PLECTRA, se ha convertido para EMESA, en la herramienta más utilizada y de mayor apoyo para la conservación, explotación y mantenimiento de la M-30.

BIBLIOGRAFÍA

Manuel Muelas Peña. El big data en la explotación de túneles. VI Simposio de túneles de carretera. Explotación sostenible de túneles.

API Telegram https://core.telegram.org/

DISEÑO DE INSTALACIONES EN TUNELES DE CARRETERA CON ANALISIS DE COSTE DE CICLO DE VIDA.

Juan Carlos Fernández Cuenca
TYPSA

Los Clientes exigen en las ofertas de túneles de carretera que los diseños permitan una Explotación Sostenible, y por tanto no se limiten al mero cumplimiento de la normativa. Son conscientes que los costes de los consumos eléctricos y de mantenimiento son muy elevados, y sus responsables habrán de gestionarlos durante muchos años, por lo que solicitan estudios previos de costes de explotación, ya en la etapa del Proyecto.

Las decisiones técnicas durante el proyecto y construcción son importantes y están siempre condicionadas por la capacidad disponible de inversión, pero sus implicaciones económicas a lo largo del ciclo de vida de equipos y materiales pueden suponer problemas difíciles de corregir.

El objetivo de esta comunicación es incidir en la importancia de realizar análisis de coste de ciclo de vida (ACCV), especialmente recomendables en el diseño de túneles largos, y explicar una metodología a seguir durante las fases de Proyecto y Construcción.

DESIGN OF ROAD TUNNEL INSTALLATIONS WITH LIFE CYCLE COST ANALYSIS

In tenders for road tunnels, Clients demand that the designs allow for Sustainable Operation, so they ask for more than just compliance with regulations. They are aware that the costs of electricity consumption and maintenance are very high, and those responsible will have to manage them for many years, so they ask for prior studies of operating costs, already in the project phase.

Technical decisions during design and construction are important and are always conditioned by the available investment capacity, but their economic implications over the life cycle of equipment and materials can pose problems that are difficult to correct.

The aim of this document is to highlight the importance of carrying out Life Cycle Cost analysis, particularly recommended in the design of long tunnels, and to explain a methodology to be followed during the design and construction phases.

CONCEPTION D'INSTALLATIONS DE TUNNELS ROUTIERS AVEC ANALYSE DU COÛT DU CYCLE DE VIE

Dans les appels d'offres pour les tunnels routiers, les clients exigent que les conceptions permettent une exploitation durable, ils demandent donc plus que la simple conformité aux réglementations. Ils sont conscients que les coûts de consommation et d'entretien sont très élevés et que les responsables devront les gérer pendant de nombreuses années. Ils demandent donc des études préalables des coûts d'exploitation, dès la phase de projet.

Les décisions techniques pendant la conception et la construction sont importantes et sont toujours conditionnées par la capacité d'investissement disponible, mais leurs implications économiques sur le cycle de vie des équipements et des matériaux peuvent poser des problèmes difficiles à corriger.

L'objectif de ce document est de souligner l'importance de l'analyse du coût du cycle de vie, particulièrement recommandées dans la conception des tunnels longs, et d'expliquer une méthodologie à suivre pendant les phases de conception et de construction.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

La inversión para la construcción de un túnel de carretera es muy elevada, pero también es muy importante el gasto durante la etapa de explotación de este, donde los costes de los consumos eléctricos, el mantenimiento y la reposición representan un peso comparativamente similar.

Frecuentemente se solicitan estudios previos de costes de explotación (ya en la etapa de proyecto, como estimación preliminar), y por tanto soluciones técnicas eficientes para sistemas y equipos que reduzcan estos costes en el futuro, y no comprometan la seguridad del diseño.

Las decisiones técnicas durante el diseño y en la construcción tendrán consecuencias (positivas o negativas) que habrán de ser gestionadas por los responsables de su explotación durante años (típicamente 25 años).

Las consecuencias de una acertada elección inicial pueden resultar un éxito para la operación diaria de los túneles, minimizando los costes de operación a lo largo del ciclo de vida de equipos y materiales implicados, o bien suponer problemas tanto de operación, como de costes altos de operación, a veces difíciles de corregir.

El objetivo de este documento es incidir en la importancia de realizar análisis preliminares de Costes de Ciclo de Vida (CCV), y para ello aportará unas recomendaciones y una metodología para incorporarlos como una actividad más e ineludible a desarrollar por las Ingenierías durante la fase de diseño de un proyecto.

Aunque los análisis CCV implican un coste y plazo algo mayor para las Ingenierías, sin duda tendrán como resultado costes más bajos de operación, mantenimiento y explotación durante el periodo de concesión.

Los sistemas de Instalaciones Electromecánicos e ITS en túneles de carretera tienen un peso comparativo muy relevante en el Coste Total de Ciclo de Vida, y en el coste de Mantenimiento y Reposición respecto a los costes de Obra Civil.

Tabla 1. Ejemplo de coste de mantenimiento y reposición en un periodo de10 años

LIFE CYCLE COST A13													
Constant GBP 2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030		
DOCKLANDS ROADS	£88.308	£1.481.575	£8.651.154	£414.319	£560.673	£134.939	£103.891	£152.235	£299.455	£1.473.202	£9.213.702	£22.573.453	
Roadworks	**£0**	**£0**	**£0**	**£372.762**	**£355.925**	**£72.604**	**£0**	**£0**	**£114.396**	**£177.327**	**£280.215**	**£1.373.229**	6%
Pavement (Resurface)	£0	£0	£0	£372.762	£355.925	£0	£0	£0	£114.396	£177.327	£0	£1.020.410	
Concession boundaries(fences ,walls,..)	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£82.206	£82.206	
Road marking	£0	£0	£0	£0	£0	£35.259	£0	£0	£0	£0	£35.259	£70.518	
Signs	£0	£0	£0	£0	£0	£37.345	£0	£0	£0	£0	£37.345	£74.690	
Safety fences	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£125.405	£125.405	
Structures & Bridges	**£0**	**£9.779**	**£209.306**	**£0**	**£0**	**£0**	**£0**	**£0**	**£0**	**£1.145.233**	**£489.435**	**£1.853.752**	8%
Tunnel	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£665.233	£0	£665.233	
Underbridges	£0	£0	£209.306	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£209.306	
Walls and gantries	£0	£9.779	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£9.435	£19.214	
Tunnel panels	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£480.000	£480.000	£960.000	
Plant & Machinery (Tunnels)	£88.308	£1.471.796	£8.441.849	£41.557	£204.748	£62.335	£103.891	£152.235	£185.059	£150.643	£8.444.052	£19.346.471	86%
Ventilation	£0	£0	£4.729.808	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£4.729.808	
Lighting tunnel	£88.308	£1.471.796	£25.973	£41.557	£51.946	£62.335	£103.891	£119.475	£135.059	£150.643	£166.226	£2.417.308	
Power supply	£0	£0	£3.115.068	£0	£152.802	£0	£0	£32.760	£0	£0	£185.562	£3.486.192	
Firefighting	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£417.955	£417.955	
Drainage system	£0	£0	£220.000	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£220.000	
Cabling	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£4.068.136	£4.068.136	
SCADA	£0	£0	£351.000	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£351.000	£702.000	
Service Building	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£3.255.172	£3.255.172	
Traffic management	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£0	£50.000	£0	£0	£50.000	
TOTAL	£2.103.371	£3.866.284	£9.291.060	£1.072.254	£1.122.388	£1.871.888	£1.540.996	£1.610.486	£6.994.933	£2.108.191	£12.689.370	**£44.271.221**	

2. NORMATIVA DE SEGURIDAD EN TÚNELES Y ANÁLISIS CICLO DE VIDA

Las normativas para el diseño de Seguridad en túneles de carreteras son:

- España, RD 635/2006
- Resto Europa, Directiva Europea 2004/54/CE, o normas específicas
- EE. UU., NFPA 503
- Países sin normativa específica, recomendaciones indicadas en PIARC.

Especialmente para Análisis de Ciclo de Vida en túneles de carretera se han de tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

2.1. Norma ISO 50126 RAMS. Fiabilidad, disponibilidad, mantenimiento y seguridad

La norma RAMS es una norma común que trata los aspectos de probabilidades de los ciclos de vida, que implica definir los requisitos de calidad y de esperanza de vida de subsistemas y componentes.

Los cuatro elementos de la norma RAMS (fiabilidad, disponibilidad, mantenimiento adecuado y seguridad) son aplicables a los requerimientos técnicos de los sistemas utilizados en túneles de carretera.

La fiabilidad de los sistemas se presenta como una función que describe los fallos de cada sistema en relación con el tiempo de funcionamiento. No solamente desciende con el paso del tiempo, sino que además depende de las condiciones ambientales (temperatura, contaminación ambiental, vibraciones, etc..).

La disponibilidad de un sistema se define como el cociente del valor medio del tiempo en que el sistema funciona como se ha planificado y el tiempo medio entre fallos, y se incrementará, si es posible prolongar el Tiempo medio hasta el fallo (MTBF) y, al mismo tiempo, mantener el Tiempo medio entre reparaciones (MTBR) en un nivel constante.

2.2. Norma ISO 15686. Planificación de la vida útil

Aunque la norma está prevista para edificios, también es de aplicación para los equipamientos eléctricos de túneles. Consta de 10 partes, y en concreto la parte 5 prevé la evaluación de los costes del ciclo de vida.

incluye la previsión de la vida útil de servicio que debe tener en cuenta:

- La durabilidad probable de los componentes (analizable en la fase de Diseño)
- El coste del ciclo de vida y el impacto ambiental (a evaluar en fase Diseño y a desarrollar durante Explotación).
- Los costes de operación y mantenimiento (relacionados con criterios de Diseño)
- La necesidad de reparaciones, sustituciones, desmantelamiento, retirada, reutilización y eliminación.
- La construcción, instalación y mantenimiento de los componentes de todo el sistema.

3. ANÁLISIS DE COSTES DEL CICLO DE VIDA (CCV)

El análisis de CCV se ha de basar en los requisitos del Cliente y debe ser revisado y actualizado durante la vida del proyecto. Debe englobar la totalidad de los elementos independientes y la interacción entre ellos, y se debe utilizar para evaluar si mayores costes de adquisición son una buena inversión para disminuir los CCV.

Según informe PIARC [2], la vida útil promedio de los equipamientos varía entre 10 y 25 años, según el sistema. Los sistemas electrónicos y los equipos de monitorización (como los sistemas SCADA) tienen una vida útil limitada en torno a los 10 años, en tanto que los sistemas mecánicos y de suministro/cableado eléctrico se caracterizan por previsiones de vida útil superior a 20 años.

La duración de los equipos de iluminación es relativamente baja (11-12 años), y en ello influye el ambiente agresivo de la atmósfera del túnel (temperatura, humedad y contaminantes). Los equipamientos de seguridad y señalización tienen una vida útil de aproximadamente 15 años.

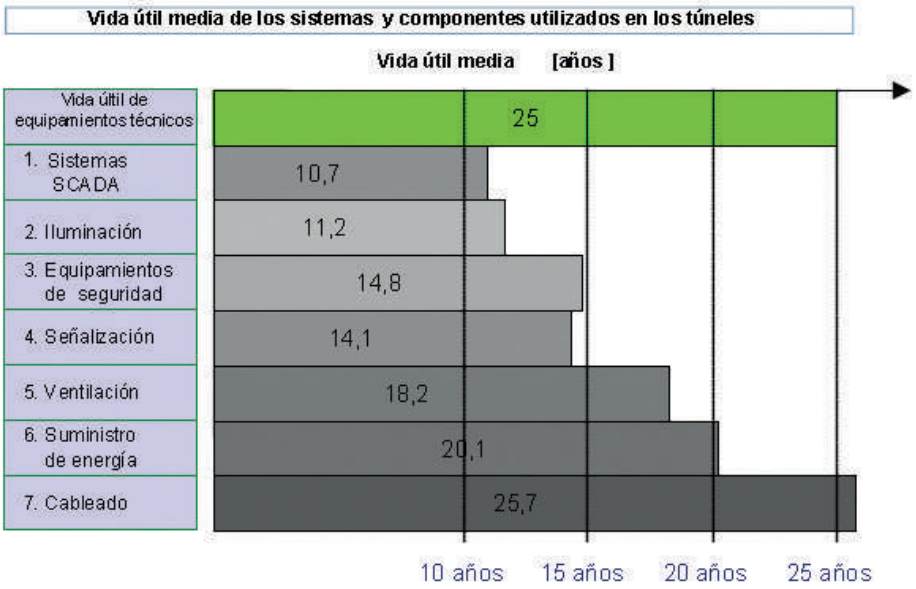


Figura 1. Vida útil media de sistemas de Instalaciones en un túnel

3.1. Presupuestos de inversión y reemplazamiento de instalaciones

Durante el diseño se ha de evaluar el número y situación de equipos y materiales, que a ser posible minimicen la inversión inicial y los costes de operación y mantenimiento. Minimizar la inversión inicial no es siempre sinónimo de menores costes de explotación.

De forma general menos equipos instalados conlleva menos mantenimiento (menos coste), pero no siempre menos costes de explotación, ni facilidades para la operación del túnel. El CCV global puede ser mayor que con más equipos.

Algo similar ocurre cuando los equipos instalados inicialmente son de menor inversión por peores prestaciones o inferior calidad técnica. El CCV global puede ser mayor debido a un mantenimiento más frecuente y a costes de reposición más elevados, que con equipos de mayor inversión inicial o de mejores prestaciones.

Se hace necesaria una ingeniería de valor durante la fase de diseño, con estudio de alternativas de Coste de Ciclo de Vida para buscar el menor coste de propiedad a largo plazo.

3.2. Estudios previos de costes de explotación

Analizando los consumos de energía en un túnel, se observa que los mayores corresponden a la Iluminación y a la Ventilación (más predecibles los primeros y variables los segundos).

De acuerdo con lo anterior, y sin descuidar el resto de los sistemas, serán recomendables estrategias que tiendan a minimizar principalmente los costes de energía de Ventilación e Iluminación.

La potencia eléctrica demandada para un túnel unidireccional interurbano de 1,2 km con dos tubos es el mostrado en la tabla siguiente (iluminación 100% LED).

Tabla 2. Potencia demandada en funcionamiento normal en un túnel de 1,2 km

TUNEL UNIDIRECCIONAL DE 1,2 KM, 3 CARRILES CON DOS TUBOS Y GALERÍAS EVACUACION	MAX. POTENCIA DEMANDADA [kW]	%
ILUMINACION	457	29%
VENTILACION	710	45%
PRESURIZACION GALERIAS.	25	2%
ITS, TELECOMUNICACIONES Y CENTRO CONTROL	23	1%
FUERZA Y BOMBEO HIDRANTES	15	1%
EDIFICIOS TÉCNICOS	51	3%
CARGA VEHICULOS ELECTRICOS	300	19%
TOTAL	1.579	

Como ejemplo en la figura siguiente vemos el reparto del consumo eléctrico en un túnel de 3 km entre los diferentes sistemas de Instalaciones.

En él se muestran además dos opciones de iluminación: opción 1 con lámparas descarga y opción 2 con lámparas LED (sólo para alumbrado permanente).

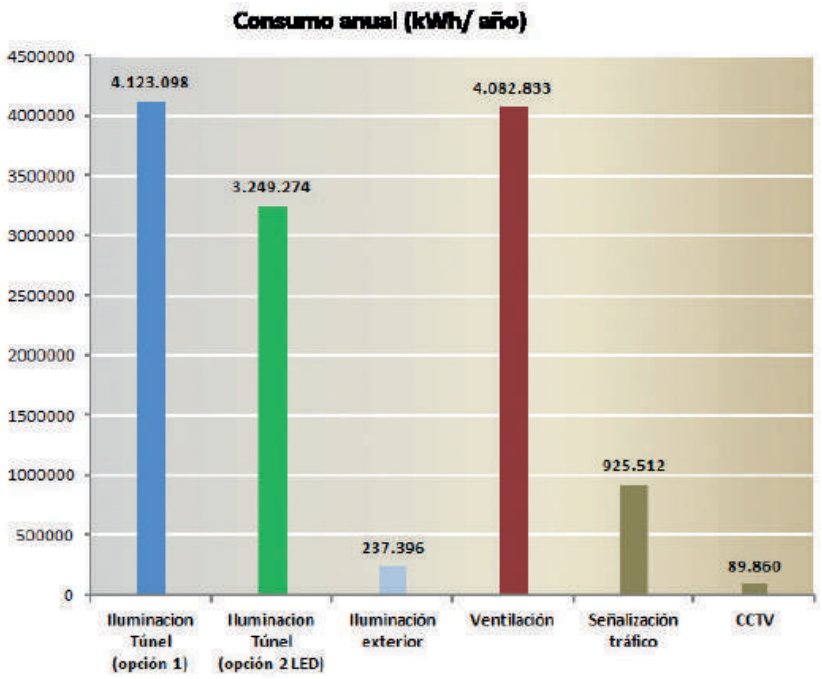


Figura 2. Consumos anuales de energía eléctrica (kWh) por sistemas en un túnel de 3km

3.3. Índices financieros y decisiones importantes

Para realizar un buen análisis del CCV se debe utilizar la herramienta financiera Valor Actual Neto (VAN), que permite evaluar el valor económico añadido.

El VAN es entonces la cantidad que el proyecto añadirá a la riqueza de los accionistas, y ha de ser positivo para considerar rentable una inversión.

El valor actual de los flujos de caja netos futuros de una inversión menos la inversión inicial para un tipo de descuento de referencia determinado (el tipo de interés utilizado para descontar los flujos de caja futuros) se suman para obtener el neto.

La rentabilidad se define como el tipo de descuento (porcentaje) que hace el VAN igual a cero. Esto se conoce como la tasa interna de rentabilidad (TIR).

Tanto el criterio del VAN como el criterio del TIR reflejan adecuadamente el valor del dinero en el tiempo. Pero también se usan otros criterios informales como el del plazo de recuperación, que establece que un proyecto es aceptable si se recupera su dinero dentro de un periodo especificado.

El criterio del plazo de recuperación no tiene en cuenta aquellos flujos de tesorería que llegan después del periodo de recuperación, y no descuenta los flujos de tesorería dentro del periodo de recuperación.

Costes ocultos detectados por CCV

- A menudo, los costes de mantenimiento (incluidos los costes ocultos) son de 2 a 20 veces los costes de adquisición (costes evidentes)
- Alrededor del 65% o más de los costes totales del ciclo de vida se fijan en el momento en que se especifican los equipos (pero en ese momento sólo un pequeño porcentaje de los fondos previstos se ha gastado).
- Mimimizar el CCV aumenta el VAN, y por tanto aumenta las expectativas de beneficio de los accionistas.
- Para encontrar el menor CCV a largo plazo, es necesario detallar tanto los costes de adquisición como los costes de mantenimiento, y elegir entre distintas alternativas.

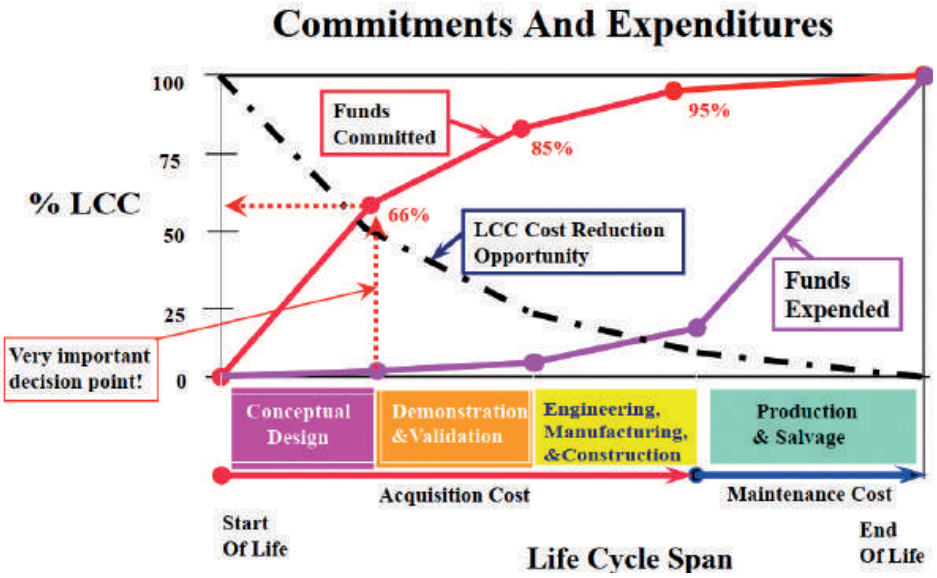


Figura 3. Compromisos y gastos durante el ciclo de vida, y porcentaje de coste de ciclo de vida

4. METODOLOGÍA ACV PARA LOS SISTEMAS DE INSTALACIONES

La gestión del ciclo de vida de los "activos" debe ser una herramienta "práctica" ideada para medir su estado o condición actual y el deseado u objetivo en el futuro, pero también para identificar, cuantificar y priorizar las tareas de mantenimiento, de acuerdo con el dinero disponible. Para ello se necesitan índices técnicos y económicos que permitan evaluar el ciclo de vida útil de los equipos y sistemas, y estimar su coste.

La gestión del ciclo de vida se debe aplicar tanto en fase de diseño como durante la fase de explotación, resultando recomendable el uso de herramientas basadas en el control de la Fiabilidad y el Mantenimiento, pues conllevarán ahorros totales de hasta el 18%, como se indica en la figura siguiente:

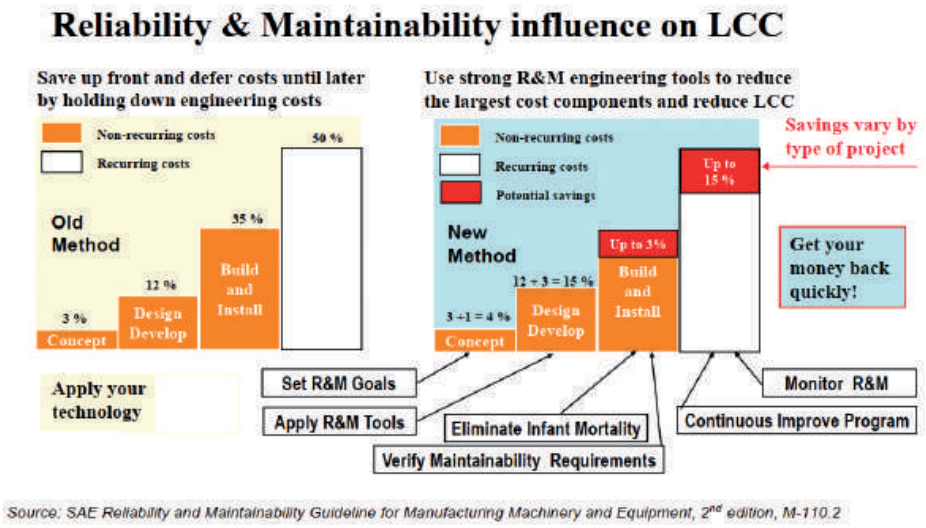


Figura 4. Estrategias de Fiabilidad y Mantenibilidad para el cálculo del Coste de Ciclo de Vida

Como procedimiento de trabajo, ya desde la fase Conceptual de un diseño habrá que establecer lo siguiente:

- Requerimientos de Fiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad
- Definir el nivel de fallos funcionales
- Definir las condiciones medioambientales para el uso de los sistemas
- Estimar la inversión disponible y los márgenes de contingencia

En la fase de Ingeniería de Diseño:

- Actualizar la previsión de inversión necesaria
- Analizar las alternativas de diseño que pueden mejorar el Conceptual
- Realizar un diseño pensado para ser mantenible
- Realizar predicciones de Fiabilidad y análisis de fallos posibles
- Estudiar opciones de fabricantes de equipos y sistemas de calidad apropiada (ver ejemplo siguiente):

Tabla 3. Ejemplo con estudio de alternativas de Fiabilidad y Coste total Ciclo de Vida

Alternativas para la compra de un equipo	1. Buena	2. Mejor	3. Optima
Coste inicial equipo (€)	50.000	75.000	150.000
Indice de fallo (fallos / hora)	0,0005	0,0001	0,00001
Fiabilidad (durante un año)	1,25%	41,64%	91,61%
Numero fallos en 20 años	87,6	17,52	1,752
Coste de fallos en 20 años (5.000 €/ fallo)	438.000	87.600	8.760
Revision principal del equipo cad 5 años (€)	10.000	20.000	45.000
Revisiones principales en 20 años	3	1	1
Coste total revisiones principales	30.000	20.000	45.000
Coste Mantenimiento rutinario (€/h)	1	1	1
Coste de mantenimiento rutinario (€)	175.200	157.680	157.680
Coste de eliminación o retirada (€)	5.000	5.000	5.000
Costes totales en el periodo (€)	698.200	345.280	366.440

Ya en fase de Ejecución por Contratistas:

- Realizar pruebas de calidad de fiabilidad y aplicar criterios de aceptación
- Mejoras de Fiabilidad y Disponibilidad sobre el proyecto previo de Ingeniería

Y en la fase de Operación y Mantenimiento:

- Continuar con posibles mejoras de Fiabilidad y Disponibilidad de los sistemas
- Registrar fallos y realizar informes de análisis específicos.
- Monitorizar y optimizar costes de consumos de Energía y de Mantenimiento.

4.1. Índices RAMS para Análisis Ciclo Vida.

4.1.1. Fiabilidad e índices de fallo.

La curva de la "bañera" se utiliza en ingeniería para describir índices de fallos en el transcurso del tiempo. Consta de tres partes:

- Fallos iniciales (mortalidad infantil)
- Fallos normales (madurez)
- Fallos de desgaste (proceso envejecimiento).

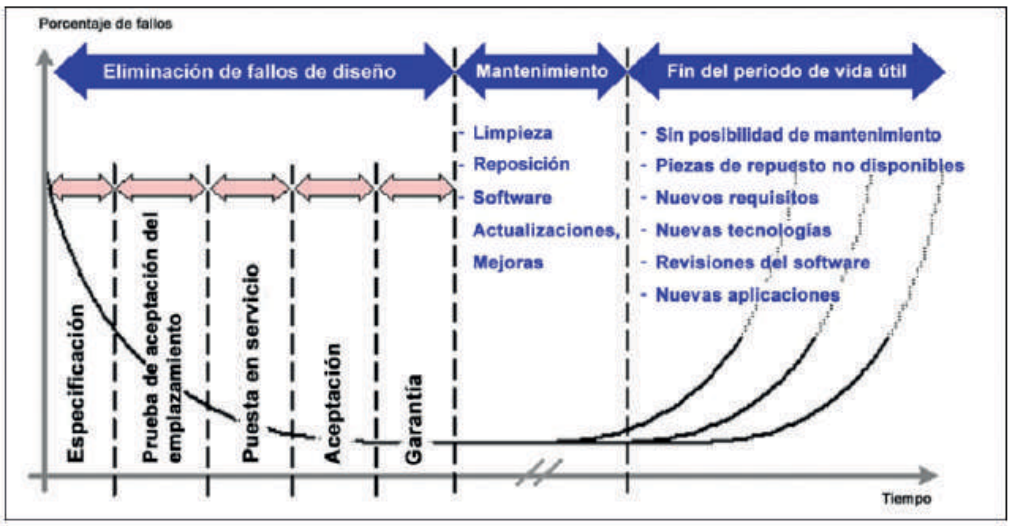


Figura 5. Curva de la bañera e índice de fallos

Los índices de fallos pueden utilizarse como una simple estrategia de mantenimiento, pero se puede aplicar estrategias de mantenimiento probabilísticas más avanzadas. Los índices de fallos pueden obtenerse de los fabricantes (planteamiento inicial y teórico), o bien como resultado y experiencia de instalaciones en servicio.

Por tanto, una vez investigados los ciclos de vida típicos de los equipamientos de túneles, es importante demostrar la influencia en los ciclos de vida de los siguientes aspectos:

- procesos de envejecimiento de materiales, dispositivos y componentes, pues ayuda a seleccionar las instalaciones atendiendo a la relación calidad-precio.
- condiciones térmicas
- tensiones mecánicas
- selección de componentes de los sistemas
- estrategias de mantenimiento
- costes de sustitución

La fiabilidad general es consecuencia de los índices de fallos de todos los elementos del sistema. Una clave para mantener un sistema en estado fiable es diseñar redundancias e incluirlas en el proceso operativo. Si algunos componentes del sistema fallan, los componentes de reserva tienen posibilidades de incrementar la fiabilidad porque son vías alternativas para el cumplimiento de las funcionalidades específicas.

4.1.2. Disponibilidad

Tiempo medio hasta un fallo (MTTF): Tiempo medio entre fallos con la hipótesis de que el sistema fallido no es reparado. Este método se utiliza en productos o componentes irreparables asociados con sistemas.

Tiempo medio entre reparaciones (MTTR): Tiempo medio necesario para reparar un sistema o componente fallido.

La disponibilidad "A" de un sistema se define como el cociente del valor medio del tiempo en que el sistema funciona como se ha planificado, y el tiempo medio entre fallos (MTBF = MTTF + MTTR)

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

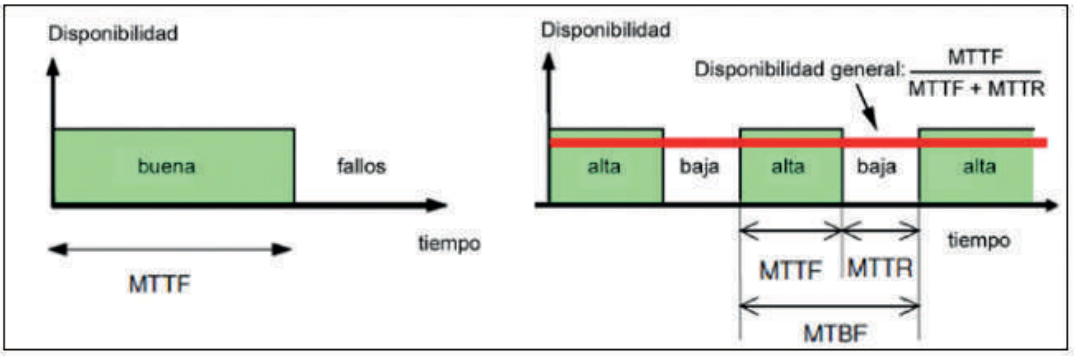


Figura 6. Disponibilidad

El índice de fallos (λ) puede determinarse fácilmente mediante investigación del ciclo de vida de una muestra de componentes idénticos.

$$\lambda = \frac{\text{Número de componentes fallidos en el periodo}}{\text{Número de componentes en buen estado al inicio del periodo}}$$

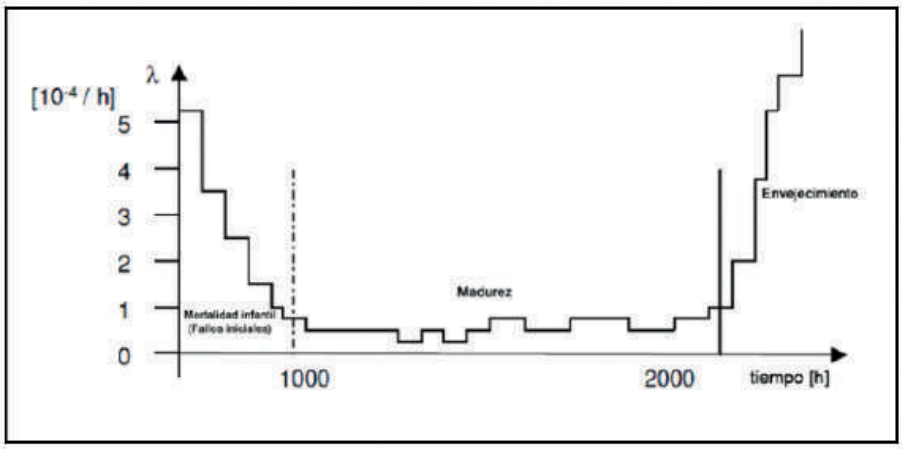


Figura 7. Tasa experimental de fallos

4.1.3. Mantenibilidad

En relación con el mantenimiento adecuado de las instalaciones de un túnel, el análisis de ciclo de vida debe incluir obligatoriamente cuatro aspectos clave, cada uno de los cuales se puede asimilar con un índice a medir y registrar periódicamente, que influirá en la prolongación o reducción de la vida útil de dichos activos:

- Calidad del Mantenimiento Preventivo
- Reducción del Mantenimiento Diferido
- Renovación periódica de componentes
- Actualización de funcionalidades del equipo o sistema

De los puntos anteriores, resulta especialmente importante el mantenimiento diferido que tiene que ver con tareas necesarias de mantenimiento que se posponen más allá del tiempo inicialmente planificado, por falta de presupuesto, de recursos o por cambio de "prioridades" sobre los activos a mantener.

Esto es a menudo inevitable, pero lo que hay que vigilar permanentemente, y por tanto "medir" es sus desviaciones por equipo o sistemas para reducirlo al máximo.

Por tanto, es muy recomendable disponer de un plan de reducción del mantenimiento diferido, ajustado al nivel de inversión disponible, en el que se haga evidente esta dependencia.

Es fundamental también la renovación de componentes, es decir el reemplazamiento o sustitución de aquellos elementos de un equipo o sistema que han alcanzado su fin de vida útil, o están próximo a hacerlo, principalmente de acuerdo con las indicaciones iniciales de los fabricantes o como consecuencia del aumento de numero de fallos (tasa de fallos).

Además del conocimiento de los ciclos de vida, la estrategia de mantenimiento depende también de los siguientes factores:

- Comportamiento técnico del sistema;
- Influencias medioambientales;
- Financiación disponible.

La experiencia demuestra que el mantenimiento preventivo es fundamental para el ciclo de vida útil de los sistemas y de sus componentes. Ello por otra parte tiene el potencial de prolongar el MTTF de los componentes, lo que aumenta la disponibilidad general del sistema.

El estado de determinados sistemas y componentes puede categorizarse y adaptarse al plan de mantenimiento. Muchos sistemas pueden verificarse recogiendo datos intrínsecos específicos o mediante inspección visual (valor de la vibración de un ventilador para verificar estado del cojinete, niveles de iluminación).

Los equipamientos eléctricos y mecánicos instalados en el túnel están expuestos a una atmósfera agresiva que produce la corrosión y el desgaste de los cojinetes. Por consiguiente, el mantenimiento recomendado deberá realizarse periódicamente para ampliar la vida útil de los sistemas (lubricación de cojinetes, limpieza).

Los esfuerzos mecánicos constituyen otro factor importante para la aceleración del envejecimiento: las cargas de viento generadas por los camiones, las vibraciones durante el funcionamiento (por ejemplo, de los ventiladores por falta de mantenimiento o por desgaste de los cojinetes) y la expansión y contracción como consecuencia de los cambios de temperatura.

También influyen en envejecimiento las tensiones de tracción y los radios de curvatura de los cables eléctricos, durante la ejecución y una vez tendidos estos en sus canalizaciones.

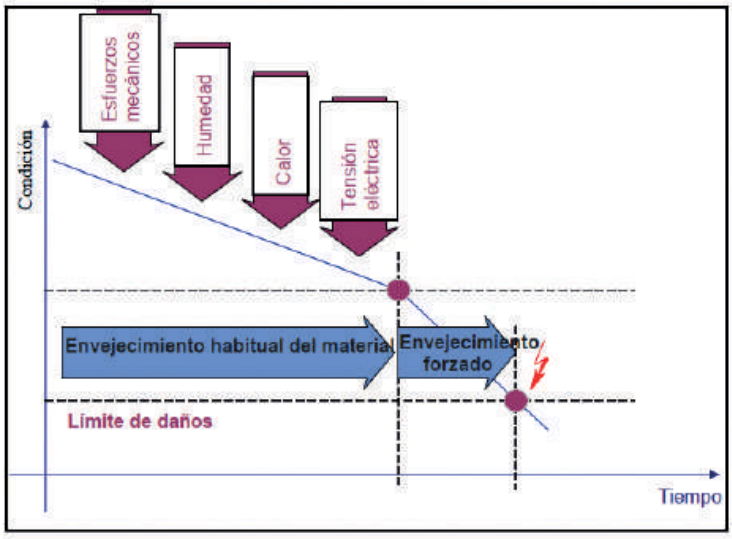


Figura 8. Factores que influyen en el proceso de envejecimiento

4.2. Índices de calidad técnica de las Instalaciones

Un diseño eficiente de las instalaciones del túnel, y una cuidada fase de ejecución y pruebas conllevará un menor Coste de Explotación, y muy probablemente un Coste de Ciclo de Vida menor de los sistemas y componentes.

Por tanto, para evaluar también la disponibilidad de cada equipo o sistema, se necesitará índices específicos para evaluar la calidad técnica del diseño, ejecución y pruebas:

- Calidad Técnica Equipo y Sistema "diseñado"
- Calidad Técnica Equipo y Sistema finalmente "instalado"
- Calidad de la Instalación de Equipos y Sistema (según informe específico DO)
- Resultado Pruebas Iniciales (según informes)
- Resultado Pruebas de Puesta en Marcha de cada sistema (según informes)
- Calidad del Mantenimiento (según informes de auditorías periódicas)

La calidad técnica de un proyecto, centrada principalmente en los sistemas eléctricos, de iluminación y ventilación, se podría evaluar mediante un chequeo del uso o no de las siguientes recomendaciones para diseños eficientes. Por tanto, el mayor o menor uso de estas recomendaciones implicaría el uso de un factor de corrección en el análisis de Ciclo de Vida de cada sistema.

Este factor permitiría aumentar la fiabilidad y disponibilidad del sistema en cuestión, y por tanto retrasar los tiempos de mantenimiento programados y el coste de reposición.

4.2.1. Equipos electricos

1) Distribución de los centros de transformación

Optimización del número y posición de los Centros de Transformación, en relación con las longitudes de cables (alta y baja tensión) a los cuadros generales de Baja Tensión, y acercar los centros de transformación a los puntos de consumo, reduciendo las pérdidas.

2) Uso de grupos electrógenos generando en media tensión.

La generación de energía por grupos electrógenos mediante trasformadores elevadores de tensión permitiría la conexión en media tensión, utilizando así la red de distribución como red de distribución de emergencia.

Otra posibilidad, cuando hay doble suministro eléctrico sería usar grupos electrógenos móviles, que se conectarían a la instalación fija del túnel cuando fuese necesario.

3) Descentralización de los sistemas UPS.

La solución distribuida aporta ahorro en el consumo de energía y reducción de las emisiones de CO2. Con SAIs de alto factor de potencia a la salida y con factor de potencia prácticamente 1 a la entrada, se pueden disminuir también las potencias nominales de los grupos electrógenos de emergencia.

4) Sistemas activos de compensación de energía reactiva.

Corrección de potencia en cada centro de transformación para que la energía aparente transformada esté ajustada al valor de la energía activa demandada.

5) Filtros para corrección de armónicos.

El uso de gran cantidad de receptores electrónicos que absorben una corriente no sinusoidal (cargas no lineales) provoca, aguas arriba en la red, una caída de tensión también no sinusoidal y, consecuentemente, las cargas lineales se encuentran alimentadas por una tensión distorsionada. La presencia de armónicos en la red eléctrica puede provocar un funcionamiento anómalo de los aparatos, como sobrecargas en el conductor de neutro, aumento de las pérdidas en los transformadores, así como la disminución en el par de los motores, etc.

6) Secciones "ecológicas" de conductores frente a secciones mínimas admisibles.

Las perdidas existentes en la red eléctrica debida a la impedancia de los conductores, supone un consumo energético, nada despreciable. El uso de secciones óptimas desde el punto de vista económico y de reducción de emisiones de CO2, implica el uso de secciones superiores a las secciones mínimas obtenidas por cálculo.

4.2.2. Iluminacion

En un túnel tenemos dos tipos de iluminación principales, que influyen notablemente en el coste de la energía: refuerzo (en bocas) y permanente (en su interior).

1) Control y regulación

Dada la "variabilidad" de la luminosidad exterior, no siempre se necesitaría trabajar a la máxima potencia, y también otras condiciones (intensidad de tráfico, opacidad, incendio) deberían "modificar" el flujo luminoso, y por tanto el consumo eléctrico.

Es por ello necesario la existencia de sistemas de regulación, que puedan actuar sobre los equipos de las lu-

minarias según su tecnología: balastos electromagnéticos, balastos electrónicos regulables (individual o por grupos) y reductores de flujo.

- Regulación individual por lámpara (máximo rendimiento), recomendable para el "refuerzo"
- Regulación por grupos de lámparas con balastos electrónicos tipo DALI (útil para el "permanente").
- Regulación por grupos o circuitos con reductores de flujo reduciendo la tensión de alimentación. Útil para refuerzo y permanente, con menor coste de implantación.

2) Tipos de lámparas

- Descarga:
  - Vapor de sodio de alta presión VSAP, eficacia hasta 150 lm/W, vida útil aproximada de 18.000 horas
  - Halogenuros metálicos y vapor de mercurio, hasta 120 lm/W, vida útil aproximada de 14.000 horas.
- Fluorescentes, hasta 100 lm/W con vida útil aproximada de 7.500 a 10.000 horas, y buena reproducción cromática.
- LED, eficacia en torno a los 130 lm/W, vida hasta 100.000 horas. Elevado confort visual y reproducción cromática, y con posibilidad de regulación continúa del nivel lumínico, con respuesta sin retardo.

4.2.3. Ventilacion

El sistema de ventilación es uno de los que más influyen en los costes de Explotación del túnel, debido al gran consumo eléctrico de los ventiladores.

El consumo eléctrico de un ventilador se calcula mediante la siguiente expresión:

$$W = \frac{P \cdot Q}{\eta}$$

Siendo:

W, Potencia eléctrica del motor del ventilador en W

P, Presión Total del ventilador en Pa.

Q, Caudal del ventilador en m^3/s

η rendimiento del motor eléctrico

Por tanto, para que el consumo eléctrico sea lo menor posible, hay que actuar en primer lugar sobre el caudal y la presión.

1) Presión o empuje de los ventiladores

A mayor presión o empuje de los ventiladores, mayor será el consumo eléctrico. Este parámetro de presión afecta más en el caso de los ventiladores axiales, ya que es más frecuente que tengan que vencer las pérdidas de carga de otros equipos que no suelen existir en el caso de los ventiladores de chorro. Por ejemplo:

- Atenuadores acústicos de tipo celda. A veces se prevé poco espacio para su instalación, lo que lleva a una velocidad de paso de aire por las celdas elevada y una mayor pérdida de carga.
- Rejillas de salida en calzada. Frecuentemente más pequeñas que lo necesario, lo que también da lugar a mayores necesidades de presión.

- Curvas en el recorrido. Dimensionarlas con una velocidad de paso adecuada e instalando álabes direccionales. Recordemos que la pérdida de carga es proporcional a ese coeficiente y al cuadrado de la velocidad.

2) Ubicación de los sensores de contaminantes.

Los sensores que miden la concentración de dichos contaminantes en el túnel dan la orden a través del SCADA para que se pongan en marcha los ventiladores, y un mal diseño puede hacer arrancar los ventiladores sin necesidad.

3) Posición de los ventiladores de chorro

A la hora de seleccionarlos, hay que tener en cuenta las reducciones que se producen en el rendimiento por la posición de los ventiladores con respecto las paredes del túnel (coeficiente montaje) y con respecto a los demás ventiladores (coeficiente interactuación).

Los coeficientes de instalación más usuales según PIARC varían entre 0.7 y 0.9. El coeficiente de interactuación se puede eliminar si la separación longitudinal entre los ventiladores supera los 10 diámetros hidráulicos de túnel.

Además, cuando los ventiladores de chorro se instalan por parejas, la separación entre los ventiladores para evitar pérdidas en rendimiento por interactuación debe ser de 2.5 a 3 veces el diámetro de los ventiladores.

4) Uso de variadores de frecuencia.

Los cálculos de caudal necesario en el túnel se efectúan para el caso más desfavorable en el túnel, pero no siempre se requiere ese máximo caudal.

Es frecuente el uso de variadores de frecuencia en los ventiladores axiales, para adaptar su caudal al realmente necesario en el túnel, pero es cada vez más frecuente el uso de variadores de frecuencia en los ventiladores de tipo chorro, para reducir el consumo.

5) Sistemas de ventilación natural.

Los sistemas de ventilación natural se basan en los fenómenos de tiro natural (bien por viento, o efecto chimenea), así como por el efecto pistón creado por el movimiento de los propios vehículos.

Estos sistemas pueden ser muy efectivos en la ventilación en operación normal, pero no en caso de incendio, pues el efecto pistón desaparece cuando se paran los vehículos por una emergencia.

4.2.4. ITS y centro de control

Los sistemas ITS, y especialmente el sistema de control y gestión de instalaciones, son claves para mantener las condiciones de seguridad de los túneles, y como herramienta para la reducción de los costes de explotación, pues monitorizan permanentemente el túnel y ayudan a los responsables de la explotación en la toma de decisiones y en la implementación o mejora de acciones para la operación en túnel.

La implementación de software para gestión de consumos eléctricos ayudará a conocer cuánto, cuándo y dónde se producen los consumos.

El uso de herramientas de gestión del mantenimiento (GMAO) permite un control, registro y gestión preciso de las tareas de mantenimiento realizadas, y sus resultados, para mejorar las estrategias de mantenimiento, lo que conlleva ahorros en los costes de operación y mantenimiento.

4.3. Tabla resumen de índices para Análisis de Coste Ciclo Vida

INDICES PARA ANALISIS DE COSTE CICLO VIDA (CCV)					
1 ECONOMICOS					
1.1 Financiación disponible					
1.2 Valor Actual Neto (VAN)					
1.3 Tasa interna Rentabilidad (TIR)					
2 CALIDAD TECNICA DEL DISEÑO	0,88	Poor	Fair	Good	Very good
2.1 Sistemas electricos	0,74				
Redundancia de equipos	1	0,80	1,00	1,10	1,20
Distribución de los centros de transformación	1,1	0,80	1,00	1,10	1,20
Integración de los grupos electrógenos.	1,1	0,80	1,00	1,10	1,20
Descentralización de los sistemas UPS.	1,2	0,80	1,00	1,10	1,20
Sistemas activos de compensación de energía reactiva.	0,8	0,80	1,00	1,10	1,20
Filtros para corrección de armónicos.	0,8	0,80	1,00	1,10	1,20
Secciones de cables instaladas frente a secciones mínimas admisibles por cálculo.	0,8	0,80	1,00	1,10	1,20
2.2 Iluminación	0,96				
Tipo de luminarias, lámparas, eficiencia de la luminarias, vida media de lámparas	1,2	0,80	1,00	1,10	1,20
Situacion de luminarias, drivers, cuadros de alumbrado	1	0,80	1,00	1,10	1,20
Tipo control y regulación	0,8	0,80	1,00	1,10	1,20
2.3 Ventilación	1,92				
Redundancia de equipos	1,1	0,80	1,00	1,10	1,20
Empuje en ventiladores Axiales (atenuadores, conductos, rejillas) y Longitudinales	1,1	0,80	1,00	1,10	1,20
Ubicación de los sensores de contaminación	1,2	0,80	1,00	1,10	1,20
Posición de los ventiladores de chorro	1	0,80	1,00	1,10	1,20
Uso de variadores de frecuencia	1,1	0,80	1,00	1,10	1,20
Estudio de la ventilación natural	1,2	0,80	1,00	1,10	1,20
2.4 Sistemas ITS y Centro de Control	0,64				
Prestaciones del sistema de control y gestión de instalaciones	1	0,80	1,00	1,10	1,20
Implementación de software para gestión de consumo electrico	0,8	0,80	1,00	1,10	1,20
Uso de herramientas de gestión del mantenimiento (GMAOs)	0,8	0,80	1,00	1,10	1,20
3 CALIDAD TECNICA DE LOS EQUIPOS Y SISTEMAS	0,88				
Calidad Técnica Equipo / Sistema "diseñado"	1,1	0,80	1,00	1,10	1,20
Calidad Técnica Equipo / Sistema finalmente "instalado"	0,8	0,80	1,00	1,10	1,20
4 CALIDAD TECNICA DE LA INSTALACION Y PEM	1,00				
Calidad de la Instalación de cada Equipo / Sistema (según informe específico de DO)	1	0,80	1,00	1,10	1,20
Resultado Pruebas Iniciales (según informes)	1	0,80	1,00	1,10	1,20
Resultado Pruebas de Puesta en Marcha de cada sistema (según informes)	1	0,80	1,00	1,10	1,20
5 RAM					
5.1 Fiabilidad					
Fallos iniciales (mortalidad infantil)					
Fallos normales (madurez)					
Fallos de desgaste (proceso envejecimiento).					
5.2 Disponibilidad					
MTTR					
MTTF					
5.3 Mantenibilidad	0,51	Poor	Fair	Good	Very good
Calidad del Mantenimiento (según informes de auditorías periódicas)	0,8	0,80	1,00	1,10	1,20
Calidad del Mantenimiento Preventivo	0,8	0,80	1,00	1,10	1,20
Reducción del Mantenimiento Diferido	0,8	0,80	1,00	1,10	1,20
Renovación periódica de componentes	1	0,80	1,00	1,10	1,20
Actualización de funcionalidades del equipo o sistema	1	0,80	1,00	1,10	1,20
Nivel de influencias medioambientales (temperatura, humedad, calidad del aire)	1	0,80	1,00	1,10	1,20
Medición de esfuerzos mecánicos	1	0,80	1,00	1,10	1,20
Medición de esfuerzos eléctricos	1	0,80	1,00	1,10	1,20

5. MODELO PRÁCTICO PARA EVALUACIÓN CCV BASADO EN FIABILIDAD

A continuación, se aporta como ejemplo, un estudio del sistema de iluminacion de un túnel, con los resultados de aplicar la herramienta de evaluación CCV de TYPSA, con la metodología e índices mencionados en este informe, para mostrar como influyen en el aumento o disminución de la vida útil de los sistemas y equipos, y por tanto en el CCV.

Life cycle cost analysis model. Tunnel Lighting

Failure Data Analysis

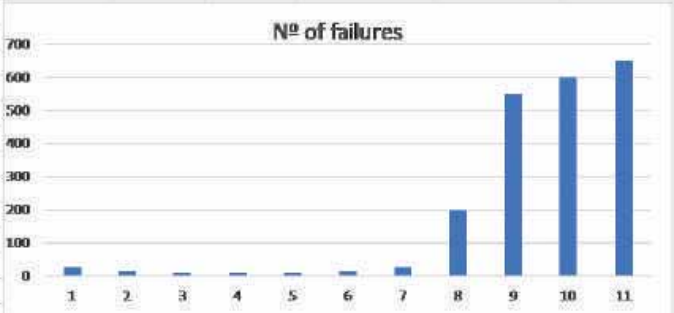
Weibull distribution is a distribution of continuous and multiparameter probability. In the field of reliability and maintenance.
It is the most used and one of the most accurate

0.Notes

1-Operating time: 18 hous per day is estimated on average
2-Nº of failures: estimated by TYPSA
3-LCC considering renewal with High Pressure Sodium current technology
4- Cost only for supply
5-Average operational years (service life) according with PIARC recomendations

1.Analysis of data

	Operating time (hours)	Nº of failures	Accumulated failures	Probability of failure F(t)	X=Ln(t-to)	Y=Ln[-Ln(1-F(t))]
Year 1	6.570	25	25	0,012	8,790269111	-4,42961377
Year 2	13.140	15	40	0,019	9,483416292	-3,95600957
Year 3	19.710	10	50	0,024	9,888881400	-3,73045320
Year 4	26.280	10	60	0,028	10,176563473	-3,54570926
Year 5	32.850	10	70	0,033	10,399787824	-3,38912634
Year 6	39.420	15	85	0,040	10,582028581	-3,19138329
Year 7	45.990	25	110	0,052	10,736179261	-2,92731192
Year 8	52.560	200	310	0,147	10,869710653	-1,83947213
Year 9	59.130	550	860	0,408	10,987493689	-0,64713345
Year 10	65.700	600	1460	0,692	11,092854204	0,16336880
Year 11	72.270	650	2110	1,000	11,188164384	#¡NUM!



Cost analysis

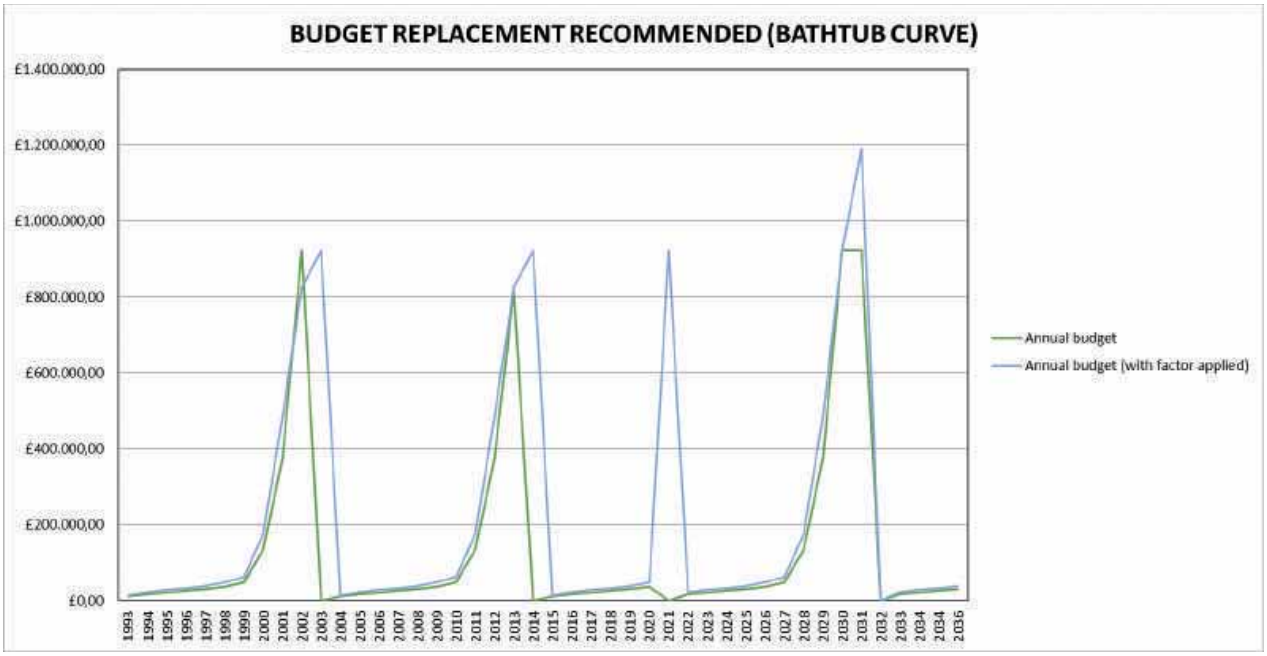
System cost estimattion

SYSTEM	RESIDUAL LIFE	LOCATION			INSTALLATION YEAR	RENOVATION YEAR	UNITS	COST PER UNIT	Total
		TUNNEL LLT	TUNNEL EDT	ROAD				GBP	GBP
TUNNEL LINGHTING INSTALATION									922.621
Luminaires (lamp holders)	6				1993 / Ele 2004)				
[illegible] W		1259					1.259	183	229.893
[illegible] W		262					262	502	131.419
[illegible] W		138					138	710	97.911
[illegible] W		42	78				120	455	54.648
Tunnel lighting luminaire 35000 W high pressure sodium SON-T and control			80				80	710	56.780
Tunnel lighting luminaire 28000 W high pressure sodium SON-T and control			72				72	484	34.848
Tunnel lighting luminaire 20000 W high pressure sodium SON-T and control			12				12	502	6.019
Tunnel lighting luminaire 20000 W high pressure sodium SON-T and control			120				120	480	57.552
Tunnel lighting luminaire 35000W (fluorescent lamp and control			191				191	183	34.877
Tunnel lighting luminaire 250+150W high pressure sodium SON-T and control			24				24	482	11.568
Tunnel lighting luminaire 400+150W high pressure sodium SON-T and control			212				212	660	139.920
Tunnel Emergency Direction Lighting for evacuation ("running man escape signs")		102			2010 2011		102	370	37.699
Luminance meter	5	3	2		1993	3 NEW (2012)	5	5.997	29.980

1. Design Tech. Quality		2. Equipment Tech. Quality						Total Factor (TF)
Poor	0,80	Poor	0,80					0,77
Fair	1,00	Fair	1,00					
Good	1,10	Good	1,10					
Very good	1,20	Very good	1,20	Design Factor (DF)				
Selected	1,00	Selected	1,10	1,1				

3. Installation Tech. Quality		4. T&C Tech. Quality		5. Maintenance Factor		6. Environmental Factor		
Poor	0,80	Poor	0,80	Poor	0,80	Poor	0,80	
Fair	1,00	Fair	1,00	Fair	1,00	Fair	1,00	
Good	1,10	Good	1,10	Good	1,10	Good	1,10	Install. & Maintenance Factor (IMF)
Very good	1,20	Very good	1,20	Very good	1,20	Very good	1,20	
Selected	0,80	Selected	1,00	Selected	1,10	Selected	0,80	0,70

			Rate failure	Budget	Major Maintenance	Total annual budget	Rate failure (factor applied)	Budget (factor applied)	Major Maintenance	Annual budget (factor applied)
	1993	Año 1	0,012	£10.931,52		£10.931,52	0,015	£14.116,12		£14.116,12
	1994	Año 2	0,019	£17.490,44		£17.490,44	0,024	£22.585,79		£22.585,79
	1995	Año 3	0,024	£21.863,05		£21.863,05	0,031	£28.232,24		£28.232,24
	1996	Año 4	0,028	£26.235,66		£26.235,66	0,037	£33.878,69		£33.878,69
	1997	Año 5	0,033	£30.608,27		£30.608,27	0,043	£39.525,14		£39.525,14
	1998	Año 6	0,040	£37.167,18		£37.167,18	0,052	£47.994,81		£47.994,81
	1999	Año 7	0,052	£48.098,70		£48.098,70	0,067	£62.110,93		£62.110,93
	2000	Año 8	0,147	£135.550,89		£135.550,89	0,190	£175.039,89		£175.039,89
	2001	Año 9	0,408	£376.044,42		£376.044,42	0,526	£485.594,54		£485.594,54
	2002	Año 10	0,692	£638.400,98	£284.219,616	£922.620,60	0,894	£824.381,44		£824.381,44
Theorical replacement year	2003	Año 11	0,000	£0,00		£0,00	0,000	£0,00	£922.620,600	£922.620,60
	2004	Año 12	0,012	£10.931,52		£10.931,52	0,015	£14.116,12		£14.116,12
	2005	Año 13	0,019	£17.490,44		£17.490,44	0,024	£22.585,79		£22.585,79
	2006	Año 14	0,024	£21.863,05		£21.863,05	0,031	£28.232,24		£28.232,24
	2007	Año 15	0,028	£26.235,66		£26.235,66	0,037	£33.878,69		£33.878,69
	2008	Año 16	0,033	£30.608,27		£30.608,27	0,043	£39.525,14		£39.525,14
	2009	Año 17	0,040	£37.167,18		£37.167,18	0,052	£47.994,81		£47.994,81
	2010	Año 18	0,052	£48.098,70		£48.098,70	0,067	£62.110,93		£62.110,93
	2011	Año 19	0,147	£135.550,89		£135.550,89	0,190	£175.039,89		£175.039,89
	2012	Año 20	0,408	£376.044,42		£376.044,42	0,526	£485.594,54		£485.594,54
	2013	Año 21	0,692	£638.400,98	£176.520,569	£814.921,49	0,894	£824.381,44		£824.381,44
Theorical replacement year	2014	Año 22	0,000	£0,00		£0,00	0,000	£0,00	£922.620,600	£922.620,60
	2015	Año 23	0,012	£10.931,52		£10.931,52	0,015	£14.116,12		£14.116,12
	2016	Año 24	0,019	£17.490,44		£17.490,44	0,024	£22.585,79		£22.585,79
	2017	Año 25	0,024	£21.863,05		£21.863,05	0,031	£28.232,24		£28.232,24
	2018	Año 26	0,028	£26.235,66		£26.235,66	0,037	£33.878,69		£33.878,69
Current year	2019	Año 27	0,033	£30.608,27		£30.608,27	0,043	£39.525,14		£39.525,14
	2020	Año 28	0,040	£37.167,18		£37.167,18	0,052	£47.994,81		£47.994,81
Recommended year for replacement	2021	Año 29	0,000	£0,00		£0,00	0,000	£0,00	£922.620,60	£922.620,60
	2022	Año 30	0,019	£17.490,44		£17.490,44	0,024	£22.585,79		£22.585,79
	2023	Año 31	0,024	£21.863,05		£21.863,05	0,031	£28.232,24		£28.232,24
	2024	Año 32	0,028	£26.235,66		£26.235,66	0,037	£33.878,69		£33.878,69
	2025	Año 33	0,033	£30.608,27		£30.608,27	0,043	£39.525,14		£39.525,14
	2026	Año 34	0,040	£37.167,18		£37.167,18	0,052	£47.994,81		£47.994,81
	2027	Año 35	0,052	£48.098,70		£48.098,70	0,067	£62.110,93		£62.110,93
	2028	Año 36	0,147	£135.550,89		£135.550,89	0,190	£175.039,89		£175.039,89
	2029	Año 37	0,408	£376.044,42		£376.044,42	0,526	£485.594,54		£485.594,54
End of Concession / Recommended year for replacement	2030	Año 38	0,692	£638.400,98	£284.219,62	£922.620,60	0,894	£824.381,44	£98.239,104	£922.620,60
	2031	Año 39	1,000	£922.620,60		£922.620,60	1,291	£1.191.400,57		£1.191.400,57
Theorical replacement year	2032	Año 40	0,000	£0,00		£0,00	0,000	£0,00		£0,00
	2033	Año 41	0,019	£17.490,44		£17.490,44	0,024	£22.585,79		£22.585,79
	2034	Año 42	0,024	£21.863,05		£21.863,05	0,031	£28.232,24		£28.232,24
	2034	Año 43	0,028	£26.235,66		£26.235,66	0,037	£33.878,69		£33.878,69
Residual Lifetime year (by Contract)	2036	Año 44	0,033	£30.608,27		£30.608,27	0,043	£39.525,14		£39.525,14
								Life Cycle Cost		£9.554.319



6. BIBLIOGRAFÍA

1. RD 635/2006, Requerimientos mínimos en túneles de carretera del Estado
2. Informe del Grupo de Trabajo 1 del Comité Técnico C.4, Explotación de Túneles de Carretera, de la Asociación Mundial de la Carretera, PIARC. (2012/2013). Consideraciones sobre el ciclo de vida de los equipamientos eléctricos de túneles de carretera.
3. Life_Cycle_Cost_and_Reliability_2_Per_Page (Paul Barringer)
4. 2016R01 EN Best practice for life cycle analysis for tunnel equipment

ROAD SAFETY INSPECTION WITH SPECIAL ASPECTS OF TUNNELS

Emir Smailović[1], Dalibor Pešić[1] , Boris Antić[1], Krsto Lipovac[1], Jovana Petrović[2]

[1]University of Belgrade, Faculty of Transport and Traffic Engineering, Department for Road Safety and Road Vehicles

[2]Public Enterprise "Roads of Serbia", Sector for Traffic Control and Information Systems

The impact of the human factor on the risk of traffic accidents has preoccupied the attention of many researchers. In addition to this factor, the road has a significant impact on the occurrence risk of an accident. When it comes to road safety, a particular challenge occurs in locations where road structures are located, such as tunnels, bridges, etc. The tunnels are underground structures that serve to move cars in road traffic. Due to their construction and complexity of traffic flow, the requirements for traffic safety in these objects are significantly higher than other roads. Road safety inspection (RSI) is most commonly used to improve road safety, which can identify possible road hazards. When it comes to tunnels, the question is how to implement road safety inspection of tunnels. This paper shows the requirements for traffic safety in tunnels and aspects of a possible implementation of the road safety inspection in a tunnel. The case study of this analysis presented on one tunnel in Serbia. The tunnel Straževica is located on the first state road. The traffic in the tunnel is in both directions. The most important problems of traffic safety in tunnel Straževica has been presented in this paper. The methodology before presented will be used for analyzing the problem of traffic safety in tunnel Straževica.

INSPECCIÓN DE SEGURIDAD VIAL CON ASPECTOS ESPECIALES DE LOS TÚNELES

El impacto del factor humano en el riesgo de accidentes de tráfico ha preocupado a muchos investigadores. Además de este factor, la carretera tiene un impacto significativo en el riesgo de ocurrencia de un accidente. En lo que respecta a la seguridad vial, un reto particular se presenta en los lugares donde se encuentran las estructuras de la carretera, como los túneles, los puentes, etc. Los túneles son estructuras subterráneas que sirven para mover los coches en el tráfico rodado. Debido a su construcción y a la complejidad del flujo de tráfico, los requisitos de seguridad vial en estos objetos son significativamente mayores que en otras carreteras. Para mejorar la seguridad vial, lo más habitual es utilizar la inspección de seguridad vial (RSI), que permite identificar los posibles peligros de la carretera. Cuando se trata de túneles, la cuestión es cómo aplicar la inspección de seguridad vial de los túneles. Este artículo muestra los requisitos de la seguridad vial en los túneles y los aspectos de una posible aplicación de la inspección de seguridad vial en un túnel. El caso de estudio de este análisis se presenta en un túnel de Serbia. El túnel Straževica está situado en la primera carretera estatal. El tráfico en el túnel es en ambas direcciones. Los problemas más importantes de la seguridad del tráfico en el túnel de Straževica se han presentado en este documento. La metodología presentada anteriormente se utilizará para analizar el problema de la seguridad del tráfico en el túnel de Straževica.

INSPECTION DE LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE AVEC DES ASPECTS PARTICULIERS DES TUNNELS

L'impact du facteur humain sur le risque d'accident de la circulation a retenu l'attention de nombreux chercheurs. En plus de ce facteur, la route a un impact significatif sur le risque d'occurrence d'un accident. En matière de sécurité routière, un défi particulier se pose aux endroits où se trouvent des structures routières, comme les tunnels, les ponts, etc. Les tunnels sont des structures souterraines qui servent à déplacer les voitures dans le trafic routier. En raison de leur construction et de la complexité du flux de trafic, les exigences en matière de sécurité routière dans ces objets sont nettement plus élevées que dans les autres routes. L'inspection de la sécurité routière (RSI) est le plus souvent utilisée pour améliorer la sécurité routière, car elle permet d'identifier les éventuels dangers de la route. En ce qui concerne les tunnels, la question est de savoir comment mettre en œuvre l'inspection de la sécurité routière des tunnels. Cet article montre les exigences en matière de sécurité routière dans les tunnels et les aspects d'une possible mise en œuvre de l'inspection de sécurité routière dans un tunnel. L'étude de cas de cette analyse est présentée sur un tunnel en Serbie. Le tunnel Straževica est situé sur la première route nationale. La circulation dans le tunnel se fait dans les deux sens. Les problèmes les plus importants de la sécurité du trafic dans le tunnel de Straževica ont été présentés dans ce document. La méthodologie présentée ci-dessus sera utilisée pour analyser le problème de la sécurité routière dans le tunnel de Straževica.

1. INTRODUCE

The subject of the research of this report is the analysis of traffic safety in the Straževica tunnel. This report is based on the latest scientific information on traffic safety in tunnels, PIARC guidelines, the EU Directive on safety of tunnels and roads and previous experience in Road safety inspection on rural roads.

The data available to the research team were used, and were collected by direct tour of the tunnel and the control and operational centre, analysis of available data on traffic accidents and data on traffic characteristics in the road section of the research subject.

Tunnels are complex objects, which require special traffic conditions and special attention and supervision. Therefore, the analysis of traffic safety in the tunnel zone includes the analysis of the existence and functioning of the systems necessary for the safe conduct of traffic in the tunnels.

The Straževica tunnel is located in Republic of Serbia, near capital city Belgrade, on the state road IA row number A1, on the section of the Orlovača - Straževica tunnel, number 1901. The operation of the tunnel began in 2012, with two-way traffic taking place through one Straževica tunnel tube, with two traffic lanes (one per way). According to available data, the Straževica tunnel does not have a use permit. Currently, works are being carried out on the construction of the second Straževica tunnel tube, after which conditions would be created for the projected one-way traffic in the tunnel tube. Considering the works on the construction of the second tunnel tube, the pollution of the road and tunnel equipment is more intensive.

2. METHODOLOGY OF ROAD SAFETY INSPECTION TUNNELS

The section on which the Straževica tunnel is located is classified as a state road of first rank, starting at junction 126 (Orlovača intersection) at station km 205 + 691 and ending at junction 15403 (Straževica tunnel) at station km 209 + 646. The section of this road in the tunnel, which is the subject of the road safety inspection, will start at the station km 208 + 400 to the station km 209 + 170 (length L = 772 m).

Figure 1 Macrolocation of the section of the Orlovača intersection - Straževica tunnel in relation to Serbia

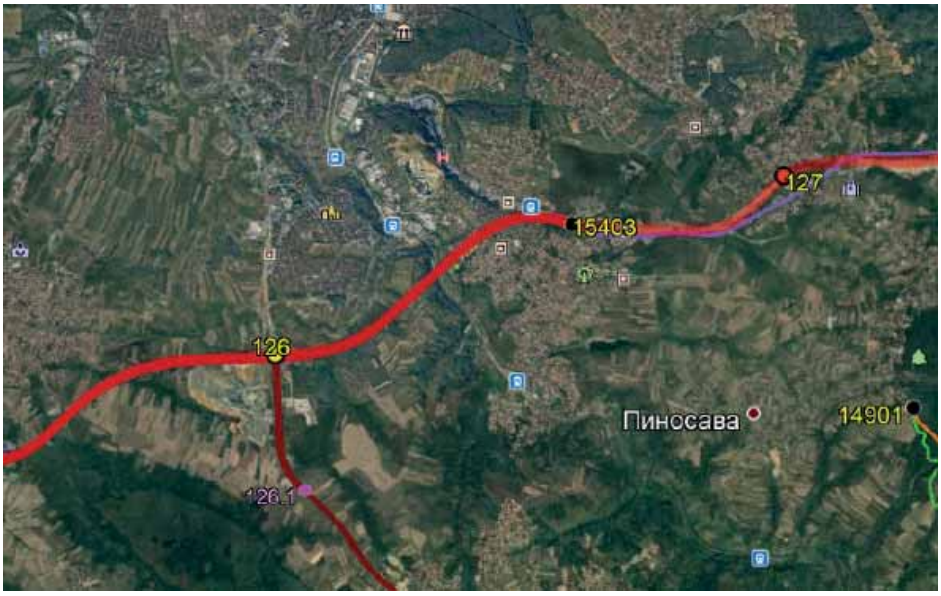


Figure 2 The position of the section of the Orlovača intersection - Straževica tunnel, on the map of the reference system of state roads of the Republic of Serbia

The methodological aspect applied during the traffic safety inspection on the road section includes the following phases (elements) of the inspection:

1. Road function
2. Cross section
3. Alignment
4. Horizontal and vertical signalization and road lighting
5. Tunnel equipment
6. Elements of passive safety

Data collection was performed by field tours of the tunnel in both directions, during which we moved through the tunnel by vehicle and pedestrians, recording with a vehicle camera and a hand-held camera. During our tour, the tunnel was closed to traffic.

2.1. Traffic volume

The total number of vehicles whose passage through the Straževica tunnel was recorded during the period July-December 2019 is 2,123,966. When it comes to AADT (annual average daily traffic), which was recorded in the same period, it amounts to 11,667.

In the structure of traffic flow, certain irregularities were noticed. Namely, the largest number of vehicles passing through this part of the road are cars (56%). After that, a significant share in the traffic flow is the share of hevy commercial vehicles, ie. 19%.

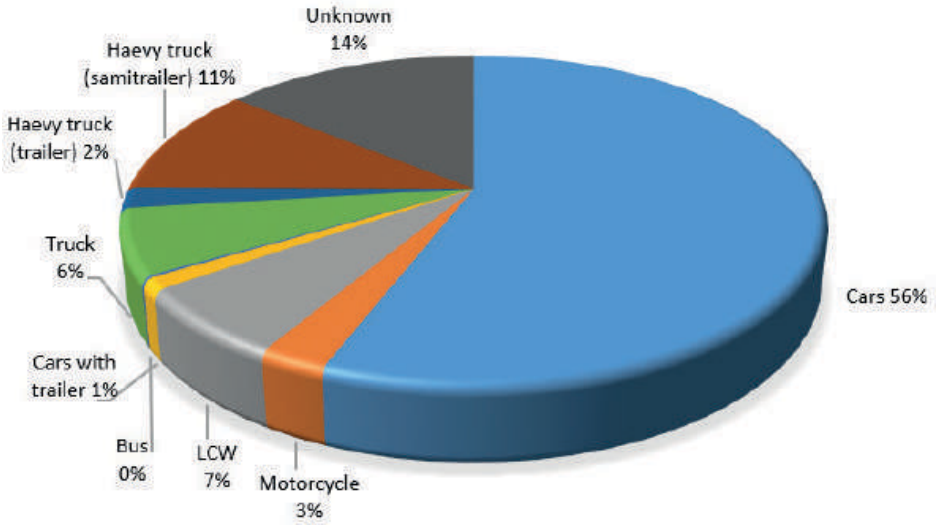


Figure 3 Traffic flow in tunnel Straževica

When it comes to daily unevenness of traffic flow in tunnel Straževica, it was noticed that Tuesday is the day when the lowest flow was recorded, while the highest flow was recorded on Mondays and Sundays.

2.2. Traffic Accidents

In the period from 2017 to 2019, in the Straževica tunnel, occurred 3 traffic accidents with casualties, one of which resulted in injuries, while two accidents with fatalities. One accidents with fatalities were of the type: with at least two vehicles - movement or crossing and second were of type: accident with pedestrians.

The three traffic accidents occurred in the western part of the tunnel and there in the conditions of twilight, ie. sunset. Namely, due to the orientation of the tunnel and the position of the sun at sunset, the brightness of the tunnel access zone has increased, so when entering the tunnel, drivers suddenly enter the low light zone, which can result in black hole phenomena, which could affect the occurrence of these traffic accidents (Figure 4).

The issue of adequate visibility, after the analysis of the accident as one of the most important during the tour and inspection of the tunnel.

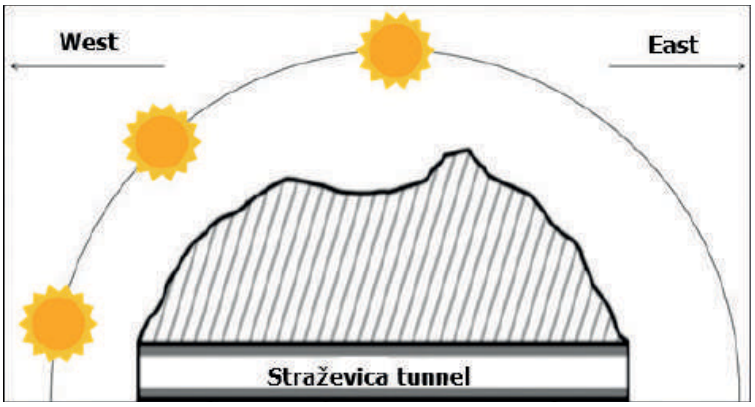


Figure 4 Orientation of the tunnel and the position of the sun at sunset

3. RESULTS OF ROAD SAFETY INSPECTION

The results of the traffic safety inspection on the the section with the number 1902 in the Straževica tunnel are presented below. The expert team based the risk assessment of the observed problems of traffic safety in the tunnel based on expert opinion. The expert team that inspected the tunnel was composed of experts in the field of traffic safety, hosts in the tunnel and experts from the public enterprise Roads of Serbia.

3.1. Road function

In accordance with the category of road, the inspected tunnel has the function of connecting the traffic centres. A significant number of heavy trucks are moving on the inspected section. This section is primarily used for transit traffic, where there is no pedestrian or bicycle traffic. For speed control on the section, vertical traffic signals are used, ie. traffic signs with variable content of messages, which show traffic signs "speed limit".

Figure 5 The Straževica tunnel

3.2. Cross section

The cross section of the tunnel was made for the final solution of the highway in one way, with a stop lane, while the traffic signalization was adjusted to the two-way traffic regime (for the intermediate profile, ie. for the first phase of the highway). The road is made with a wearing layer of asphalt - concrete, while the curb of the road is made on both sides with a raised 18/24 cm, with an overhang of 18 cm. The height of the curb of 18 cm is not safe, because the highest curb on public roads with more than 80 km/h speed limits, is 7 cm defined. This section is designed for future highways and needs safety elements for higher speed.

Figure 6 Cross section on Straževica tunnel

An overhang of 18 cm contributes to a higher number of overturning accidents. Since the construction of the left tunnel tube, that is. by completing the full profile of the highway, the existing tunnel tube serves for one-way traffic in the direction of stationary growth and that the speed will be limited to 100 km / h, the risk of accidents with overturning vehicles is known and the consequence followed. High curbs act as a potential danger to drivers and drivers subconsciously run away from high curbs. This reduces the width of the road used by vehicles and increases the risk of collisions when driving in the same direction or driving in opposite directions (in the case of two-way traffic). It is recommended to consider the possibility of constructing new curbs and service paths in accordance with the conditions for safe traffic.

Drainage of the road is done by the system of tunnel drainage structure, where the liquids from the road are drained by a unilaterally directed cross slope to the drains located in right of the road. The inspection of the section revealed the existence of a larger amount of dirt on some channel of drainage structure, which could affect the receiving power of the drains, ie. efficient drainage of liquids from the road.

The estimated risk for traffic safety is high, because due to the spillage of hazardous substances on the road, the drains would not be able to adequately collect a larger amount of liquid, ie the collection and removal of liquid from the road would be slowed down. It is recommended to clean the dirt in the drains, as well as their regular maintenance.

The carriageway of the inspected section in the tunnel is slightly sloping, seen in the direction of stationary growth, with the longitudinal slope of the carriageway being about 0.3 - 0.4%. The cross-slope of the road is one-sided and is directed towards the right of the road, seen in the direction of stationary growth. The values of the cross slope of the road along the transition curve are variable and range from 2.5% (in the direction and in the horizontal curve R ~ 4000 m in front of the tunnel) to a slope of 5.0 (5.5)% (in the horizontal curve R ~ 1000 m in the tunnel).

Figure 7 Clogged drainage structure

3.3. Alignment

From the direction of Orlovača (seen in the direction of stationary growth), the route in front of the tunnel stretches in the direction (L ~ 1000 m), ie. in the horizontal curve to the right of the estimated radius R = 4000 m. The entrance to the tunnel from this direction is characterized by the so-called "O" - curve, ie. transition curve from a curve of radius R ~ 4000 m to a one-way circular curve in a tunnel, of estimated radius R = 1000 m.

Figure 8 Situational plan of the road section in the tunnel

3.4. Horizontal and vertical signalization and road lighting

Along the curb makings, as well as between the double central barrier line, technical means for improving visibility (markers) were installed in August. Also, markers are installed on the outside of the raised curbs on the service tracks. A detailed analysis showed the existence of dirt and impurities on the markers in the form of deposits of fine sand that reduce visibility, ie. Functionality (Figure 9).

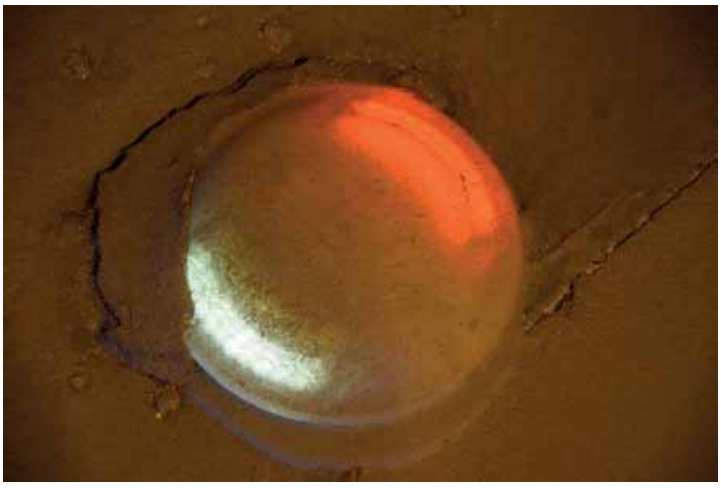


Figure 9 The dirty of markers in Straževica tunnel

At the entrances to the tunnel, on both sides, there was no "signboard for marking permanent obstacles within the dimensions of the free road profile", which is unsafe and not in accordance with the order.

At the station km 209 + 170 (entrance to the tunnel seen in the direction of station growth) there is a traffic light on the right side of the road. The appearance of traffic light at the time of the inspection was disturbed, due to the existence of dirt on it (Figure 10).

Figure 10 The dirty of traffic sing

Lighting elements have been installed in the tunnel, on metal supports that are located above the road in the middle of the tunnel width, where the lamps are outdated technologies and do not provide a sufficient level of road lighting. In addition, an inspection of the tunnel revealed that some lamps were not working. In addition, the illumination of the entrance, entrance and exit zones of the tunnel is not intensified, which is necessary when it comes to proper lighting of the tunnel.

The existing tunnel lighting system operates in six levels, with the most commonly used being the third level. In case of an incident, the highest - sixth degree of illumination is activated. The photographs shown in this report were taken during the sixth degree of illumination. A detailed analysis of the photographs shows that there are parts of the tunnel that are insufficiently due to the non-functioning of certain lamps.

The estimated risk is high, because the drivers who enter the tunnel cover a significant distance until the driver's eye is adjusted to the lighting conditions, ie the so-called black hole phenomenon. It is recommended to improve the lighting in the tunnel, and to pay special attention to adequate (enhanced) lighting of the entrance, access and exit zones of the tunnel.

Figure 11 Some lamps that do not work

Figure 12 Insufficient brightness of the entrance zone to the tunnel (so-called black hole)

Figure 13 Some lamps that do not work

Figure 14 The lamp that do not work

Figure 15 Lighting in the tunnel

Figure 16 Several lamps in a row that do not work

3.5. Tunnel equipment

Longitudinal type ventilation was realized in the tunnel, so that mechanical ventilation systems were installed. This system allows longitudinal air flow, ie. the possibility of longitudinal smoke. Ventilation in the tunnel is controlled by an algorithm, which can also be controlled manually from a building located next to the tunnel. In this way, it is possible to make changes to the predefined ventilation mode, which is provided by the algorithm.

The Straževica tunnel does not automatic incident detection system. Incidents are managed from the command center, in a way that the operator monitors the flow of traffic and, if necessary, takes intervention measures. This way of monitoring incidents is not efficient, because it is not sustainable from the aspect of efficiency traffic safety management. Dirt and the reduced functionality of video surveillance in the tunnel further limits the ability to manage incidents in tunnels.

Based on the analysis of the number and type of incidents in the Straževica tunnel, which occurred in the previous two years, it can be concluded that the most common incidents with stopped vehicles (40.7%), followed by "other" situations (20.7%), which cannot be defined in any group, then incidents with pedestrians (15.9%), traffic accidents (8.3%), tunnel works (4.1%), etc. According to the number of incidents, it can be concluded that approximately six incidents in the Straževica tunnel occur monthly, of which approximately two are incidents with a stopped vehicle and one incident with pedestrians.

The above data on the frequency of incidents in the last two years indicates the need for an automatic hazard detection system, because an average of six incidents per month cannot be effectively monitored with the help of operators, ie. the existing way of managing incident.

One of the deficiencies in Straževica tunnel is the tunnel does not vehicle height detection at the entrance to Straževica tunnel. This shortcoming can have a significant impact on the safe flow of traffic in the tunnel, as damage to tunnel equipment can occur, which can risk the safe flow of traffic.

There is an automatic fire alarm system in the Straževica tunnel. Periodic inspections of the automatic fire alarm system are carried out in the tunnel, while the inspection by the Ministry of the Interior of the Sector for Emergency Situations has not been established.

During the inspection of the tunnel, the expert team did not have information about the shortcomings of the system. The tunnel is equipped with emergency evacuation passages, which are located in the left side wall of the tunnel, seen in the direction of the growth of the station, separated by a door from the tunnel.

The tunnel is equipped with a control and operational centre in which the situation in the tunnel is monitored continuously (24 hours). The Straževica Tunnel Control and Operations Centre enables the management of the speed limit in the tunnel, the broadcasting of messages via a loudspeaker placed on the side walls of the tunnel, as well as the sending of messages on the entrance portals in the tunnel. Information transfer and equipment management in the tunnel are realized in a satisfactory manner and in a timely manner. The operator is constantly in the control and operational centre.

By visiting the tunnel and checking the condition of the equipment, it was noticed that the maintenance of cameras and equipment in the tunnel is not appropriate. The existing regular maintenance of cameras and signalization in the tunnel means cleaning twice a year, ie. cleaning once every six months. According to the expert team of this study, the planned-regular way of maintaining cameras and equipment in the tunnel is not appropriate, because dirt on the cameras is created much earlier than the planned cleaning deadline. Therefore, it is necessary to timely and at least once a month clean the video surveillance system in the Straževica tunnel, as well as clean other equipment necessary for safe traffic.

3.6. Elements of passive safety

The Road Safety Inspection were observed the unsafe elements in the tunnel are both entrances and two evacuation passage in the side walls of the tunnel.

The Road Safety Inspection on the tunnel noticed that at the station 20 km + 400 there are passively unsafe elements at the entrance to the tunnel on the right side of the road, seen in the direction of station growth. The estimated risk is high because severity consequences can occur due to the vehicle getting off the road. It is recommended that passively unsafe concrete elements be protected with initial and final constructions.

Figure 17 Element of passive unsafe at the entrance to the tunnel

Figure 18 Passively unsafe evacuation passage in side wall of tunnel

The Road Safety Inspection of tunnel showed the existence of two passively unsafe evacuation passage, on the left side of the road, seen in the direction of growth of the station, at the station km 208 + 655 and at the station km 208 + 905. The estimated risk is high, bearing in mind that traffic accidents with vehicles getting off the road have severity consequences. It is recommended to protect the evacuation passage in an appropriate way, by installing an appropriate prefabricated and removable protective fence whose functionality would be in line with the safety situation in the tunnel.

4. THE DEFICIENCIES OF THE STRAŽEVICA TUNNEL FOR ROAD TRAFFIC SAFETY

Based on the Road Safety Inspection in the Straževica tunnel in 2019, checking traffic safety in the tunnel, checking the condition and functioning of the system of tunnel, the expert team defined problems of road traffic safety in the Straževica tunnel, and those are:

- The lack of an automatic incident detection system in the tunnel creates a number of traffic safety problems. In the existing conditions, without an automatic system, the traffic in the tunnel is dangerous. The non-existence of the system represents a significant shortcoming of the tunnel, which endangers the safe flow of traffic in the tunnel. The analysis of data on the frequency of incidents in the last two years in the Straževica tunnel showed the need for an automatic incident detection system in the tunnel, because the existing way of incident management cannot be efficiently detected and timely intervention;
- Inadequate lighting of the entrance and transit zone in the tunnel, as well as outdated technology of the entire lighting in the tunnel. The problem of inadequate lighting of the entrance and transit zones is particularly pronounced from the western entrance to the tunnel. Namely, the lighting of the tunnel at the entrance from the west side (from Orlovača to Resnik), in the so-called zone, the brightness threshold is not appropriate. At sunset, the brightness in front of the tunnel is great due to the position and orientation of the tunnel. Drivers who enter the tunnel, which in the basic system of work (third level of illumination) has a significantly lower level of illumination, go long distances until the driver's eye is adjusted, the so-called black hole phenomenon;
- Exceeding the speed of movement in the tunnel. The problem of speeding in the Straževica tunnel is expressed from the western approach to the tunnel, and the reasons are the provision of the route of the road that is conducive to speeding; the lack of additional traffic signals and equipment warning drivers of speed limits and the traffic lane in the Straževica tunnel are too wide, which contributes to moving at higher speeds. Namely, the width of traffic lanes in the Straževica tunnel is such that it pro-

vokes higher speeds and contributes to speeding, which can affect the occurrence and severity of the consequences of traffic accidents;

- Passively unsafe tunnel elements at the entrance to the tunnel. The concrete elements at both entrances to the tunnel are passively unsafe and can significantly increase the consequences of the accident., in the event of a vehicle collision;
- Dirt and improper maintenance of tunnel equipment. First of all, video surveillance, as well as other traffic equipment in the tunnel, is dirty and neglected, which is why it is not possible to see the situation in the tunnel in time and notice changes in the ways of movement. Failure to maintain video surveillance in the tunnel is a shortcoming, which may affect the timely taking of measures and the activation of the temporary traffic regime in the tunnel.

LITERATURE

1. Directive (EU) 2019/1936 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2019 amending Directive 2008/96/EC on road infrastructure safety management
2. 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 NetworkElazar, N., Toole, T., Bogumil, K. (2018), Asset Management Strategy for Road-related Assets (Safety Infrastructure), Technical Report AP-T309-18, Austroads Ltd., Sydney NSW 2000 Australia, ISBN 978-1-925451-18-4.
3. Directive 2008/96/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on road infrastructure safety management
4. Khoury, G. at al. Workpackage 5 Evaluation of safety levels and upgrading of existing tunnels D50. 5th Framework Programme of the European Commission, under contract G1RD-CT-2002-766. UPTUN stands for: "Cost effective sustainable and innovative UPgrading Methods for Fire Safety in existing TUNnels.
5. Polidori, C., Di Mascio, P., Cantisani, G., Petrelli, M. 2017. Effective and Coordinated Roads Infrastructure Safety Operations ECOROADS, Deliverable D6.2, WP6 – Guidelines and recommendations, H2020 Coordination and Support Action Topic: MG-8.1b-2014.
6. Wegman, F., Aarts, L. and Bax, C. (2008) Advancing sustainable safety, Safety Science. doi: 10.1016/j.ssci.2007.06.013.
7. World Road Association (PIARC) (2015). ROAD SAFETY INSPECTION GUIDELINE For safety checks of existing roads Road accident investigation guidelines for road engineers, ISBN 978-2-84060-321-4.
8. Антић, Б., Пешић, Д., Смаиловић, Е., Берања, С. (2021) Специфичности провере безбедности саобраћаја у тунелима. Пут и саобраћај, LXVII, 3/2021, 33-38.
9. Закон о путевима (2018), Службени гласник Републике Србије бр. 41 од 31. маја2018.
10. Смаиловић, Е., Пешић, Д., Антић, Б., Липовац, К. (2021) Провера безбедности саобраћаја на путевима са посебним освртом на тунеле. XVI Међународна конференција – Безбедност саобраћаја у локалној заједници, ISBN 978-86-7020-464-5, Копаоник, Србија, 16-19. јун 2021., Зборник радова, стр. 532-541.

TUNNEL HORELICA, A BIDIRECTIONAL TUNNEL WITH THE HIGHEST LEVEL OF TRAFFIC IN SLOVAKIA

Peter Danišovič
University of Žilina

Jaroslav Štrba
National Motorway Company

The Horelica tunnel was put into operation on October 29, 2004. It is located on the planned highway D3 in the northwest part of the Slovak Republic, currently run as a first class road I/11 as part of the Čadca (city) bypass. It is a single-tube tunnel, 605 m long, which is part of a two-lane bidirectional road 5.1 km long from the crossroads to a 1.3 km distant crossroads in the centre of Čadca. In December 2020, the new section of D3 highway in full profile, continuing towards Poland or the Czech Republic, was connected to the existing section with tunnel. Horelica tunnel forms part of the trans-European road network (corridor VI) and transit traffic from Slovakia to the Czech and Polish Republics and in the opposite direction passes through it. By 2020, while the above-mentioned highway section was completed and put into operation, transit and domestic traffic ended at two traffic lights in the centre of Čadca, near shopping malls, and one railway crossing, which caused large tailbacks, especially during rush hours, which led to the systematic closures of the tunnel in the direction to Čadca. This closures of the tunnel have been the cause of many several kilometric tailbacks in front of the tunnel in the direction to Čadca. Congested traffic caused frequent traffic collisions, rotating vehicles trying to bypass the emerging tailback, drivers not respecting the maximum traffic speed, worsened weather conditions in the mountain environment, especially in winter, and other factors caused traffic accidents every year, often fatal/mortal emergency events. Measures were taken to improve the situation, in particular the modification of traffic signs, the addition of information signs, but only the launch of the follow-up section resolved traffic excesses in this area.

TÚNEL HORELICA, UN TÚNEL BIDIRECCIONAL CON EL MAYOR NIVEL DE TRÁFICO DE ESLOVAQUIA

El túnel Horelica se inauguró el 29 de octubre de 2004. Está ubicado en la autopista planificada D3 en la parte noroeste de la República Eslovaca, actualmente funciona como una carretera de primera clase I/11 como parte de la circunvalación de Čadca (ciudad). Se trata de un túnel monotubo de 605 metros de longitud, que forma parte de una carretera de dos carriles con tráfico bidireccional de 5,1 km de longitud desde el cruce hasta un cruce de 1,3 km de distancia en el centro de Čadca. En diciembre de 2020, el nuevo tramo de la autopista D3 de perfil completo, continuando hacia Polonia o República Checa, se conectó con el tramo existente con túnel. El túnel de Horelica forma parte de la red viaria transeuropea (corredor VI) y el tráfico de tránsito desde Eslovaquia a las Repúblicas Checa y Polaca y en sentido contrario lo atraviesa. Para 2020, mientras se completaba y ponía en funcionamiento el tramo de carretera antes mencionado, el tránsito y el tráfico nacional terminaron en dos semáforos en el centro de Čadca, cerca de centros comerciales, y un cruce ferroviario, lo que provocó grandes atascos, especialmente durante las horas pico, lo que provocó los cierres sistemáticos del túnel en dirección a Čadca. Estos cierres del túnel han sido la causa de muchos retrocesos de varios kilómetros frente al túnel en dirección a Čadca. l tráfico congestionado provocó frecuentes colisiones de tráfico, la rotación de vehículos tratando de eludir el atasco emergente, los conductores que no respetaban la velocidad máxima del tráfico, el empeoramiento de las condiciones climáticas en el entorno montañoso, especialmente en invierno, y otros factores causaron accidentes de tráfico todos los años, a menudo fatales/emergencias mortales eventos. Se tomaron medidas para mejorar la situación, en particular la modificación de las señales de tráfico, la incorporación de carteles informativos, pero solo la puesta en marcha del tramo de seguimiento resolvió los excesos de tráfico en esta zona.

TUNNEL HORELICA, UN TUNNEL BIDIRECTIONNEL AVEC LE PLUS HAUT NIVEAU DE TRAFIC EN SLOVAQUIE

Le tunnel Horelica a été ouvert le 29 octobre 2004. Il est situé sur l'autoroute D3 au nord ouest de la République Slovaque, qui est une route de première classe I/11 et est comprise dans le pass Čadca. C'est un tunnel à un tube de 605 mètres de long avec une route 2x2 voies bidirectionnelles de 5,1 km de long entre les carrefours, l'un d'eux étant à 1,3 km du centre de Čadca. En décembre 2020, la nouvelle section de l'autoroute D3, qui traverse la Pologne ou la République Tchèque, a été connecté avec la section existante comprenant le tunnel. Le tunnel Horelica forme une partie du réseau routier trans-Europeen (corridor VI) et permet le transit entre la Slovaquie et les Républiques Tchèque et polonaise. En 2020, la section d'autoroute mentionnée fut complétée, elle se terminait au centre de Čadca avec deux feus de circulation, près du centre commercial, et un croisement de chemin de fer, ce qui causait un ralentissement de la circulation particulièrement lors des heures pleines ce qui menait à la systématique fermeture du tunnel en direction de Čadca. Cette fermeture causait de nombreux kilomètres de bouchons devant le tunnel en direction de Čadca. L'intensité du traffic menait à de fréquents accidents, des demis tour illégaux, une accentuation de la pollution de l'air dans la montagne. Des mesures ont été prise pour améliorer la situation, en particulier la modification des panneaux de signalisation, l'addition de panneaux informatifs, mais seulement l'ouverture de la section d'autoroute sus-nommée a résolu l'excès de traffic dans cette zone.

1. INTRODUCTION

WIn Slovakia, the construction and operation of the motorway network is taken care of by the administrator, National Motorway Company and approximately 800 km of motorway sections and expressways are currently in operation. Slovakia is a diverse country, mostly mountainous and therefore highways pass through different types of land, across plains, over rivers, between and across the mountains. Currently, there are 12 motorway tunnels in operation in Slovakia in 2022 and another 4 tunnels are under construction (tunnels Višňové, Čebrať, Okruhliak and Bikoš) as you can see in Table 1. After the completion of the entire highway/expressway and motorway network in Slovakia, a total of 36 tunnels should be built.

Table 1 Slovak road tunnels in operation and under the construction

Name of tunnel	Category of tunnel	Length of tunnel [m]	Year of commissioning
D1 - Branisko	T - 7.5	4 975	2003
D3 - Horelica	T - 9.0	605	2004
D2 - Sitina	2T - 7.5	1 440	2007
D1 - Lučivná	2T - 8.0	250	2007
D1 - Bôrik	2T - 7.5	1 000	2009
D1 - Šibeník	2T - 8.0	600	2015
D3 - Svrčinovec	T - 8.0	420	2017
D3 - Poľana	T - 8.0	900	2017
D3 - Považský Chlmec	2T - 8.0	2 249	2017
D1 - Ovčiarsko	2T - 8.0	2 400	2021
D1 - Žilina	2T - 8.0	700	2021
D1 - Prešov	2T - 8.0	2 244	2021
R4 - Bikoš	2T - 8.0	1 164	2023
D1 - Višňové	2T - 7.5	7 520	2024
D1 - Čebrať	2T - 8.0	3 619	2024
R4 - Okruhliak	2T - 8.0	1 971	2025

Legend: D1, D2, D3 – highway marking, R4 – expressway marking, 2T – two tube tunnel, T – one tube tunnel, 7.5 – roadway width in tunnel (in meters).

The Horelica tunnel is located in the north-western part of Slovakia and forms part of the Trans-European Road Network (Corridor VI) and is crossed by transit traffic from Slovakia to the Czech and Polish Republics and vice versa. It is 605 m long and was put into operation on October 29, 2004, in half profile, with bidirectional traffic, and it was part of a short road section 6.3 km long from the Oščadnica intersection to the intersection ending in the center of Čadca up to year 2020 (Fig. 1, 4 and 9).

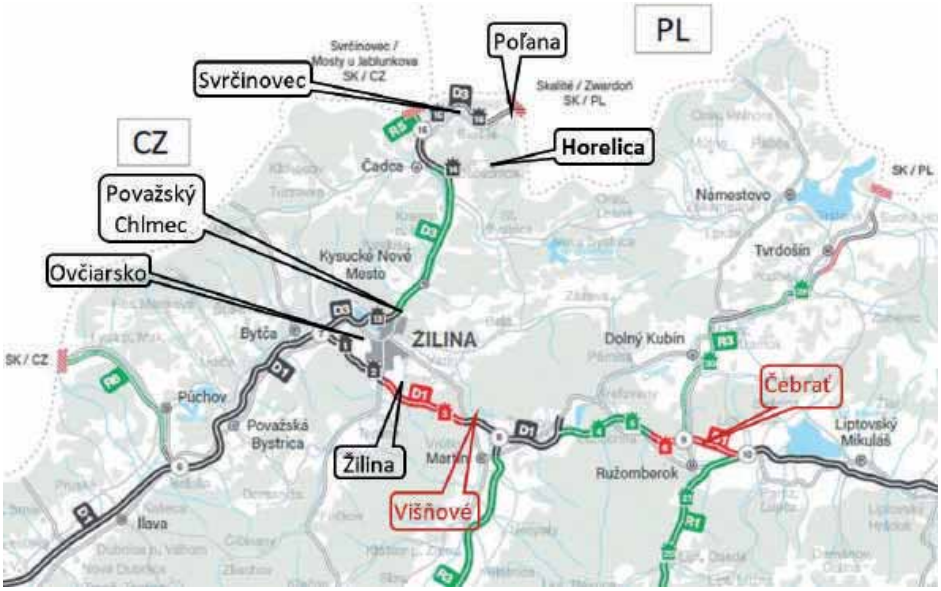


Fig. 1 Road tunnels in the northwest territory of Žilina Self-governing Region

Legend: black colour – highways and expressways in operation,
red colour – highways under construction process,
green colour – highways and expressways in preparation process.

The medium altitude of the eastern portal (direction Žilina) is approx. 452 meters above sea level and the western portal (direction Čadca, Fig. 2) is approx. 432 meters above sea level.

The route of the motorway in the place of the tunnel passes through a very rugged and morphologically demanding environment. With regard to the points of the compass, the tunnel is oriented mainly in the east - northwest direction, it is situated approx. 60 m from the terraced house in the place of the eastern portal (direction Žilina, Fig. 3) and approx. 90 m from the built-up area in the place of the western portal (direction Čadca).

Fig. 2 Western portal of Horelica tunnel (from direction of Čadca)

Fig. 3 Eastern portal of Horelica tunnel (from direction of Žilina)

In terms of risk analysis, the tunnel is characterized by one specific hazard, namely a longitudinal slope of more than 3%, specifically 4% in the descent in the direction to Čadca, almost in the entire tunnel. Transit and domestic traffic passed through two traffic lights in the center of Čadca (near shopping centers) and one railway crossing, which caused extensive tailbacks, especially during rush hours, which led to the frequent closures of the tunnel, especially in the direction to Čadca. These tunnel closures were the cause of many several kilometers of tailbacks in front of the tunnel in the direction from Žilina to Čadca. At the same time, in the opposite direction from the Czechia and Poland, the tailbacks of cars where formed due to the low permeability of the mentioned crossroads and the railway crossing. In both directions, therefore, long tailbacks of cars (on working days) were formed on a daily basis, consisting mainly of transit traffic (Fig. 10 and 11). Congested traffic caused:

- frequent traffic collisions,
- turning vehicles trying to bypass the emerging tailback,
- drivers not respecting the maximum traffic speed,
- accidents, often fatal, on this section every year (caused by worsened weather conditions in the mountain environment, especially in winter and other factors).

At the end of 2020, the full profile of the 4 km long section of the highway D3 was put into operation (Fig. 4), which connected the previously operated section of the D3 highway, including the Svrčinovec and Poľana tunnels, and thus significantly affected traffic in the region around the city Čadca.

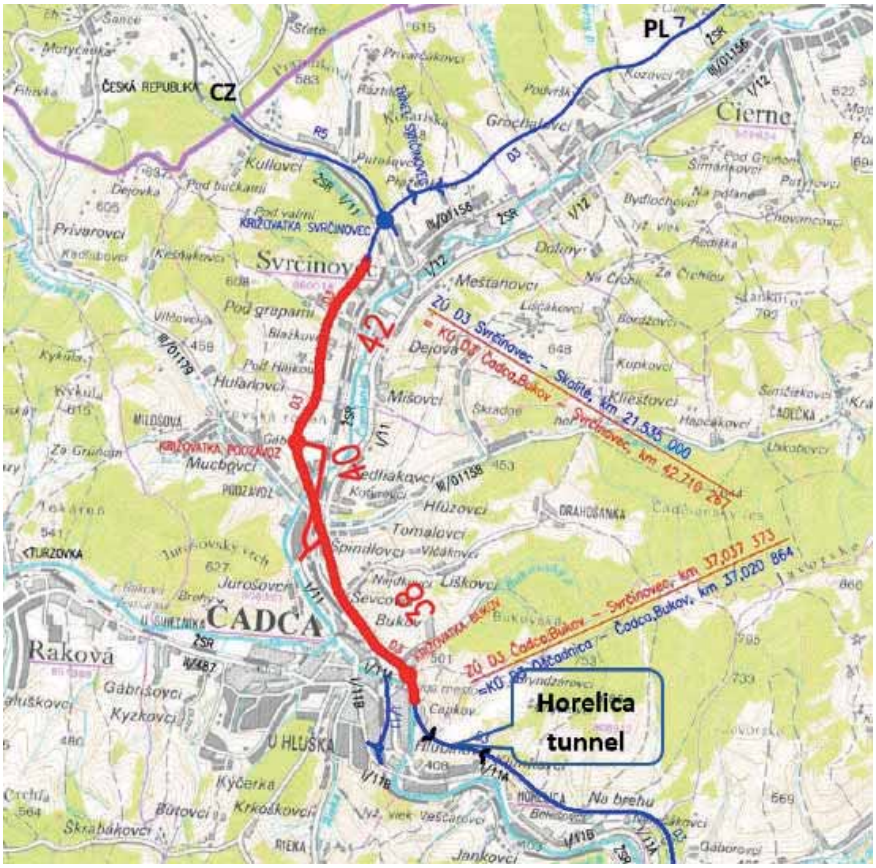


Fig. 4 New section of D3 highway opened at the end of 2020

1.1 Tunnel Horelica as part of highway D3

Upon completion, the D3 highway will become the third longest Slovak highway and will create the westernmost of a total of three planned motorway connections (D3, R3 and R4) with Poland. The route of the D3 highway is 59.1 km long and starts at the intersection with the D1 motorway (Žilina intersection), located near the regional city of Žilina (see Fig. 1). The motorway route continues roughly in a northerly direction through Žilina, Kysucké Nové Mesto, Čadca, Svrčinovec and Skalité to the state border with Poland, where it feeds smoothly onto the Polish S1 expressway. In the section approximately from Žilina to Čadca, the route D3 is currently being replaced by a bidirectional first class road no. I/11. In the medium term, the construction of the R5 expressway is also planned, which should start at the junction with the D3 motorway in Svrčinovec and continue in the corridor of the current I. class road no. I/11 to the state border with the Czech Republic. The D3 highway will thus be connected to the Polish motorway network and, via the R5 expressway, to the Czech road network. The D3 highway is part of the main route of the 6th Pan-European Corridor, which starts in Gdańsk and continues through Warsaw and Katowice to Žilina. Up to the Svrčinovec exit, the motorway route is also part of the European route E75, in the section Hričovské Podhradie - Žilina-west also E50 and E442. The construction of the D3 highway is extremely technically demanding, as it takes place in the mountainous terrain of northern Slovakia. There are a four tunnels on the D3 highway with a total length exceeding 4 kilometers. At present, three of these four tunnels are in operation in half profile, the Horelica tunnel (605 m), the Poľana tunnel (898 m), the Svrčinovec tunnel (420 m) and one tunnel in full profile, the Považský Chlmec tunnel (2,249 m). In addition to tunnels, many bridges and viaducts are being built on the D3, and we can also find the highest (84 m) motorway bridge in Slovakia (and in Central Europe), the Valy Bridge.

2 BASIC CONSTRUCTION AND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF THE HORELICA TUNNEL

The Horelica tunnel was excavated from 1998 up to May 2002. The construction of the tunnel is made of a two-layer lining with an intermediate drainage and protective layer and surface waterproofing and drainage of rock water through a drainage pipe. The rigid concrete pavement is in the tunnel. The length of the excavated part of the tunnel is 577 m, together with the portal parts is 605 m long. The longitudinal slope of the tunnel is 4% in the direction from west to east (in the ascent). The transverse slope of the pavement ranges from +4.21 % up to -4 %. The width of the lanes is 2 x 3.5 m, the width of the edge marking is 0.25 m and the width of the auxiliary lane is 0.75 m. The total kerb-to-kerb width is therefore 9 m. There is a 1.0 m wide elevated sidewalk on both edges of the road. The tunnel height clearance is 4.8 m, in the middle of the tunnel it is increased to 5.2 m, the total height in the tunnel area is 7.07 m (Fig. 5).

Fig. 5 Tunnel Horelica

Roadway drainage is solved by means of slotted drainage pipes and every 50 m there are siphon pipes - cleaning shafts, which also serve as a fire shutter, ie they have a self-extinguishing function in case of burning liquid. On the western portal there is an emergency tank with a volume of 214 m3. Behind the tunnel lining there is a drainage pipe measuring DN150 and every 50 m there are cleaning shafts in the tunnel.

An escape tunnel (Fig. 6) is run in parallel with the tunnel tube, which is set up to approx. 347 m and is connected to the tunnel tube by two connecting corridors. The basic height of the escape tunnel is 2.8 m and the width is 3.3 m. Only the primary lining is made in that escape tunnel and a second tunnel tube will be built in its place in the future. The escape tunnel is used for emergency self-evacuation of people from the tunnel tube, which is connected by two corridors and the maximum distance of two escape exits is 218 m.

The escape tunnel is protected from the tunnel tube by a revolving fire door and there is a overpressure chamber at the entrance from the tunnel tube. Access roads to the Horelica tunnel are either on the body of the motorway or a first-class road, or on separate service roads, which lead to the portal parts of the tunnel, where there are boarding areas for rescue services.

The passage lighting of the tunnel is solved in one row by symmetrical, discharge lamps, while at the entrances of the tunnel there are asymmetrical, discharge lamps in lengths of 165.3 m and 146.6 m fulfilling the function of adaptive lighting. The lighting control is solved automatically by means of brightness meters located on the entrance portals of the tunnel. The selected part of the traffic lighting also serves as emergency lighting with functional resistance and powered from a backup power supply. The tunnel's fire lighting is integrated in the illuminated signs, which also show the distances to the escape exits. The distance of these signs is about 30 m apart.

Fig. 6 Escape tunnel of tunnel Horelica

Mechanical ventilation of the tunnel is longitudinal by means of 4 axial - flow fans, which are powered from a backup power supply, with a functional resistance of 400 °C for 120 min. The fans are controlled by a central control system based on data from meters installed in the tunnel tube, resp. manually by tunnel operators. The fans are used not only for operational ventilation in order to comply with suitable conditions for passing through the tunnel, but also in the event of an emergency for ventilation respectively stratification of smoke in the tunnel tube.

The escape tunnel is protected by fans located at the exit of the tunnel tube and serves to maintain the overpressure between the escape tunnel and the tunnel tube. In the overpressure chambers there are also fans and fire dampers. The entrance to the escape tunnel is illuminated by separate lamps and the lighting of the escape tunnel, including the overpressure chambers, is solved by means of ceiling lamps.

Every 150 m there are SOS cabins on the right and left side of the tunnel, which are used to connect with the tunnel operator, resp. they have emergency call buttons and two fire extinguishers. Such SOS cabins are also located on the entrance portals of the tunnel.

A permanently flooded fire water supply system with water source from a fire tank with a volume of 202 m3 is installed in the tunnel and the operating pressure and the required water flow in the fire water supply system are provided by 2 main and 2 backup pumps. There are hydrants on the entrance portals near the boarding areas and every 100 m in the tunnel there are fire niches in which there are hydrants and spare equipment for the intervening units - fire hoses.

At the entrances to the tunnel and in the tunnel, there are 5 signal sections, which are used to stop vehicles and to inform users about emergencies in the tunnel. SOS cabins and exit entrances are marked in accordance with 54/2004/EC. At the entrances to the tunnel there are 3 chamber traffic lights.

Analog cameras, a linear temperature detector located under the tunnel ceiling, 2 opacity and CO sensors, measuring the speed and direction of air flow in 3 points of tunnel tube and measuring temperatures and differential pressures between the escape tunnel and the tunnel tube are used to monitor the situation in the tunnel tube.

The tunnel is equipped with a tunnel radio system, the loudspeakers are installed before entering the connecting corridors, in the escape tunnel and in the pre-portal areas, which are used to provide information in case of evacuation of users from the tunnel tube. A radiation cable is installed in the tunnel, by means of

which the signal of 3 radio stations is transmitted and it is possible to receive the signal of mobile operators and communicate by means of transmitters not only for the tunnel operator, but also for emergency services.

The tunnel power supply is solved from two independent 22 kV lines and as the main source of backup power, the tunnel power supply is provided by a Diesel generator, which can supply the tunnel at full tank for 240 minutes. A battery UPS is used to switch the power supply from the HV lines to the diesel generator.

The Horelica Tunnel Control Center is located in the operating building on the west tunnel portal. The Svrčinovec and Poľana tunnels, including adjacent motorway sections, are also integrated in this center. 3 operators are responsible for supervising the entire section of about 25 km, including the access road from the town Čadca and three crossroads - Oščadnica, Podzávoz, Svrčinovec and also the state border of Slovakia with Poland.

3 TRAFFIC STATISTICS AND SAFETY MEASURES

As mentioned in previous chapters, the Horelica tunnel is located on the future D3 highway near the borders with Czechia and Poland, which is part of Corridor VI. This is also the reason why transit transport from Slovakia to the Czech and Polish Republics passes through it and vice versa.

The inhabitants of Čadca and the surrounding villages often come to work to nearby towns, especially towards the regional city of Žilina and, thanks to a smooth understanding, also towards the Czechia, especially to Ostrava, Český Těšín, Frýdek Místek (CZ), thus significantly joining transit traffic locals who cross the Horelica tunnel daily.

Čadca is located in the middle of industrial areas focused on engineering and automotive production, the most important of which KIA in Žilina, HYUNDAI in Ostrava, steelworks in Třinec (CZ), industrial areas in Katowice (PL) and the mining industry in Ostrava and Katowice, and many other companies that contribute to the traffic passing through this region.

3.1 Transport of dangerous goods through the tunnel Horelica

Based on the results of the risk analysis, which is part of the safety documentation and on the recommendation of the designer, it follows that the Horelica tunnel is classified in category E. This classification is mainly affected by unfavorable traffic parameters, high traffic volume, creation of congestions and tailbacks. Traffic parameters directly increase the riskiness of the tunnel, the risk of accidents and, in the future, may gradually deteriorate. Their removal can be achieved only by completing the second tunnel tube and adjacent sections of the motorway. In addition, the emergency tank is located near the terraced house (approx. 103 m) and near the Tunnel Control Center with permanent service. That tank serves to capture hazardous liquids released after the accident (flammable, explosive, toxic, toxic substances) and its location can endanger the immediate population and personnel of the control center. If the transport of dangerous goods through the Horelica tunnel is permitted, a more detailed examination of the effects of the risks of locating the emergency tank on the immediate surroundings (explosion, leakage of toxic and toxic substances) should be carried out and the necessary construction and especially operational measures taken. All aspects of the impact of the proximity of the emergency tank to the civilian population and the control center should be examined.

The construction of a second tunnel tube is currently being planned. Based on the prepared risk analysis in the case of one-way traffic in two tunnel tubes, the Horelica tunnel would fall into category A according to the ADR agreement.

3.2 Traffic signing

Since 2004, when the Horelica tunnel was put into operation, there have been several changes in the legislation of the Slovak Republic, including the setting of maximum permitted speeds. The figure below (Fig. 7) shows the maximum permitted speeds on the different types of roads.

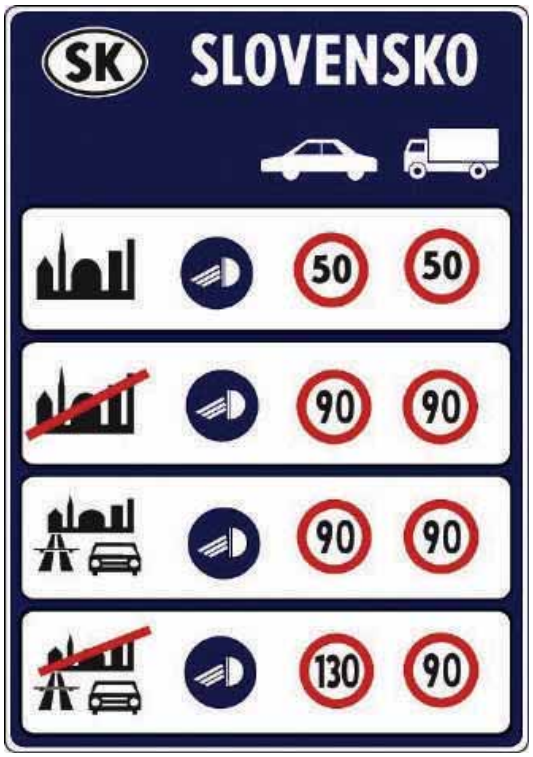


Fig. 7 Maximal permitted speeds in Slovakia

At the time of commissioning, the maximum speed per section, including the Horelica tunnel, was allowed at 80 km/h. Due to the frequent occurrence of congestions and the increasing formation of tailbacks the mutual agreement between the road administrator and the police and measures were introduced, in 2015 the traffic determination was updated, speeding was reduced in both directions to 60 km/h, the overtaking section has been shortened and the traffic signs prohibiting turning have been added to the section marking. These measures were intended to reduce accidents and increase safety on this road. (see chapter 3.5). The frequent collisions and traffic accidents occurred not only when turning vehicles (Fig. 8).

Fig. 8 Fatal traffic accident in the section in front of the Horelica tunnel

3.3 Traffic volume

Traffic volume of monitored section are obtained on the basis of data from traffic counters. These devices work on the principle of inductive sensors located in the road and can detect the passage of the vehicle on this part of the road. It is thus possible to statistically evaluate and break down the composition of the traffic flow.

Data collection is centrally collected by the road administrator, who regularly evaluates them. The table below shows statistical data of the annual average daily traffic (AADT) in the individual months from 2017 to 2021, while the value given in the individual cells of the table is a summary for both directions. The traffic flow distribution for both lanes is approximately 50:50. To determine the traffic volume, each motor vehicle is counted as a separate unit.

Table 2 AADT of tunnel Horelica by moths in the years 2017 - 2021 [veh/24h]

Year	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2017	14 147	15 731	16 351	15 721	16 833	17 592	16 437	16 613	15 424	15 206	14 130	12 968
2018	13 776	14 516	14 387	14 966	14 989	15 669	16 283	16 382	15 332	15 023	14 348	12 509
2019	12 377	14 561	14 490	14 538	14 677	15 494	16 180	16 134	15 440	15 085	14 379	12 783
2020	12 964	14 191	10 784	11 441	11 792	12 705	13 953	15 391	13 862	13 319	12 650	11 310
2021	10 963	13 307	13 531	14 150	15 237	17 360	18 024	18 220	17 417	16 463	15 308	14 461

In accordance with Directive 54/2004/EC according to Annex no. 1, point 1.3.1 The term "traffic volume" in this annex refers to the annual average daily traffic through a tunnel per lane. For the purpose of determining the traffic volume, each motor vehicle shall be counted as one unit. The annex referred to in point 2.1.2 states that, for tunnels at the design stage, a 15-year forecast shows that the traffic volume will exceed 10 000 vehicles per day per lane, a twin-tube tunnel with unidirectional traffic shall be in place at the time when this value will be exceeded. According to the traffic forecast from 2013, these values were to be exceeded already in 2020. However, the update of the traffic survey from 2019 showed, that the existing single-tube bidirectional tunnel Horelica exceeds the permissible traffic capacity in the forecast period of 15 years. For this reason, it is planned to convert it from a single-tube to a twin-tube four lane tunnel with unidirectional traffic.

The overall traffic situation of the Horelica tunnel in 2021 is better than in previous years. It was mainly affected by the difficult traffic situation in the entire region and in the town of Čadca, by renewed increase of AADT (15 373 veh/24h) (see Table 3) and by the operation of the newly built section D3 Čadca – Bukov-Svrčinovec. It was this last factor that positively affected the passage time through the section with the Horelica tunnel and significantly reduced the formation of slow-moving convoys of vehicles and their stopping in front of the eastern portal of the tunnel (by up to 96.2% compared to 2017). The tables in this chapter show the reduced traffic intensity in some months in 2019 and 2020. This reduction was influenced by COVID19 measures and this topic is discussed in more detail in Chapter 4.

Table 3 Composition of traffic flow from AADT in the period 2017 – 2021 [veh/24h]

Year	Total	Personal Vehicles up to 5.5 m	Light Trucks up to 6 m	Medium Trucks up to 13 m	Heavy Trucks up to 18 m	Heavy Trucks more than 18 m
2017	**15 692**	11 162	225	1 462	2 521	322
	100 %	**71.13 %**	**1.44 %**	**9.32 %**	**16.07 %**	**2.05 %**
2018	**14 825**	10 064	211	1 493	2 706	351
	100 %	**67.88 %**	**1.42 %**	**10.07 %**	**18.25 %**	**2.37 %**
2019	**14 666**	9 749	203	1 538	2 812	364
	100 %	**66.47 %**	**1.38 %**	**10.49 %**	**19.17 %**	**2.48 %**
2020	**12 864**	8 354	178	1 434	2 603	295
	100 %	**64.95 %**	**1.40 %**	**11.10 %**	**20.25 %**	**2.30 %**
2021	**15 373**	9 722	213	1 772	3 311	356
	100 %	**64.95 %**	**1.40 %**	**11.10 %**	**20.25 %**	**2.30 %**

3.4 Tailbacks and tunnel closures

In 2004, when the section was put into operation, traffic was diverted from the wider center of the city Čadca to the new diversion route, which had a significant impact on the city's throughput. However, with the gradual increase in traffic, with the completion of shopping centers, including two traffic lights used to control traffic, the problem of forming tailbacks on the built section began to arise (Fig. 9).

The biggest problem was that the transit traffic was directed through the city Čadca, next to two shopping centers, where the intersections were controlled by traffic lights and crossing the railway crossing (this is a local railway). Regular stopping, so-called stop-and-go traffic, congested traffic, especially at peak hours, and the maximum capacity reached through intersections and adjacent roads caused extensive tailbacks not only on the section with the Horelica tunnel, but also on adjacent roads in the city Čadca.

In the direction from Žilina to Čadca and further to Poland and the Czech Republic, 5-6 km of tailbacks were formed at peak hours, and instead of crossing, which should take 6 minutes, the vehicles also stood about 60 minutes (Fig. 10). In addition, in order to prevent vehicles from standing in the tunnel, the operators had to close the entrance to the tunnel tube on a regular basis.

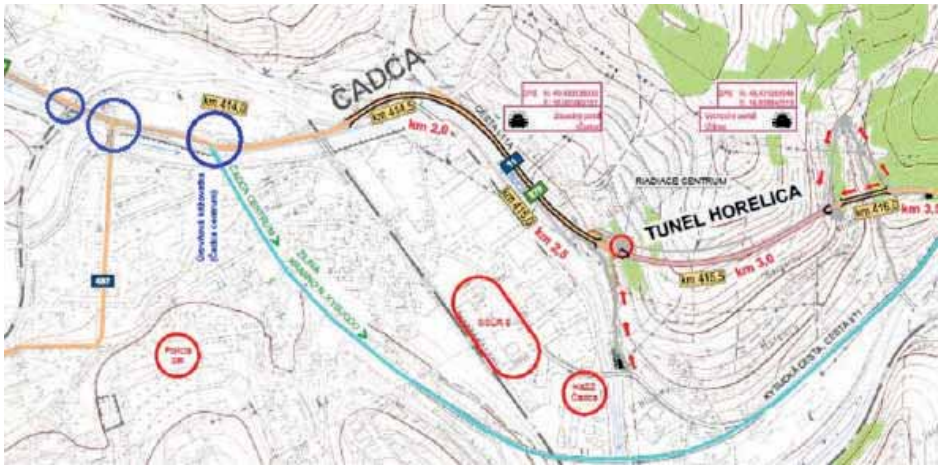


Fig. 9 Problem traffic lights and railway crossing on the main road in direction to CZ and PL, before 2020 (marked by blue circles)

Fig. 10 Example of tailback in front of the tunnel Horelica

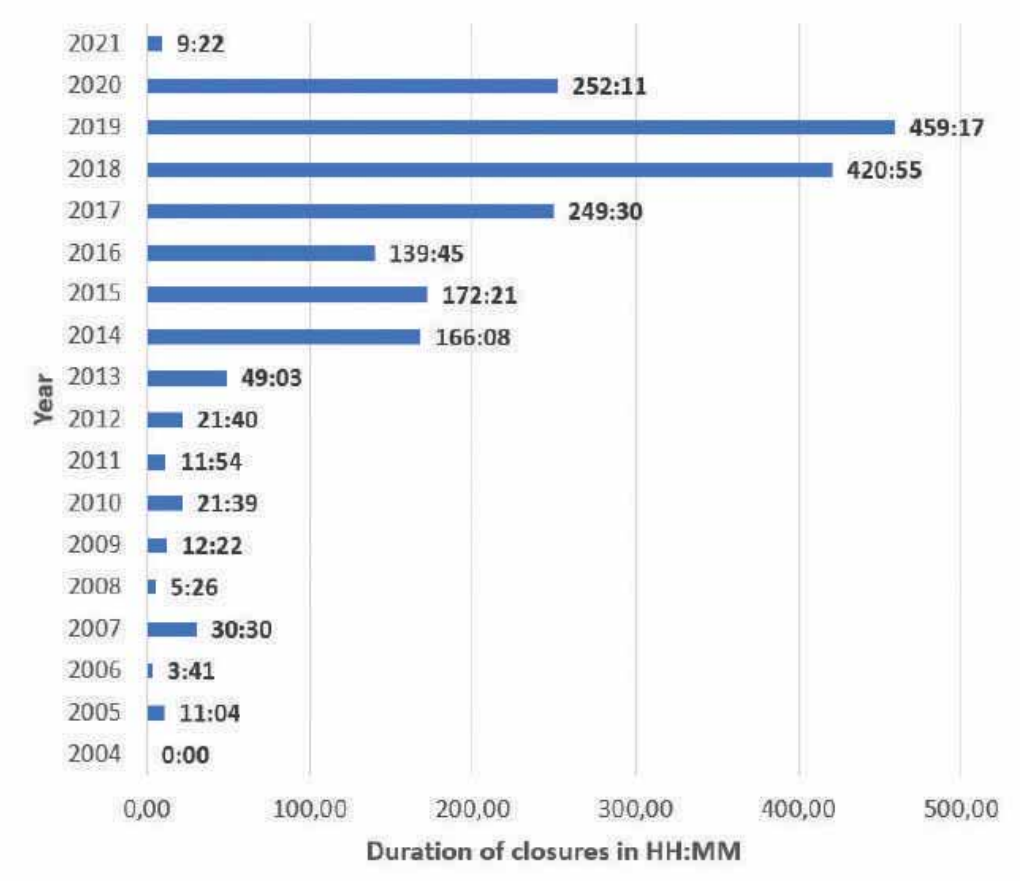
The problem also manifested itself in times of traffic accidents. Due to the hilly terrain in times of bad weather (especially in winter), the tailbacks of stopped cars could climb up to 20-30 km in length (Fig. 11). One of the problems is also the drivers who cross from south to north (or vice versa) often times on summer tires and despite the efforts of the road manager to make the whole section passable, these vehicles cross path and the whole section is impassable.

Fig. 11 Tailbacks 30 km from the Horelica tunnel due to the impassability of the section

The table and graph below show the duration of tunnel closure in hours due to tailbacks formation:

Table 4 Data on the closure of the Horelica tunnel due to tailback formation since 2014 (by months) [HH:MM]

Year/ Month	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2014	1:11	4:07	1:21	9:05	6:33	3:22	12:45	8:18	36:38	31:31	22:17	5:00
2015	14:50	13:52	11:08	10:05	14:49	6:04	6:38	9:44	23:02	44:29	13:04	4:36
2016	9:38	11:29	5:09	3:44	2:12	23:05	18:55	13:08	13:45	10:43	8:29	19:28
2017	8:10	12:19	8:57	15:51	9:13	13:43	44:32	22:46	23:07	28:20	27:37	34:55
2018	16:03	32:30	30:08	28:41	32:28	33:40	32:47	41:17	44:26	54:20	39:22	35:13
2019	25:18	35:58	37:44	44:05	42:13	32:28	39:13	27:07	40:03	57:29	32:54	44:45
2020	33:17	53:08	22:20	0:00	0:07	28:51	22:43	19:57	40:07	17:20	2:09	12:12
2021	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:01	2:03	3:48	0:19	0:59	0:12



Graph 1 Duration of the Horelica tunnel closures due to tailback formation from the beginning of operation [HH:MM]

The same problem was in the opposite direction from Czechia and Poland, where tailbacks were also formed, especially during peak hours in the length from 5 to 10 km, where instead of about 10 minutes the passage time in the section lasted from 50 to 70 minutes.

The data contained in the Graph 1 show that the year 2021 is similar than the year 2005, in the closures of the Horelica tunnel due to congestions. This is related to the traffic situation in Čadca and especially with completion of the new section D3 Čadca, Bukov - Svrčinovec. This also follows from the data from the traffic counter, located on the section in front of the Horelica tunnel.

3.5 Tailbacks prevention measures

With the growing volume of traffic and the increasing number of tailbacks and the increase in time spent in the tailbacks, the administrator and the police tried to take measures that would lead to the elimination of these facts.

One of the first measures was to reduce the time of closing the railway crossing to a minimum safe time. Despite the shortening of time, it still takes more than a minute (within an hour at peak times and twice in a row) for the train to cross the road crossing, when the entire transit traffic stops completely.

At the same time, detectors in front of the intersections were added to the pavement to help intelligently control the traffic lights at crossroads according to the congestion from individual intersection branches, and thus traffic flow was to be preferred. During rush hours, police officers helped control traffic at intersections by prioritizing certain directions of traffic in order to speed up the passage through the city center. However, it was up to the police officer to decide which direction would be given priority and which direction would be released first.

However, none of these measures helped, as the crossroads permeability were insufficient, especially during the afternoon peaks, and the only solution would be to complete the missing section, which would divert transit traffic from the wider center of Čadca.

3.6 Traffic accidents on the adjacent section and in the tunnel

Of the total length of 59 km of the D3 motorway, 36 km are currently built, of which approximately 20 km are operated in half profile with two-way traffic. In December 2020, the last approximately 4 km section was launched so far, and until then, transit traffic was conducted mainly on local roads.

Congested traffic led to the formation of tailbacks, but also to frequent collision situations and traffic accidents along the entire length from the state border (with CZ and PL) to a full-profile highway near the city of Žilina. Unfortunately, often these accidents were fatal. Any inaccessibility led to delays and, in the absence of alternative routes, where traffic could be diverted, drivers had no choice but to wait.

The table below shows data on the duration of the section shutdown and the number of operator interventions. In 2015, the first measures were introduced to reduce accidents in the area with the addition of traffic signs and speed reduction. Also in 2021, there is a noticeable reduction in the number of tunnel closures due to the formation of tailbacks and thus the passage of the section, so there is also a reduction in accidents in the monitored section.

Table 5 Overview of the number of operator interventions in various traffic situations and the duration of the section closures, including the Horelica tunnel

Year / Tunnel closures reasons	2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021	
	time	no.	time	no.	time	no.	time	no.	time	no.	time	no.	time	no.
TS	4:35	7	3:34	19	1:51	16	0:12	2	7:12	26	0:20	9	0:11	3
TS-T	172:21	1233	139:45	1204	249:30	2038			420:55	2759	459:17	2922	252:11	1426
TS-TA	30:07	10	4:04	4	3:51	3	5:05	3	1:27	2	4:34	2	11:15	2
TS-T	4:53	34	2:19	32	0:48	11			2:01	5	1:02	12	0:03	2
TS-TAT	5:38	3	0:00	0	2:06	2	0:30	1	0:25	1	1:29	1	0:00	0

Legend:
no. – number of operator interventions,
TS – traffic situation in front of and behind the tunnel with impact on tunnel operation,
TS-T – traffic situation/tailbacks in front of and behind the tunnel,
TS-TA - traffic situation/accidents in front of and behind the tunnel,
TS-T – traffic situation in tunnel tube (pedestrians, cyclists, beast, stopped vehicle, oversized cargo, lost of goods, a situation endangering the safety of persons and traffic),
TS-TAT – traffic situation in tunnel tube (traffic accident).

As can be seen in the Table 5, while in 2015 there were a total of 13 traffic accidents in the Horelica tunnel and in the monitored section, after the introduction of measures and speed reduction the number of traffic accidents decreased rapidly.

In 2021, after the opening of a new section of the D3 highway, there were only 2 traffic accidents in the monitored area in the pre-portal area of the tunnel. The closure of the tunnel due to the exceptional traffic situation in the tunnel tube was below average compared to other years (TS-T and TS-TAT = 0:16 h, Ø = approx. 4:12 h/year). The mentioned traffic events in 2021 totally required operational interventions of the operating personnel of the Horelica tunnel in the number of 44 interventions, which is 1396 interventions less than in the previous year. In total, the Horelica tunnel was closed in 2021 due to various traffic situations at only 21:04 h, i.e. 237: 33 hours less than in 2020.

4 EFFECT OF COVID-19 ON TRANSPORT

In 2020, the respiratory disease SARS-COV-2, also known as COVID-19, began to spread in Europe. The first known case appeared in Slovakia on March 6, 2020 and the Slovak government resp. governments have also begun to take action against the spread of the disease.

The basic measure was to limit the movement of the population, close schools, order a home office, restrict production. All this had a significant effect on the number of vehicles on the road and thus on the formation of tailbacks. Table 4 clearly shows the closing time of the Horelica tunnel. In March, when the measures came into force, the closing time of the Horelica tunnel gradually began to decrease to approximately 2/3 of the previous year. In April and May 2020, when the strictest measures were in place, even the Horelica tunnel was almost never closed. With the gradual relaxation of measures, the intensity of traffic also began to increase. In September 2020, traffic intensity was even at the level of previous years. However, in October and November, as the number of infected and gradually filled hospitals increased, measures to restrict movement for the po-

pulation began to be taken in Slovakia again. But as can be seen in Table 4, although the duration of the Horelica tunnel closures were no longer as significant as in previous years, it was still necessary to close at peak hours. The fact that the situation did not recur in the spring was also due to the fact that there was no longer the closure of production plants, the reduction of production and especially because the countries in the EU began to take various measures. In December, the entire section was completed for about 10 days, as it was necessary to complete the completion of the original section to continue the journey to the border and thus to complete the bypass of the city Čadca.

5 START OF THE NEW SECTION OF THE D3 HIGHWAY ČADCA BUKOV - SVRČINOVEC

The construction of the 5,673 meter long section D3 Čadca, Bukov - Svrčinovec began at the end of 2016. It is a very demanding construction work. The new full-profile highway largely passes through extremely complicated terrain and built-up areas (Fig. 12). Part of the section is led by an elevated road over the inhabited area. It contains in total of 2 half fly-overs, approximately 40% of the total route of the motorway section in question consists of bridges (19 bridges), 41 geotechnical structures and 28 noise barriers.

The existing section of the D3 motorway Oščadnica - Čadca, Bukov, including the Horelica tunnel, joins the new D3 section from Žilina. On the other hand, it seamlessly connects to the section D3 Svrčinovec - Skalité, including two tunnels (Svrčinovec and Poľana), to the state border with Poland.

The opening of the section D3 Čadca, Bukov - Svrčinovec has a significant benefit for the inhabitants of the region Kysuce. In addition to facilitating traffic in Čadca and in the surrounding villages, it has also an international consequence, the highway created a connection between Slovakia and neighboring Poland and czechia via the Svrčinovec intersection, which is part of the adjoining section D3 Svrčinovec - Skalité.

Fig. 12 A section under construction behind the exit from the Horelica tunnel in the direction to Čadca, PL and CZ.

The AADT for the year of operation reached 7 000 vehicles, of which up to two thirds (66%) were transit truck traffic, while the maximum occupancy was reached on 14.9.2021, when up to 11 000 vehicles were recorded. This is a very busy section of the Kysuce highway.

5.1 Changes after opening a new section

As already written in previous chapters, the opening of the section D3 Čadca Bukov - Svrčinovec redirected transit traffic from the center of Čadca, significantly reduced emerging tailbacks, in the northern part of the city traffic volume decreased to about 4 000 vehicles per day from the original total volume around 17 000 vehicles.

For the inhabitants of Čadca, but also of the wider area, this brought considerable alleviation from the negative accompanying effects of traffic, noise, air pollutants and traffic accidents.

As there are no transit vehicles standing in front of the tunnel, there are no regular closures, which can also be seen in Tables 4, 5 and graph 1, where in 2021 the one-tube Horelica tunnel was closed at approximately 9:22 hours, which is almost 450 hours less than in 2019 (2020 was significantly distorted due to measures against the spread of COVID-19).

Short-term closures take place mainly during the afternoon rush hours, when local traffic in particular remains standing at the exit from the D3 motorway to the city Čadca.

However, the problem with transit traffic has not disappeared with the opening of the section. He moved about 20 km south to the near of the city Kysucké Nové Mesto, where, due to the passage of a traffic light intersection, kilometers tailbacks are formed in the morning towards Žilina and in the afternoon in the direction from Žilina (Fig. 13).

Fig. 13 Tailbacks formation on the entire section of the D3 motorway (form maps.google.com)

In the event of an accident or road works behind the tunnel to Žilina, there were even situations to which the tunnel operators were not used, because they had to close the tunnel in direction to Žilina (as opposed to Čadca).

6 CONCLUSIONS

The Horelica tunnel is not an urban tunnel, it is located outside the built-up area and there are no structures above its surface that could also fall in the event of its collapse. Due to its position near the city Čadca and the fact that it is part of the bypass of the city Čadca, and for almost its entire life the traffic passing through the tunnel ended in the city center, we could classify it among the urban tunnels.

Its meaning is important for the inhabitants of the Kysuce region as well as for transit traffic. Since its opening, it has significantly helped to drive through the city Čadca, and it is always important for the inhabitants of the city to know when there is a planned or unplanned closure of traffic through the tunnel.

With the opening of the new section, traffic in and around Čadca was eased, but the problem moved about 20 km lower. Due to congested traffic, there are frequent traffic accidents in this section and, in case of bad weather due to the nature of the area, also complications in the transit traffic on the future D3 motorway.

The AADT through the Horelica tunnel does not yet reach the limits required for the construction of the second tunnel tube required by Directive 54/2004/EC, but neighboring of Slovakia are constructing their roads, approaching the highway D3, which may have a significant impact on traffic growth also in the Horelica tunnel.

Currently, the second tunnel tube is in the design stage (Fig. 14), but the priority of the Slovak government is to currently solve the problem near the city Kysucké Nové Mesto, to which the tailbacks from the vicinity of Čadca have moved.

Fig. 14 Visualisation of west portal of the Horelica tunnel after the construction of the second tunnel tube

This work was supported by the Slovak Research and Development Agency APVV (project No. APVV-15-0340).

LITERATURE

Directive 54/2004/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.

Safety documentation of the Horelica tunnel.

www.ndsas.sk

https://www.mojekysuce.sk/spravodajstvo/20-dnova-uzavierka-tunela-horelica

https://domov.sme.sk/c/22736945/dialniciari-zacnu-na-jesen-s-pravidelnou-udrzbou-osmich-tunelov.html

https://slovakia.travel/automobilova-doprava#prettyPhoto

https://myzilina.sme.sk/c/7952452/pred-tunelom-horelica-doslo-k-mimoriadne-vaznej-dopravnej-nehode.html

https://www.facebook.com/groups/195323014272906/

https://spravy.pravda.sk/domace/clanok/173370-v-cadci-maju-104-centimetrov-snehu-padol-91-rocny-rekord/

https://spravy.pravda.sk/domace/clanok/173360-kysuce-zavalil-sneh-kamionistom-dochadzali-v-kolonach-zasoby/

https://www.mojekysuce.sk/spravodajstvo/najnovsie-foto-z-vystavby-useku-d3-cadca-bukov-svrcinovec

https://www.asb.sk/stavebnictvo/inzinierske-stavby/tunely/tunel-horelica

THE EFFECT OF THE PILOT PROJECT WITH COMPREHENSIVE COUNTERMEASURES FOR TRAFFIC SAFETY IN TUNNEL

Seungjun Lee
South Korea

In recent, a lot of fatal crashes with serious damage in terms of fatality and cost have been occurred in tunnel areas of expressways, drawing a huge social concern. However, each countermeasure for the tunnels in which traffic accidents have been happened is different, and it doesn't seem that it is a fundamental measure because there is no unified standard. This research aims the application of standardized and comprehensive countermeasures for the improvement of traffic flow condition and safety in tunnel areas, through the cooperation with HQ and regional HQ. The main components are as follows; the first, the establishment of comprehensive countermeasures providing tunnel areas with more safe traveling environment, the second, the standardization of comprehensive countermeasures, the third, the provision of a pilot project for the establishment of detailed plan and the effect of the pilot project.

EL EFECTO DEL PROYECTO PILOTO CON CONTRAMEDIDAS INTEGRALES PARA LA SEGURIDAD DEL TRÁFICO EN EL TÚNEL

Recientemente, se han producido muchos accidentes fatales con danos graves en terminos de fatalidad y costo en las areas de los tuneles de las autopistas, generando una gran preocupacion social. Sin embargo, cada contramedida para los tuneles en los que se han producido accidentes de trafico es diferente, y no parece que sea una medida fundamental porque no existe un estandar unificado. Esta investigacion tiene como objetivo la aplicacion de contramedidas estandarizadas y completas para mejorar las condiciones del flujo de trafico y la seguridad en areas de tuneles, a traves de la cooperacion con la sede central y la sede regional. Los componentes principales son los siguientes; el primero, el establecimiento de contramedidas integrales que proporcionen areas de tuneles con un entorno de viaje mas seguro, el segundo, la estandarizacion de contramedidas integrales, el tercero, la provision de un proyecto piloto para el establecimiento de un plan detallado y el efecto del proyecto piloto.

L'EFFET DU PROJET PILOTE AVEC DES CONTRE-MESURES GLOBALES POUR LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE DANS UN TUNNEL

Ces derniers temps, de nombreux accidents mortels entrainant de graves dommages en termes de deces et de couts se sont produits dans les zones de tunnels des autoroutes, suscitant une enorme preoccupation sociale. Cependant, chaque contre-mesure pour les tunnels dans lesquels des accidents de la circulation se sont produits est differente, et il ne semble pas que ce soit une mesure fondamentale car il n'y a pas de norme unifiee. Cette recherche vise l'application de contre-mesures standardisees et completes pour l'amelioration des conditions de circulation et de la securite dans les zones des tunnels, grace a la cooperation avec le siege et le siege regional. Les principaux composants sont les suivants?; le premier, la mise en place de contre-mesures globales offrant aux zones du tunnel un environnement de deplacement plus sur, le second, la normalisation des contre-mesures globales, le troisieme, la fourniture d'un projet pilote pour l'etablissement d'un plan detaille et l'effet du projet pilote.

1. INTRODUCTION

Recently, large-scale traffic accidents have been occurred frequently in many tunnel areas of expressways, resulting in a great deal of casualties and material damage. As a result, there is a surge in social interest in Korea. Regarding this, the HQ and regional HQ of the expressway management agency, Korea Expressway Corporation, have taken measures to prevent traffic accidents in tunnel areas. However, these measures are not the standardized measures but follow-up measures of the individual branch office. Therefore, there is a limit to establish the fundamental preventive countermeasure plan.

The purpose of this study is to establish a comprehensive and standardized framework to improve the traffic safety of tunnel areas of expressways.

Figure 1. The examples of traffic accident in tunnel areas

2. STATUS OF TUNNEL ACCIDENTS AND PROBLEM IDENTIFICATION

In order to establish the appropriate countermeasures for the enhancement of traffic safety in tunnel areas of expressways, it is required to investigate the main types and causes of traffic accidents. For this, three analyzes were performed as follows.

- Analysis of the problem through traffic accident analysis in tunnel areas
- Analysis of the problem of driving environment in tunnel through a driver survey
- Analysis of the problem of driving environment in tunnel through a field survey

2.1. Analysis of the Problem through Traffic Accident Analysis in Tunnel Areas

1) General status of tunnel and traffic accidents in tunnel

(1) The number of traffic accidents in tunnel areas of expressways

The number of accidents in expressway tunnels in 2015 is 386, which shows an annual average growth rate of 35.65% compared to 114 in 2011. Unlike the trend of expressway accidents in recent years, the trend of tunnel accidents is steadily increasing.

Figure 2. Accident trend of expressway tunnel areas

(2) Major accidents in tunnel areas

The major traffic accidents in tunnel areas, which have become a hot topic in recent years, have been steadily occurring from 2011 to 2015, and deaths and seriously injured accidents are increasing rapidly in the recent three years, and it is urgent to take measures against major traffic accidents in tunnels.

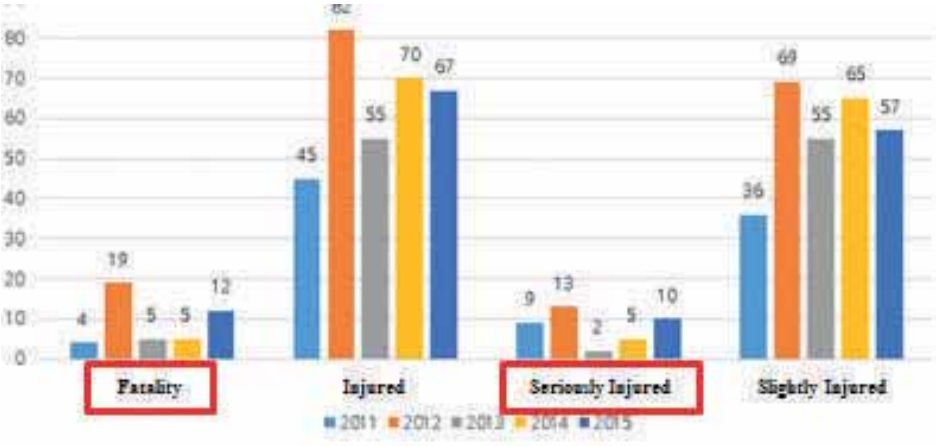


Figure 3. Trends of traffic accidents in expressway tunnels

(3) Traffic accident types in tunnel areas

The representative accident type of expressway tunnel areas is the rear-end crash which is related to the traffic congestion inside the tunnel and shows a rapid increase rate of 30.07% recently.

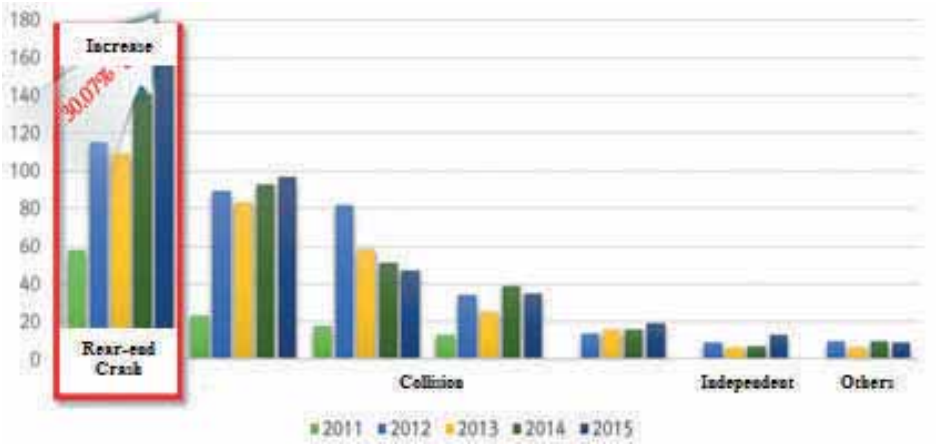


Figure 4. Traffic accident types in expressway tunnel areas

(4) Number of accidents per tunnel branch

In the tunnel part, which is divided into entrance, inside, and exit, the traffic accident occur more frequently inside the tunnel than other parts, so it is required to prepare the management countermeasure to prevent traffic accidents inside the tunnel.

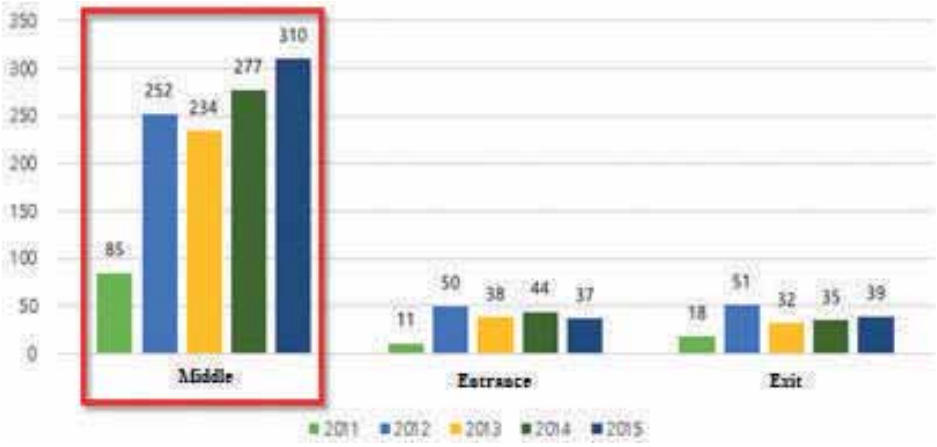


Figure 5. The number of accidents of each part in tunnels

(5) Causes of traffic accident in tunnel areas

It was found that the main cause of the tunnel traffic accident was the driver factor. The major driver factors to be managed are drowsiness, speeding, and abrupt cutting in lane, etc.

Table 1. Causes of traffic accident in tunnel areas

Causes	The Number	Rate (%)
Driver	1,113	73.56%
Vehicle	152	10.05%
Traffic Condition	31	2.05%
Others	217	14.34%
Total	1,513	100.00%

2) Implications

Traffic accidents in tunnel areas among the entire traffic accidents on expressways are showing an increasing trend every year, and featured as fatality and seriousness. Particularly, in case of traffic congestion inside the tunnel, the rear-end crashes caused by large vehicles such as trucks due to driver's inattentive driving such as drowsiness and speeding are greatly increased.

2.2. Analysis of the Problem of Driving Environment in Tunnel through a Driver Survey

1) Overview of a driver survey

In order to identify the problems of driving environment in tunnel and to find ways to improve it, a driver survey was conducted. The subjects of the survey were more than 300 people including workers in field of tunnel management, transportation experts, and general public. The response was 129 of them.

The subjects were asked to prioritize the following 9 items; narrow tunnel width, slow moving heavy vehicles, insufficient lighting and visibility, traffic congestion, abrupt cutting in line, reckless driving, monotonous surrounding, narrow and dark entrance, dark and light adaptation.

2) Results of a driver survey

Table 2 shows the priorities of the problems and countermeasures to improve the problems as a result of the survey. Among the problems, it seems that the most important problems are traffic related issues such as traffic congestion, slow moving heavy vehicle, and abrupt cutting in line. On the other hand, major countermeasures which are selected to prevent traffic accident coping with various problems in tunnel area are variable speed limit (gradual speed control), provision of traffic congestion information, enhancement of lighting and visibility, cleaning, etc.

Table 2. Results of a driver survey

Priority	Problem Types	Countermeasures
1	Traffic Congestion	Variable Speed Limit (gradual speed control) Provision of Traffic Congestion Information in tunnel
2	Slow Moving Heavy Vehicle	Provision of Traffic Condition Information in tunnel
3	Abrupt Cutting in Line	Promotion of Safe Driving
4	Narrow Tunnel Width	Enhancement of Visibility
5	Aggressive Driving	Promotion of Safe Driving
6	Narrow and Dark Entrance	Enhancement of Lighting and Visibility
7	Dark / Light Adaptation	Enhancement of Lighting at the Entrance and Exit
8	Insufficient Lighting / Visibility	Enhancement of Lighting and Visibility, Cleaning
9	Monotonous Surrounding	Painting, Landscape Lighting

2.3. Analysis of the Problem of Driving Environment in Tunnel through Field Survey

1) Field survey

The status of the facilities and traffic situation was surveyed in 432 tunnels. Among them, 144 tunnels were analyzed as accident-prone area which has 5 accidents or more. In addition to the data on the existing tunnel safety facilities, the information provided to the drivers in tunnel areas, including the tunnel congestion, was examined.

2) Field survey results

In addition to the findings from the driver survey results, the major problems of driving environment in tunnel areas identified through the field survey are as follows.

- Restraints of sight distance, lots of heavy vehicles
- Poor condition of shoulder lane, lane visibility, lighting, cleaning
- Dark and light adaptation, inaccurate traffic information
- Installation of irregular traffic sign and absence of traffic safety facility standard, etc.

Restraints of Sight Distance

Lots of Heavy Vehicles

Dark / Light Adaptation

Invisibility (Poor Visibility) of Line

3. DIRECTION FOR IMPROVEMENT OF ROAD SAFETY IN TUNNEL AREAS

In order to examine the comprehensive direction to enhance traffic safety in tunnel areas of expressways, the following two parts were examined.

- Examination of traffic safety countermeasures in terms of road and facility
- Examination of traffic safety countermeasures in terms of traffic

3.1 Process of the Examination of Traffic Safety Countermeasures

The major process of the examination of traffic safety countermeasures is as follows.

- First, traffic accident types and characteristics are examined based on traffic accident data in tunnel areas and facility data as input data of ArcGIS.
- Second, the traffic safety countermeasures corresponding to the causes of traffic accidents are established and the detailed accident prevention techniques are examined.
- Next, considering the various characteristics of tunnel areas, suggestions are provided to apply the proposed techniques to the field.

3.2 The Examination of Traffic Safety Countermeasures

The countermeasures to enhance traffic safety can be classified into four categories as follows.

- Improvement of visibility: enhancement of lighting, adaptational lighting at entrance and exit
- Information provision: LED lighting at tunnel entrance to show traffic situation in tunnel, traffic information provision through VMS, variable speed limit, audio guidance system
- Prevention of speeding: section speed enforcement, variable speed limit
- Guidance of safe driving: installation of LED sight guide light on left and right barriers, landscape lighting to prevent drowsiness

Figure 7 shows a concept for the implementation of traffic management to enhance the traffic flow condition and safety.

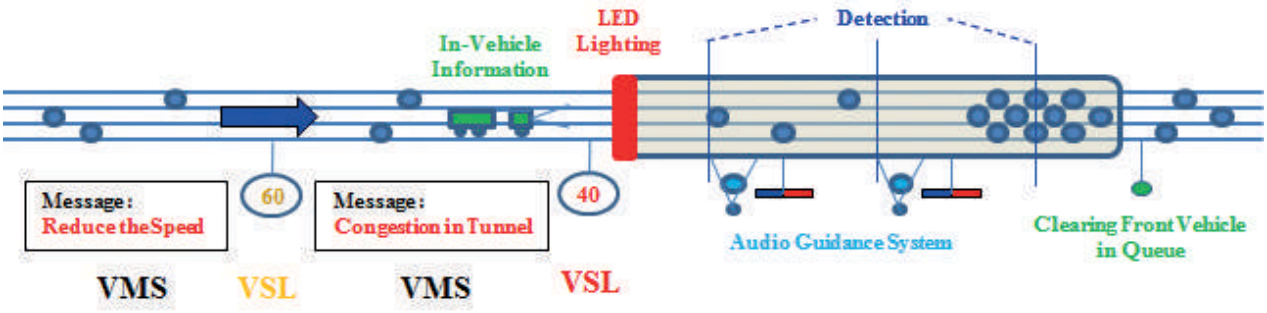


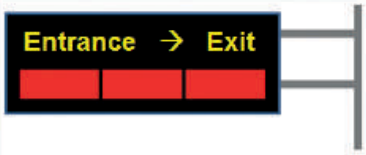
Figure 7. Conceptual diagram to enhance the traffic flow condition and safety in tunnel area

4. ESTABLISHMENT OF COMPREHENSIVE COUNTERMEASURES THROUGH PILOT STUDY

As comprehensive countermeasures for the enhancement of traffic safety in tunnel areas of expressways, four countermeasures were established for the Dunnae Tunnel and the Bongpyong Tunnel on Youngdong expressway as a pilot system and the effect of the pilot system was evaluated.

4.1 Traffic Information Provision through VMS (October, 2017)

- In order to increase the driver compliance with the VMS information, the information is provided only when traffic flow is moving slowly and congested.
- For the tunnel longer than 1km, a congested part of the tunnel is informed by the VMS.

Uncongested	Partially Congested	Fully Congested
No information	(Condition : below 60km/h)	 (Condition : below 40km/h)

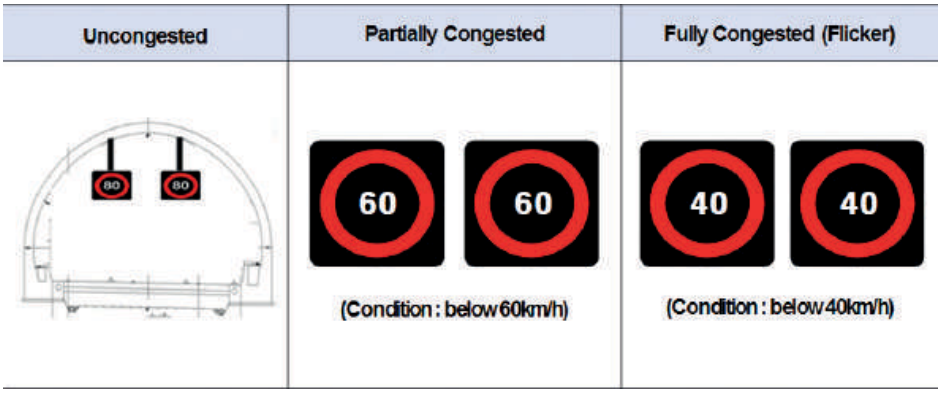
4.2 LED Lighting at Tunnel Entrance to Show Traffic Situation of the Inside of the Tunnel (July, 2017)

- LED lighting with green light and red flickering at tunnel entrance is operated to induce safe entry and to inform the traffic situation inside the tunnel

	Partially Congested	Fully Congested
Applying for tunnels longer than 1km	(Condition : below 60km/h)	(Condition : below 40km/h)

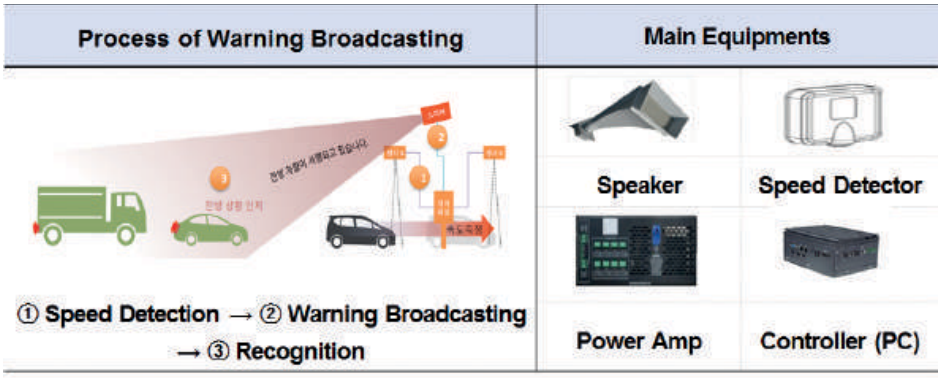
4.3 Variable Speed Limit (VSL) by using Lane Control System (LCS) (October, 2017)

- Variable Speed Limit is operated by using LCS based on the lowest average travel speed in the tunnel
- The operation of the VSL is the same as the operation of VMS and LED lighting.



4.4 Audio Guidance System (August, 2017)

- Audio Guidance System is operated based on the lowest average travel speed in the tunnel
- The operation of the Audio Guidance System is the same as the operation of VMS, LED lighting and VSL.



4.5 Evaluation of the Effect of the Pilot System

The evaluation of the effect of the pilot system was conducted based on the traffic accident data for 12 months each before and after the implementation of pilot system on both Dunnae and Bongpyong tunnels.

The evaluation shows that the total number of traffic accidents were reduced from 29 to 7 and the total number of injured were reduced from 24 to 1 in all tunnels

- For Dunnae Tunnel, the total number of traffic accidents were reduced from 13 to 2 and the total number of injured were reduced from 10 to 1
- For Bongpyong Tunnel, the total number of traffic accidents were reduced from 16 to 5 and the total number of injured were reduced from 14 to 0

This result is based on the relatively small traffic accident data during 12 months, but it is believed to be positive.

Table 3. Comparison of traffic accidents between before and after the pilot system

	Before (Sep., 2016 to Aug., 2017)	After (Sep., 2017 to Aug., 2018)
Dunnae Tunnel	13 (10)*	2 (1)*
Bongpyong Tunnel	16 (14)*	5 (0)*
Total	29 (24)*	7 (1)*

5. CONCLUSION

The study was conducted to establish comprehensive countermeasures to improve traffic safety in the tunnel areas of expressways. The major outcomes are as follows.

- Analysis of driving environment in tunnel areas and examination of improvement direction
  - Identification of problems and finding improvement directions corresponding to each problem through traffic accident data analysis, drivers survey and field surveys
- Establishment of direction of comprehensive countermeasures for the enhancement of traffic safety
- Establishment of comprehensive countermeasures through the pilot system in Dunnae and Bongpyong tunnels on Youngdong Expressway
  - The evaluation result showed that the pilot system was effective, although the evaluation was based on the limited data

In conclusion, it is required to standardize comprehensive countermeasures to enhance traffic safety in tunnel areas of expressways.

REFERENCES

1. Chang, Hsin-Li, et al. (2008) Effect of consecutive driving on accident risk: A comparison between passenger and freight train driving. Accident Analysis and Prevention 40.

2. Lee, Seungjun, et al. (2018) Development of countermeasures for improving traffic safety in tunnel areas. 2018 International Conference for Road Engineers, Jeju, Korea, May 29-31.

3. Lin, T., et al. (1994) Time of Day Models of Motor Carrier Accident Risk. Transportation Research Record Vol.-No.1467.

4. Ting, Ping-Huang, et al. (2008) Driver fatigue and highway driving: A simulator study. Physiology & Behavior 94.

KRABI BYPASS, THE FIRST MODERN HIGHWAY TUNNEL PROJECT IN THAILAND: CHALLENGE AND SOLUTION

Sukit Yindeesuk , Suphat Chummuneerat, Surachead Lekhacharakul, and Seksit Sirivaidyapong

Department of Highway, Thailand

Krabi province in Thailand is one of the significant natural conservation zone in Southern To promote the expansion of economic in Krabi and nearby provinces , Thai government launches the new bypass route development project. This highway is designed to be the bypass path of Highway No. 4 in the northern side of Krabi city area. The objective of the route is to distribute some parts of traffic demand around the city and thus help relieve the traffic congestion in the Krabi city zone in the future. The total length of the by pass route is 28.40 km composed of 4 lanes divided highways for the length of 27.15 km and the tunnel section with the length of 1.25 km. The tunnel section is considered when passing through the natural conservation zone e.g. Khao Panom Benja Natural Forest to mitigate the environmental effects. Based on the traffic forecast, the typical of the tunnel section is designed to be the triple tunnel concepts where the left and right tunnels are designed as the 2 traffic lanes tunnels to support normal and heavy trucks. The middle tunnel is specially proposed for bicycle and bike due to the highly use for tourist and citizen in Krabi Province. The tunnels are designed to be equipped with full tunnel facilities e.g. lighting system, ventilation system, fire extinguishing system, water and subdrain system, including all monitoring system for maintenance and securities.

The excavation and support of the tunnels are designed based on New Austrian Geomechanic Guideline where the key parameters of rock mass type (RMT), ground water, condition of stress state, rock formation and orientation are adopted The monitoring of tunnel behavior during construction will be also considered.

CIRCUNVALACIÓN DE KRABI, EL PRIMER PROYECTO DE TÚNEL MODERNO DE AUTOVÍA EN TAILANDIA: DESAFÍO Y SOLUCIÓN

La provincia de Krabi, en Tailandia, es una de las zonas de conservación natural significativas en el sur del país. Con el objeto de promover la expansión de la economía en Krabi y en las provincias cercanas, el gobierno tailandés lanza el proyecto de la nueva carretera de circunvalación. Esta autovía ha sido diseñada para ser la carretera de circunvalación de la Autovía Nro. 4 en la región norte de la ciudad de Krabi. El objetivo de la carretera es distribuir parte de la demanda del tránsito alrededor de la ciudad y así contribuir a aliviar la congestión de tránsito en el área de la ciudad de Krabi en el futuro. La longitud total de la carretera de circunvalación es de 28,40 km, compuestos por 4 carriles subdivididos de carretera con una longitud de 27,15 km y la sección del túnel con una longitud de 1,25 km. Se considera que la sección del túnel pase por la zona de conservación natural, esto es, el Bosque Natural Khao Panom Benja, a fin de mitigar los efectos ambientales. En base a las previsiones de tránsito, típicamente la sección del túnel ha sido diseñada bajo el concepto de túnel triple, donde los túneles de la izquierda y de la derecha comprenden los 2 túneles de carriles con capacidad de soportar tránsito normal y de camiones pesados. El túnel del centro ha sido especialmente propuesto para bicicletas y motocicletas debido al alto grado de uso de las mismas por parte de los turistas y de los ciudadanos en la Provincia de Krabi. Los túneles han sido diseñados para contar con la infraestructura completa de túneles, esto es, sistema de iluminación, sistema de ventilación, sistema de extinción de incendios, sistema de agua y drenaje del suelo, e incluye todos los sistemas de monitoreo respecto del mantenimiento y de la seguridad. La excavación y el soporte de los túneles han sido diseñados en base a la Nueva Guía de Geomecánica Austríaca en la que se han considerado los parámetros clave de tipo de macizo rocoso (RMT) (del ingles "rock mass type"), aguas subterráneas, condiciones del estado de tensión, formación de rocas y orientación. También ha sido considerado el monitoreo del comportamiento del túnel durante la construcción.

Esta ponencia presenta el concepto del primer túnel de autovía moderna en Tailandia en el que se incluye el desafío y la solución.

KRABI BYPASS, LE PREMIER PROJET DE TUNNEL AUTOROUTIER MODERNE EN THAÏLANDE : DÉFI ET SOLUTION

La province de Krabi en Thaïlande est l'une des zones de conservation naturelle les plus importantes de la zone sud. Afin de promouvoir l'expansion économique du Krabi et des provinces voisines, le gouvernement thaïlandais lance le projet de développement d'une nouvelle voie de contournement. Cette autoroute est conçue pour servir de voie de contournement de l'autoroute No.4 dans la partie nord de la ville de Krabi. L'objectif de cette route est de répartir une partie de la demande en trafic dans la ville et de contribuer ainsi à décongestionner la zone urbaine de Krabi dans le futur. La longueur totale de la voie de contournement est de 28,40 km formée par une autoroute à quatre voies de 27,15 km et un tunnel de 1,25 km. La section formée par le tunnel est prise en considération lorsqu'elle traverse une aire de conservation naturelle notamment la forêt naturelle de Khao Panom Benja, afin d'atténuer les impacts environnementaux. A partir des prévisions de trafic, la caractéristique de la section formée par le tunnel demeure dans son concept de tunnel triple selon lequel le tunnel de gauche aussi bien que celui de droite seront à deux voies dans le but d'accommoder les camions et les poids lourds. Le tunnel central est spécialement dédié aux bicyclettes et motos en raison de leur utilisation intensive par les touristes et les habitants de la province de Krabi. Les tunnels sont conçus pour être équipés de toutes les installations comme un système d'éclairage, un système de ventilation, un système d'extinction d'incendie, un système hydraulique, un système de drainage souterrain ainsi qu'un système de surveillance et de sécurité. L'excavation ainsi que le support des tunnels sont conçus en se basant sur la Nouvelle Directive Autrichienne sur la Géomécanique dans laquelle les paramètres clés du type de masse rocheuse (RMT), de l'eau souterraine, de l'état de contrainte, de la formation et de l'orientation des roches sont adoptés. La surveillance du comportement des tunnels pendant la construction sera également prise en compte.

Ce document présente le concept du premier tunnel autoroutier moderne en Thaïlande incluant les défis et les solutions.

SUMMARY

This paper presents overall project objective and components of Krabi by pass and the highway tunnel which is recognized as the first modern highway tunnel in Thailand. The project has been developed from the feasibility study phase to detailed design phase. The environmental impact assessment (EIA) is also included to mitigate the adversed effects to nature and human. The total length of the by pass route is about 28.40 km composed of 4 divided highways for the length of 27.15 km and tunnel section with the length of 1.25 km approximately. Due to the special characteristic of traffic demand and land use, the tunnels are proposed to be the triple tunnel concepts where a small tunnel is placed in the middle for bike and bicycle usage. The special design is considered to prevent the conflict points between the main traffic and bike. All standard tunnel systems are equipped for safety.

To balance between the cost of the project and safety during tunnel construction, the sophisticated tunneling method e.g. "New Austrian Tunneling Method (NATM) is adopted with the use of Austrian Geomechanic Guideline and monitoring techniques. The detailed exploration of rock mass behaviors using modern exploration technique e.g. elastic wave is adopted. The tunnel support structure and excavation sequence are provided using the measured rock mass behaviors. The monitoring system is provided to ensure the safety and economic of the tunnelling.

To mitigate the environmental effect, the environmental impact assessment (EIA) is performed to cover multi dimensions of environment aspects e.g. air, soil, surface water, underground water, natural forest, villages nearby the project. In terms of culture of Krabi, the aesthetic design of highway and tunnel is considered. The use of the local material and decorative patterns is to mimic believe and spirit of Krabi community and present to the road users and tourists as one of the attractive landmarks in Krabi Province.

After the completion of the tunnel as a key part of the Krabi by pass, the traffic congestion will be improved. The safety and comfort of the road users will be guaranteed and thus helps to support the expansion of economic and tourist in Krabi Province effectively.

1. INTRODUCTION

Krabi province in Thailand is one the significant natural conservation zone in Southern Thailand. To promote the expansion of economic in Krabi and nearby provinces, Thai government launches the new bypass route development project. The project has been developed from the feasibility study phase to detailed design phase. The environmental impact assessment (EIA) is also included to mitigate the adversed effects to nature and human. The total length of the by pass route is about 28.40 km composed of 4 divided highways for the length of 27.15 km and tunnel section with the length of 1.25 km approximately. Due to the special characteristic of traffic demand and land use, the tunnels are proposed to be the triple tunnel concepts where a small tunnel is placed in the middle for bike and bicycle usage. To balance between the cost of the project and safety during tunnel construction, the sophisticated tunneling method e.g. "New Austrian Tunneling Method (NATM) is adopted with the use of Austrian Geomechanic Guideline and monitoring techniques.

In this paper, the project description including highway and tunnel design concept including geotechnical and environmental challenges is presented in the details.

1.1) Krabi Bypass Project Description and Plan

The project is located in Krabi Province in Southern Thailand. The alignment of Krabi Bypass is presented in Fig.1.0. The alignment of the project starts in the north side of the Krabi Province along the highway No. 4200 and the project ends at the highway No.4. The bypass route was selected to minimize the effect on environmental sensitive area e.g. natural conservation zone of Khao Panom Benja Natural Forest This thus requires

the alignment selected to be far from the forest zone; however, the acceptable distance from the city and the airport is also considered.

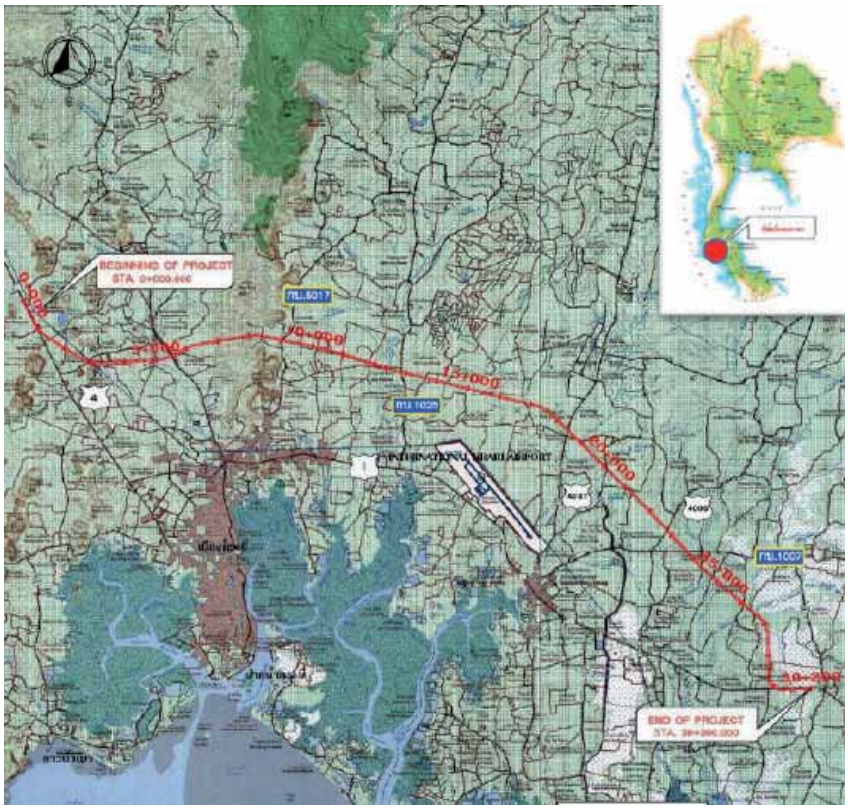


Fig.1.0 Alignment of Krabi Bypass Project

1.2) Tunnel Projects in Thailand and MR MAP

Due to the development of several infrastructure projects in Thailand in the environmental sensitive area, the use of tunnel gradually increases and be acceptable as one of the feasible construction methods. The examples of tunnel projects in Thailand are illustrated in Fig. 2.0. Several tunnel projects are designed and constructed for railway and subway. Some are for powerwaterway and drainage facilities. Only few highway tunnel projects are initiated and developed for detailed design due to the limited experience of tunnel design and construction for highway purposes. The construction methods of tunnels in Thailand are NATM for rock tunnelling, Shield or TBM for soft soil tunnelling, Cut and Cover Method for shallow underpass project, and immerged tunnelling.

Due to the high project cost and land use for highway and motorway project, the new concept of mixed mode transportation projects so called MR MAP (Motorways + Rails) is introduced in the policy of Thai government. The government proposed to adopt the sharing right of way (ROW) between highway and railway for the transportation projects including tunnel facilities. Fig.3.0 illustrates the alignment of MR MAP in Thailand which are designed to support the transportation from the north side to the south side of Thailand. The East-West alignments of MR MAP are also available.The total length of 5,000 km long of MR MAP is proposed and thus will effectively promote the mixed modes of transportation in the future. The example of typical section of MR MAP is illustrated in Fig. 4.0.

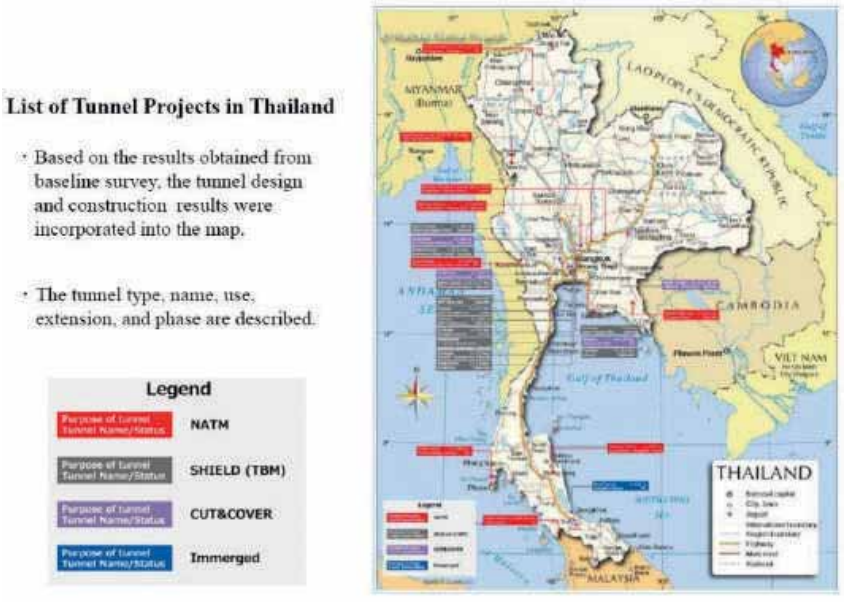


Fig.2.0 List of Tunnel Projects in Thailand

Fig.3.0 Overall of MR MAP (Motorways and Rails) Projects in Thailand

Fig.4.0 Cross Section of MR MAP (Motorways and Rails) Projects in Thailand

1.3) Tunnel Location in Krabi Bypass Project

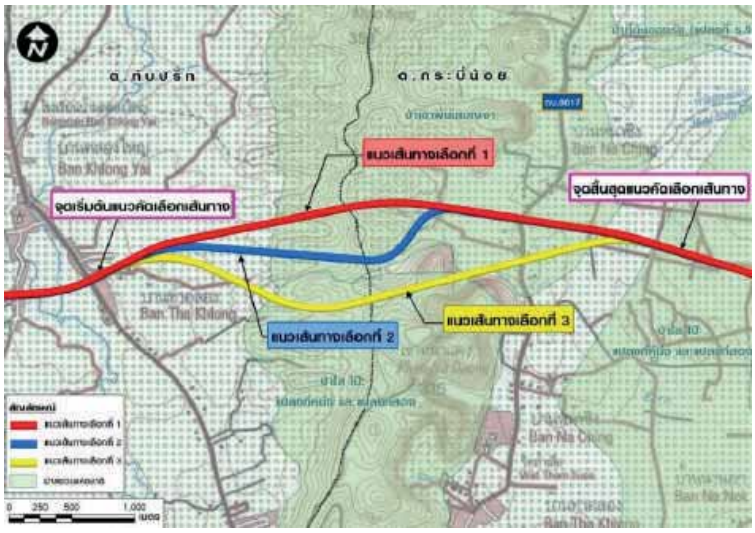


Fig.5.0 Route Selection of Krabi Bypass for Tunnel Length

To determine the location of Tunnel in Krabi bypass project, the alignment of the bypass is firstly selected from the three different alignments e.g. read, blue, and yellow alignment in Fig. 5.0. By considering the engineering, economical, and environmental aspects of the three different routes, the red alignment of the bypass is selected. The alignment is selected to minimize the adverse effect to the forest and nearby villages. Based on the topographic along the selected route, the location and length of the tunnel is illustrated in Fig.6.0.

The tunnel is designed to be located between Sta.6+400 to Sta.7+750 which is approximately 1.300 kM long. The elevation of the tunnel is selected to reduce the number and span length of the highway bridges at the portal of the tunnel. At this elevation, the construction process of the tunnel including the transportation of excavated soil is practically controllable.

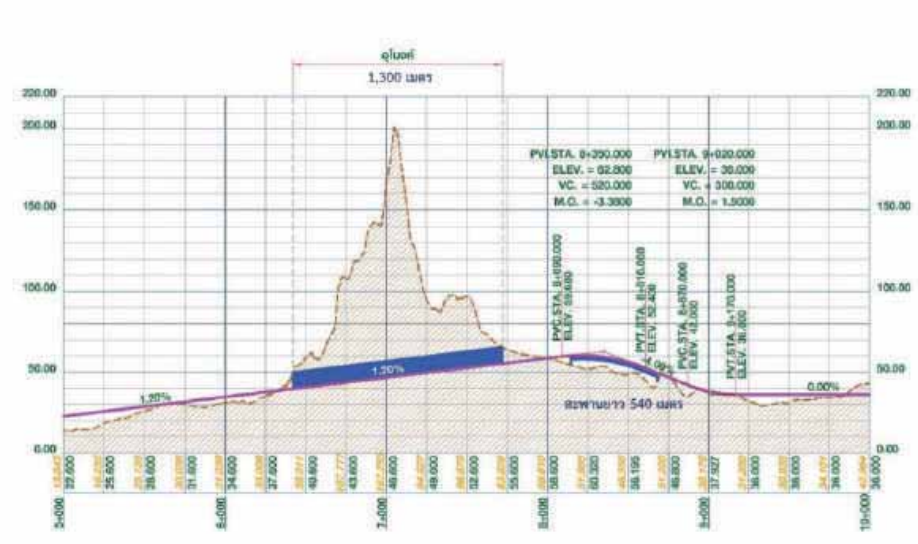


Fig.6.0 Tunnel Location of Krabi Bypass

2. HIGHWAY AND TUNNEL DESIGN CONCEPT

2.1) Traffic Analysis of Krabi Bypass

Fig.7.0 Landuse and Highway Network around Krabi Bypass

To determine the suitable number of traffic lanes of the bypass and tunnel, the traffic analysis and simulation are performed in this project. The land use and traffic demand from the nearby projects as illustrated in Fig. 7.0 are considered in the simulation e.g. the effect of Krabi International Airport, traffics on Highway No.4 and surrounding network, etc. The traffic simulation is performed almost 20 years after the 1st year of operation. Fig. 8.0

Traffic Simulation of surrounding highway network confirms the insufficient capacity of the network in the 10th year after the 1st year of operation without the Krabi bypass project as illustrated in Fig.8.0. The level of service (LOS) is improved when the Krabi bypass is constructed and opened for operation as illustrated in Fig. 9.0.

Fig.8.0 Level of Service (LOS) of Network around Krabi Bypass

Fig.9.0 Level of Service (LOS) of Krabi Bypass

2.2) Typical Highway and Tunnel Cross Section

In this section, typical highway and tunnel cross section are presented. Regarding to the alignment of Krabi bypass in Fig.10.0, the bypass is designed pass through several zones e.g. forest area, mountain area, villages, airport, including existing highway network. This results in the total length of 30.2 kM of the bypass. The bypass is designed to be 4 traffic lanes with divided highway embankment for the main road. The frontage road is designed along side of the main road in the area of high population to support the local traffic and ensure the safety of the driver on the main road as illustrated in Fig. 11.0.

Fig.10.0 Overall Alignment of Krabi Bypass

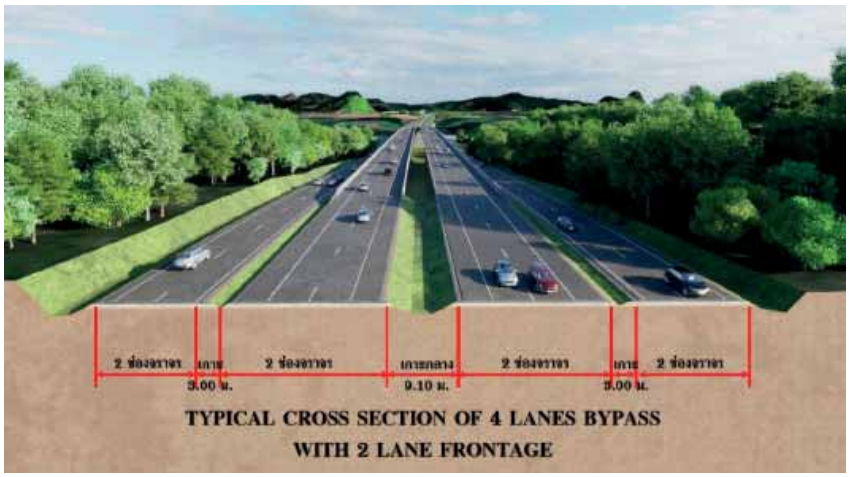


Fig.11.0 Typical Cross Section of Krabi Bypass

Based on the traffic simulation, the volume of bike is high and the need to design a special bike tunnel is required in this project. The proposed tunnel system consists of triple tubes. the location and typical cross section of the triple tubes is illustrated in Fig. 12.0. Each highway tube is designed to support two traffic lanes (2x3.5m) with 1.50 outer shoulder and 0.50 inner shoulder in each direction. The vertical clearance of 5.50 m in height is adopted for the oversize vehicles. The 1.20m width walkway is designed in all tunnels including the cross passages designed to connect all tunnels are at not greater than 300 m spacing and this is stricker than the 500 m maximum distance provided in the European Guideline EC54/2007. In case of emergency, the emergency lane is provided to allow quick access of emergency services in case of accidents in the tunnel. This requires that the use of emergency lane is restricted to maintenance and emergency services and broken down vehicles only. The For the bike tunnel, the bike traffic volumes result in the two traffic lanes bike tunnel with the vertical clearance of 2.50 meter height. This clearance is to ensure the emergency team is able to operate in the bike tunnel.

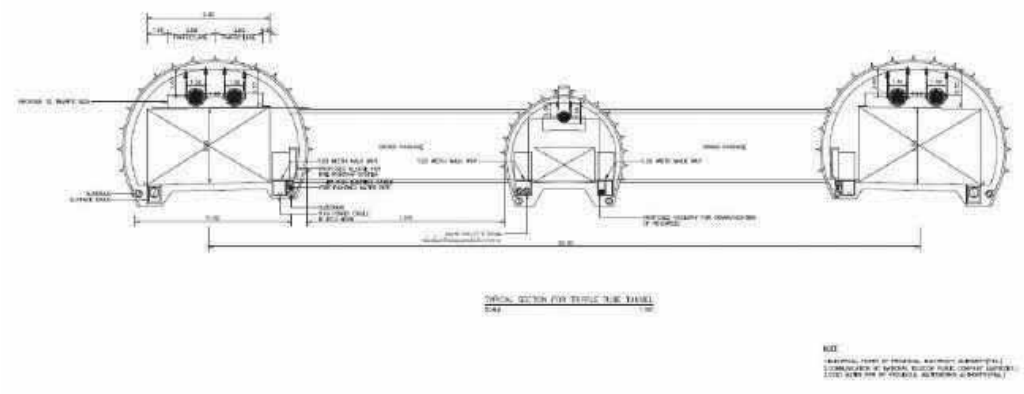


Fig.12.0 Typical Cross Section of Tunnel

The triple tube solution is chosen to ensure overall safety in all traffic types including bikes. By comparing to any single tube solution, the advantages of this solution are as follows:

1) Unidirectional traffic reduces the risk of traffic accidents
2) Unidirectional traffic is preferable for the operation of the ventilation system due to the drag and piston effects support the jet fans in maintaining the proper air speed.
3) The middle tube is served as escape route as well as access route for emergency services.
4) In case of damage in one tube e.g. from the accidents or other main-induced incidents e.g. sabotage, the remaining tubes are fully operated at least for unidirectional traffic which can be controllable at the portal area.

To ensure no conflict points at the tunnel entrance and exit, the alignment of bike lane is proposed to pass under the highway where the small intersection is designed to separate the two traffic direction of bike from the middle tunnel as illustrated in Fig. 13.0.

In addition to the traffic consideration, the shape of the tunnel is designed to resist the pressure exerted by the ground around the tunnel excavation due to the complicated nature of multi state of stress from the earth pressure. The design is performed based on the site conditions and the functional requirements as the structural cross section of the tunnel.

Fig.13.0 Arrangement of Highway and Bike Tunnel Entrance

3. GEOTECHNICAL AND ENVIRONMENT CONDITION IN KRABI AREA

3.1) Geotechnical Features in Thailand

In this section, the geotechnical features in Thailand are briefly presented and illustrated in Fig. 14.0. The northern part consists of series of mountain laid in the north-south direction. Generally, rock group are granite, metamorphic, sedimentary, and some volcanic rock. In the north-eastern part is a plateau consisting of sedimentary rock, sandstone, shale, and mudstone. The central part of Thailand composes of sediment from the upper level deposit due to the flood from the north side. This results in the area near Chao Phraya river composed of small particle which are silt and clay deposit.

Fig.14.0 Geotechnical Features in Thailand

Regarding to the geological features, the design of highway and tunnel in Thailand shall consider the risk of landslide, earthquake, and some special conditions e.g. underground water and flood etc. Fig.15.0 and 16.0 illustrated the landslide and earthquake risk in Thailand.

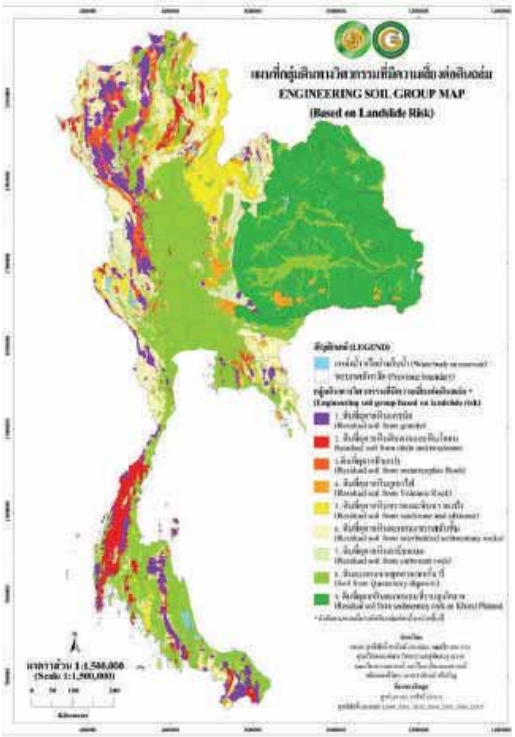


Fig.15.0 Land Slide Hazard Map (Credited: Kasetsart University, Thailand)

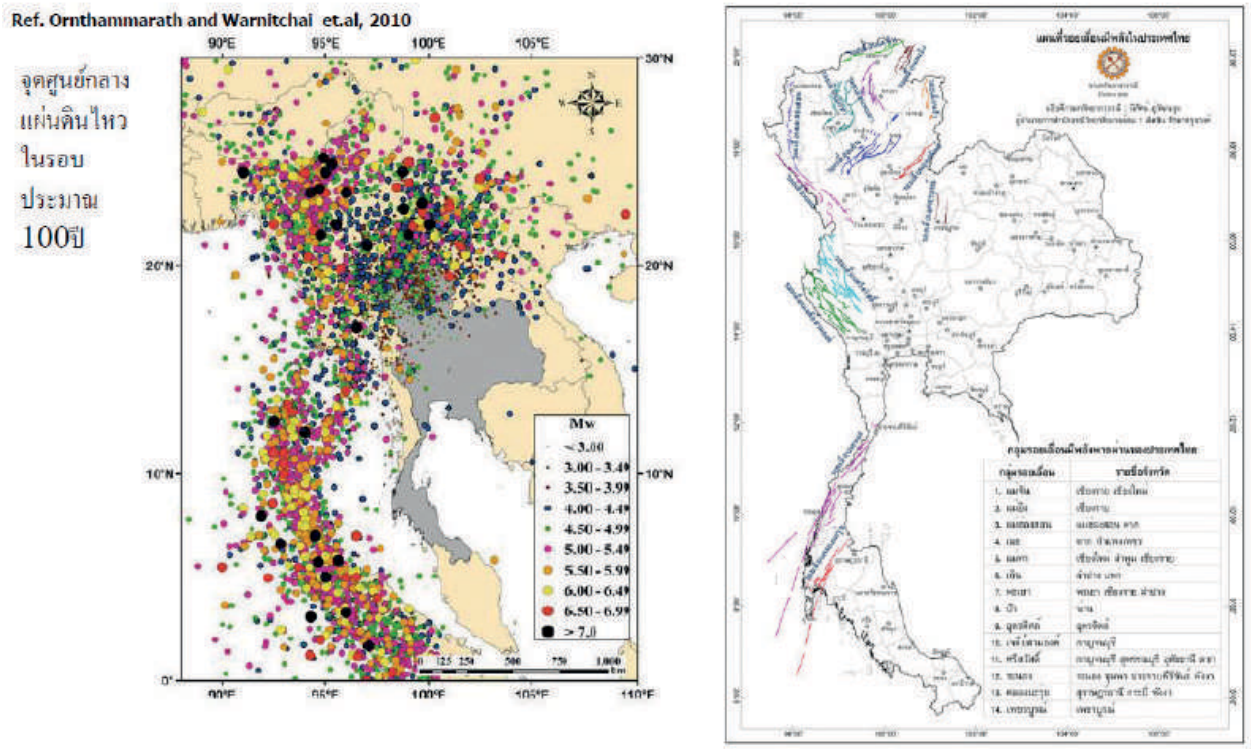


Fig.16.0 Earthquake Hazard Map in Thailand

3.2) Geological Investigation Process and Method

The geological investigation process and method are described in this section. Due to the complicated geological condition in Krabi, the geological data are very important and thus the requirement of very detailed geological investigation in the project is launched as follow.

The first step of the investigation is the selection of project routes. In the project, 3 selected routes of Krabi bypass are considered as previously described. Only the one route that satisfies all aspects of engineering, economic, and environment is considered. The selected route is adopted for the investigation over wide range parameters e.g. topographical, geological, and hydrological data to be used in the detailed design. Those data are verified and considered if there are possible special ground condition, desirable construction condition, and possibility of shortage of underground water.

After the detailed information in the selected route is considered. In the next step, by considering the highway alignment and topographic data, the tunnel alignment and position of portals will be verified. This will be required the more detailed investigation of topography and geology around the tunnel and portal location; for examples, the use of elastic wave velocity distribution technique, the exploration of hydrology and groundwater condition, the use of electric resistivity to detect the fracture zone and hydrothermal alteration zone, etc.

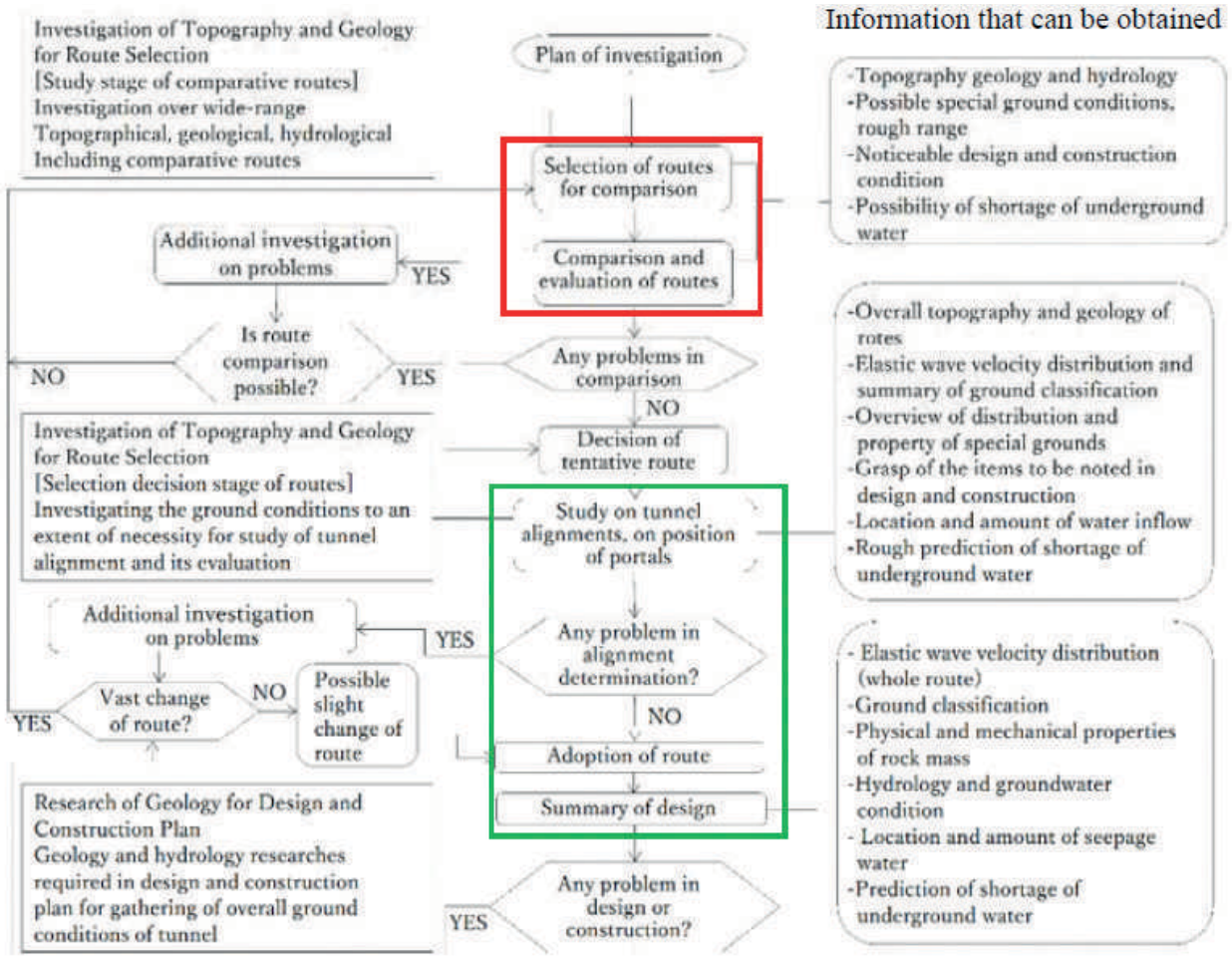


Fig.17.0 Geological Investigation Process and Method in Thailand

3.3) Geological Survey in Krabi Bypass Project

The geological survey is performed in Krabi bypass project by several methods e.g. visual inspection, rock coring, elastic wave, etc. Based on the survey, the geological condition nearby the tunnel is sedimentary rock. The rock in the project is classified into 6 types based on the crack pattern, rock hardness, degree of weathering, chemical component etc. as illustrated in Fig.18.0 and the location of survey is illustrated in Fig.19.0. The in depth investigation of geological characteristic is also performed using 2D resistivity imaging exploration as illustrated in Fig. 20.0. The exploration is confirmed the rock type as sandstone and siltstone around the top later. In some section, the highly weathered or soft rock including groundwater is found in the depth of 100 meters from the ground surface.

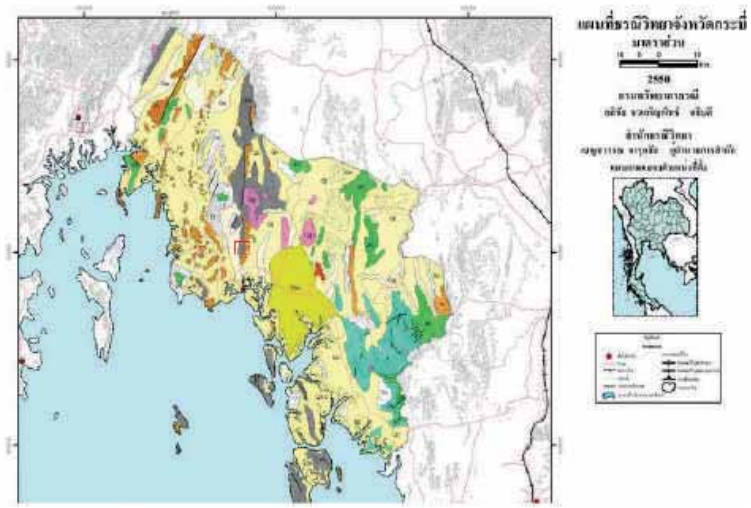


Fig.18.0 Geological Condition in Krabi Bypass Project

Fig.19.0 Geological Condition Along the Tunnel in Krabi Bypass Project

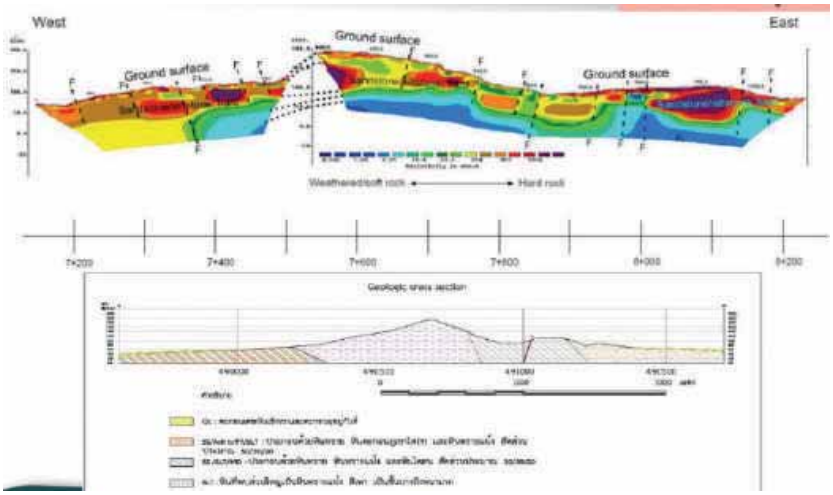


Fig.20.0 Example of Elastic Wave Investigation in the project.

From field exploration, there are faults in the project area at the north and south sides of the tunnel portal in the east as illustrated in Fig. 21.0.

Fig.21.0 Example of Earthquake Fault Nearby the Tunnel Location

3.4) Environment Condition and Treatment

In this project, to mitigate the environmental effect during construction and excavation of the tunnel, the environmental impact assessment (EIA) is performed in this project. The assessment covers most of the environment aspects e.g. air pollution, soil, vibration, water quality, historical places, wildlife, conservative Forrest etc. The examples of historical place survey are illustrated in Fig. 22.0. In the project, 3 historical places are recorded; for examples, Ancient Ship for Canal Construction (230 meters from the tunnel), NNa-Ching Sea Port, and Tum Rien Cave, etc. To reduce the effect of tunnel construction to those historical places, the assessment of the vibration level during excavation process of the tunnel is performed by estimating the peak particle velocity (PPV). The range of predicted PPV is about 0.0032 -0.13 mm/s which is far below the permissible level as illustrated in Fig.23.0 and 24.0. To ensure no effects to the historical places during the construction, the special treatment and scheme to protect those historical places will be also performed during the construction of the tunnel.

Fig.22.0 Example of Historical Place Survey in The Project.

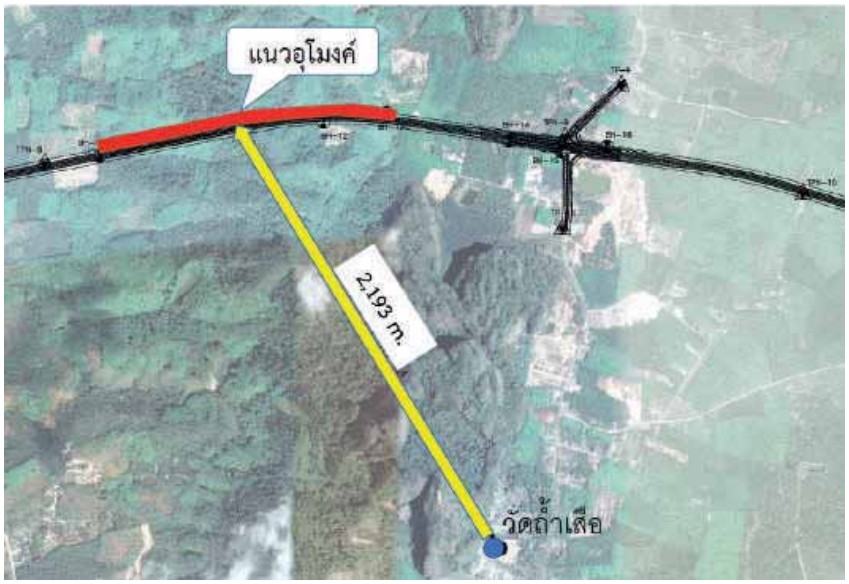


Fig.23.0 Example of Vibration Effect to the Historical Place Investigation.

Building Class	Continuous Source PPV (in/sec)	Single-Event Source PPV (in/sec)
Class I: buildings in steel or reinforced concrete, such as factories, retaining walls, bridges, steel towers, open channels, underground chambers and tunnels with and without concrete alignment.	0.5	1.2
Class II: building with foundation walls and floors in concrete, walls in concrete or masonry, stone masonry retaining walls, underground chambers and tunnels with masonry alignments, conduits in loose material.	0.3	0.7
Class III: buildings as mentioned above but with wooden ceilings and walls in masonry	0.2	0.5

Fig.24.0 The permissible PPV Vibration Effect to the Historical Place

4. TUNNEL COMPONENTS AND SYSTEM

Due to the 1.30kM long tunnel, the tunnel system is considered to ensure the good operation and safety to the driver. The tunnel system is provided; for examples, ventilation system, CCTV system, Fire Extinguisher System, Fire Detector and Alarm, Emergency Power System, Exist Sign, Drainage System, Lighting System, VMS and Lane Use Sign, Communication System, SCADA System, etc. The example of Ventilation System and Lighting System of the tunnel are provided in this section.

4.1) Ventilation System Design Concept

Ventilation System for the tunnel is designed for 2 situations: 1) Normal Service Situation and 2) Emergency Situation. For the Normal Service Situation, the design scheme is to ensure the volume of toxic gas not greater than the permissible values; For example, CO shall be less than 70 ppm in case of In free flowing traffic and less than 100 ppm in case of congested traffic. The temperature in the tunnel is also controlled to not higher than 40 degree Celsius .

For the emergency situation e.g. in case of fire, Jet Fan System (JF) is designed for the two way traffic condition where the operation of jet fan is controllable to minimize the effect of smoke during Fire. In addition, the ventilation system is designed to ensure that the air flow velocity is greater than the critical velocity to prevent the case of back-layering of smoke for the escape route. The number and spacing of JF is designed regarding to NFPA 502 using engineering analysis considering tunnel length, cross section, grade, prevailing wind, traffic direction, type of cargoes, design, fire size, etc.

The example of ventilation system of the tunnel is illustrated in Fig. 25.0

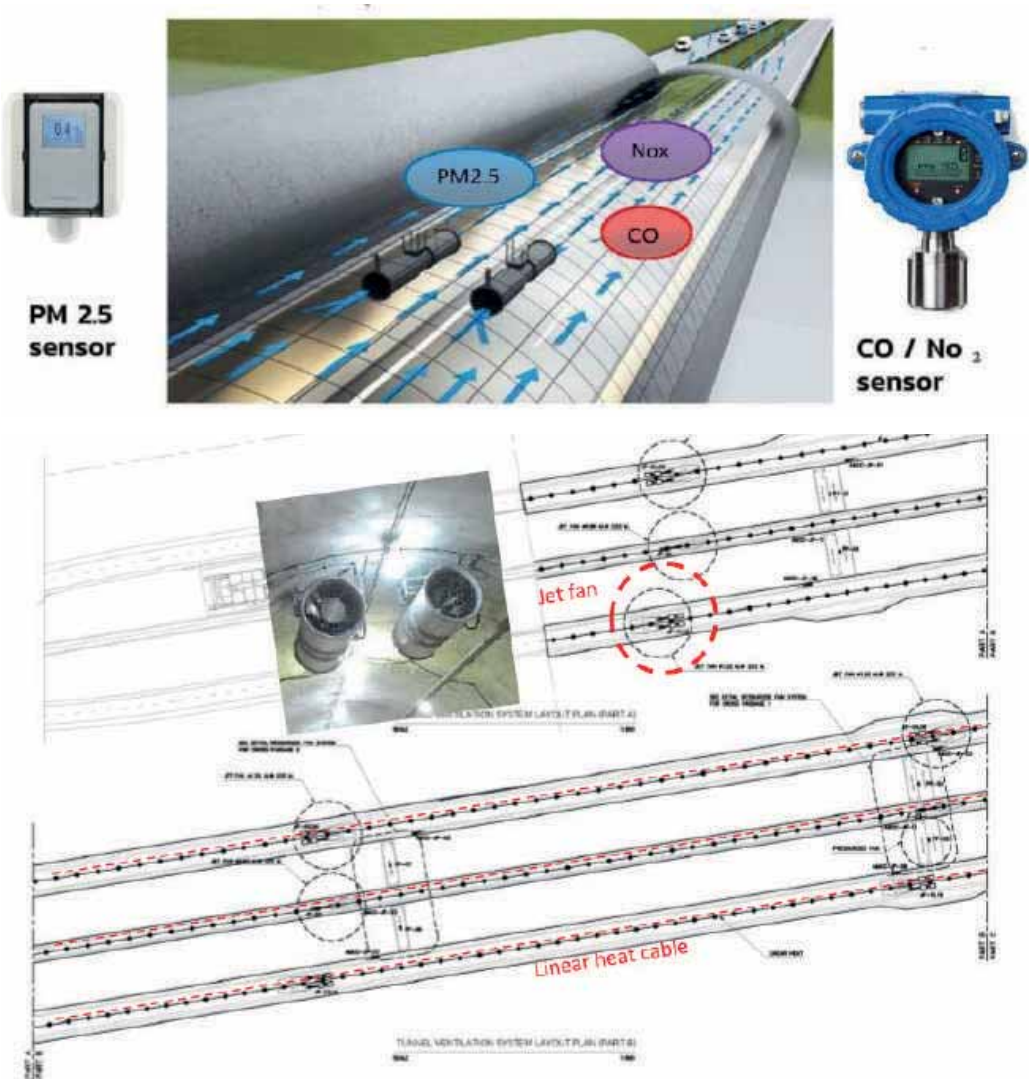


Fig.25.0 The Ventilation System of Krabi Bypass Tunnel

4.2) Lighting System for Tunnel

The lighting system for Krabi Bypass tunnel is designed to ensure the following objectives: 1) the safety of traffic at entrance, in tunnel, and at the exit. 2) the performance of the through-flow of the traffic. This thus requires the sufficient illumination of the tunnel lighting system. The requirement is designed for the day time use when the contrast between outside and inside is significant and for the night time use although it is less, but reversed. Fig. 26 illustrated the illumination of 5 key areas e.g. 1) Access Zone,2) Threshold zone, 3) Transi-

tion Zone, 4) Interior Zone, and 5) Exit Zone. The lighting design for the tunnel also considers the visual adjustment from the high luminance to low luminance to prevent the cause of disability phenomena of the drivers.

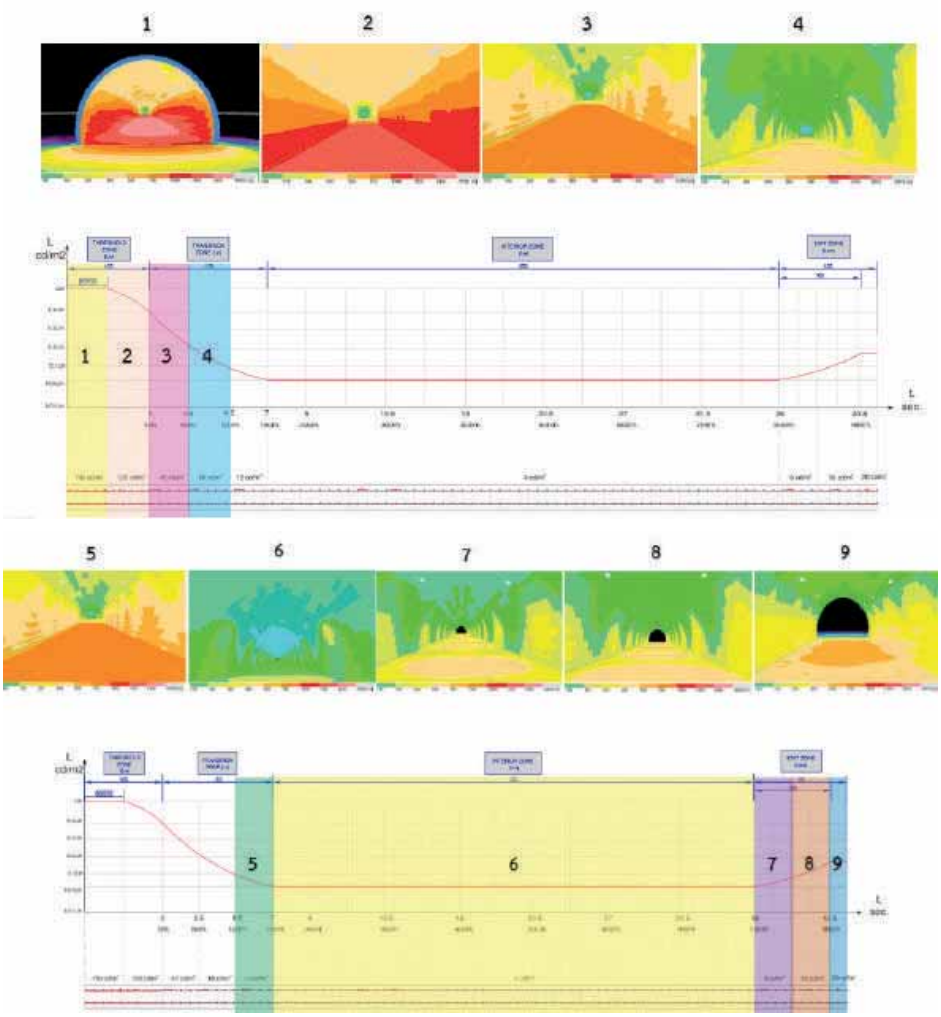


Fig.26.0 The Lighting Design of Krabi Bypass Tunnel

5. TUNNEL CONSTRUCTION AND EXCAVATION METHODS

5.1) Application of NATM in the projects

In the project, the concept of New Austrain Tunnelling Method (NATM) or Sequential excavation method is adopted to balance between the cost of the construction and the safety during the excavation and tunnel construction. The design considers the geotechnical data e.g. boring log and rock mass behaviors under load and monitoring the performance of tunnel during construction to determine the minimum of the supports of the tunnel structure for safety and minimization of waste. The primary supports for the Krabi bypass tunnel are; for examples, shortcrete, rock bolt, steel rib. The spayed concrete and the support will suppress the loosening of the ground immediately after drilling. The measurement and monitoring system is designed for the project to monitor the potential deformation during the excavation. Fig.27.0 illustrates the example of mountain tunnel structure adopted in the project.

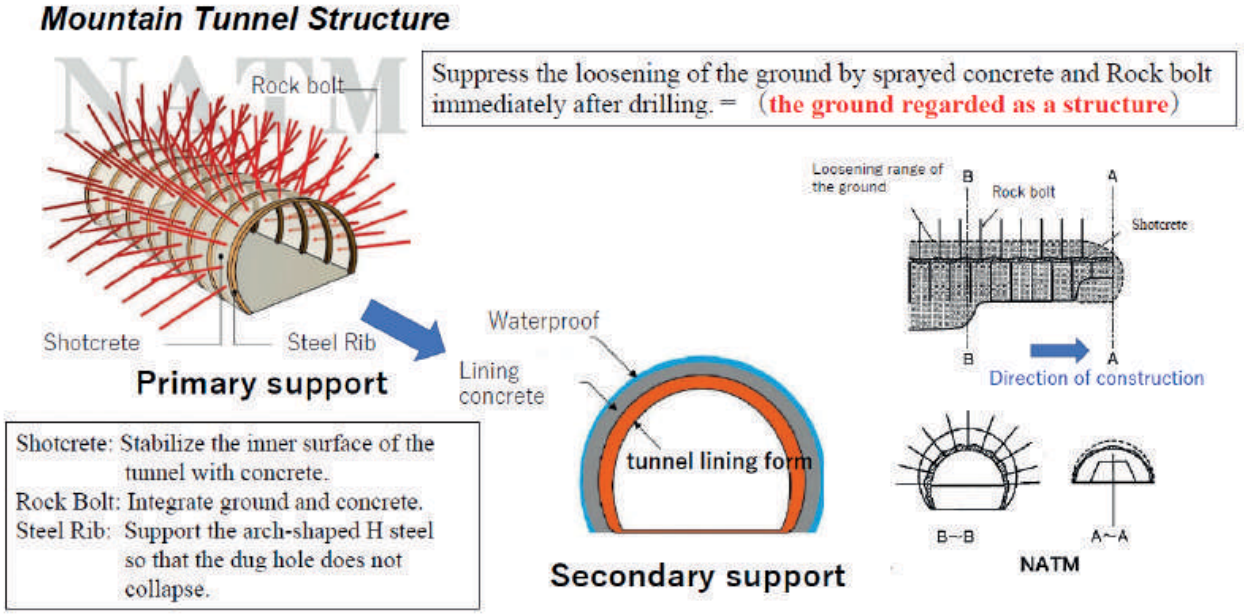


Fig.27.0 The Mountain Tunnel Structure

5.2) Excavation Sequence

Regarding to the rock type, hardness, discontinuity, and joint, the excavation sequence of Krabi-Bypass tunnel is proposed as follow: the excavation of the tunnel face is performed by a boomer excavator. The machine is used for drilling holes. The explosives are then placed into the drilling holes and connected to detonators for blasting. The mocking process is proposed to remove the dust and hazardous gases through a proper ventilation. All debris shall be removed from the tunnel face.

After the unsupported ground remains stable for a period, the primary support as designed will be installed e.g. shortcrete, rock bolts. To prevent the failure of structure due to water ingress, waterproofing membrane is adopted after the installation of primary support. The secondary support for enhance structural stability can then be provided in term of steel rib or lattice girders. Finally, the precast segments of concrete are installed as lining on the periphery of the tunnel area. The example of excavation sequence is illustrated in Fig. 28.0

Fig.28.0 The Proposed Excavation Sequence

6. AESTHETIC OF KRABI BY PASS TUNNEL

In this project, the aesthetic of highway infrastructures including the tunnel portal and inside tunnel is considered specially to suit the local culture of Krabi province. Fig. 29.0 illustrates the example of aesthetic design for the portal tunnel as a canopy at the entrance and exit of the tunnel. The concept design is considered the wood of the local tree in Krabi including the pattern of decorative canopy wall to shade the spirit of villages in Krabi Province.

Fig.29.0 The Aesthetic Design of Portal Canopy

7. ACKNOWLEDGEMENT

This paper is based on the information of the detailed design of Krabi Bypass project which is driven and supported by the bureau of location and design, department of highways (DOH), Thailand. The recommendation and encourage from the Chief Engineer of Location and Design, Mr. Sittichai Boonsaat, The Chieft Engineer of Research and Development, Dr. Attasit Sawatparnich and the director of Bureau of Location and Design, Mr. Somboon Thaintummachart including are very helpful.

The technical support and consultancy from JICA expert team as a part of the project for capacity development for tunnel project management is specially thankful and acknowledged.

8. REFERENCE

American Association of State Highway and Transportation Officials, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, Washington, DC, 2001.

Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974, Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mech. 6(4), 189-236.

Bienawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering, Wiley, New York, 251p.

Department of Highways, 2022. The Draft Project Report of Detailed Design of Krabi Bypass in Thailand (In Thai)

Guidelines for geotechnical design of underground structures with conventional excavation, Austrain Society for Geomechanics, 2009

Road Safety in Tunnels, Word Road Association (PIARC), Report 05.04. B, 1995.

Vavrovky G.M., 1995. NATM: Geomechanical Principles explained, Tunnels & Tunnelling, October 1995, 27, 31-34

GESTIÓN Y COORDINACIÓN DE CENTROS DE CONTROL DE TÚNELES URBANOS: TÚNELES DE BARCELONA Y DEL PRINCIPADO DE ANDORRA

Ladislao Torija Tamayo
Director de Explotación del "Centre Nacional del Trànsit" (CENATRA)

Los túneles urbanos con alto nivel de tráfico requieren de especial vigilancia y buena coordinación con todos los actores que intervienen en la seguridad y gestión del tráfico de la ciudad. Este objetivo puede complicarse en función del nivel de integración o separación que exista con otros servicios de gestión del tráfico de la misma ciudad, ya que los incidentes de un servicio tienen un alto impacto en el otro.

Se exponen dos casos concretos de gestión multitúnel: la gestión del Centro de Control de Túneles de la ciudad de Barcelona, desde donde se gestionan los 35 túneles que forman parte de las Rondas y túneles urbanos, con IMD que superan los 150.000 vehículos/día. Por otra parte, el "Centre Nacional del Trànsit" del Principado de Andorra, donde se integra la gestión de todos los túneles urbanos, interurbanos y el tráfico del país.

El objetivo es mostrar estos dos modelos de coordinación y gestión integrada, sus particularidades y puntos comunes, destacando las lecciones aprendidas.

MANAGEMENT AND COORDINATION OF URBAN TUNNEL CONTROL CENTERS: BARCELONA AND PRINCIPALITY OF ANDORRA TUNNELS

Urban tunnels with a high level of traffic require special vigilance and good coordination with all the actors involved in the safety and management of city traffic. This goal can be complicated depending on the level of integration or separation that exists with other traffic management services in the same city, since incidents on one service have a high impact on the other.

Two specific cases of multitunnel management are presented: the management of the Tunnel Control Center of Barcelona, from where 35 tunnels are managed, with more than 150.000 vehicles / day. On the other hand, the "National Traffic Center" of the Principality of Andorra, where the management of all urban and interurban tunnels and traffic of the whole country is integrated.

The objective is to show these two models of coordination and integrated management, their particularities and common points, highlighting the lessons learned.

GESTION ET COORDINATION DES CENTRES DE CONTRÔLE DES TUNNELS URBAINS : TUNNELS DE BARCELONE ET DE LA PRINCIPAUTÉ D'ANDORRE

Les tunnels urbains à forte circulation nécessitent une vigilance particulière et une bonne coordination avec tous les acteurs impliqués dans la sécurité et la gestion du circulation urbaine. Cet objectif peut être compliqué selon le niveau d'intégration ou de séparation qui existe avec d'autres services de gestion du circulation dans la même ville, puisque les incidents d'un service ont un impact élevé sur l'autre.

Deux cas spécifiques de gestion multi-tunnels sont présentés : la gestion du Centre de Contrôle des Tunnels de la ville de Barcelone, d'où sont gérés les 35 tunnels qui font partie des "Rondes" et des tunnels urbains, avec un IMD supérieur à 150 000 véhicules/ journée. D'autre part, le "Centre Nacional del Trànsit" de la Principauté d'Andorre, où est intégrée la gestion de tous les tunnels et circulation urbaine et interurbaine du pays.

L'objectif est de presenterces deux modèles de coordination et de gestion intégrée, leurs particularités et leurs points communs, en mettant en évidence les enseignements acquis.

1. CARACTERÍSTICAS GENÉRICAS DE LOS TÚNELES URBANOS DE ELEVADO TRÁFICO

Por sus características, los túneles urbanos presentan una serie de retos añadidos a los que podemos encontrar en la gestión de túneles interurbanos. Principalmente, relacionado con retenciones durante la mayor parte del día, elevado porcentaje de autobuses, alto impacto a la movilidad en caso de cierre y elevado número de incidentes, especialmente accidentes leves y vehículos averiados y parados. A esto, se le suma el trazado del propio túnel, que puede presentar pendientes elevadas para sortear otras construcciones subterráneas de la ciudad, además de ramales de salida e incorporación dentro del propio túnel y curvas en su recorrido.

Los equipos de explotación que trabajan gestionando estos túneles generalmente lo hacen en centros de control desde donde se gestionan un gran conjunto de estas infraestructuras, permitiendo así actuaciones mejor coordinadas y mayor optimización de recursos. Estos centros de control multitúnel tienen como características:

- Gestión de diversos túneles desde un mismo centro de control.
- Mayor coherencia en las actuaciones teniendo en cuenta la afectación directa de lo que acontece en un túnel respecto al resto.
- Uso de protocolos homogéneos
- Optimización de recursos
- Idealmente, alto grado de integración y uso del mínimo número de aplicaciones diferentes.

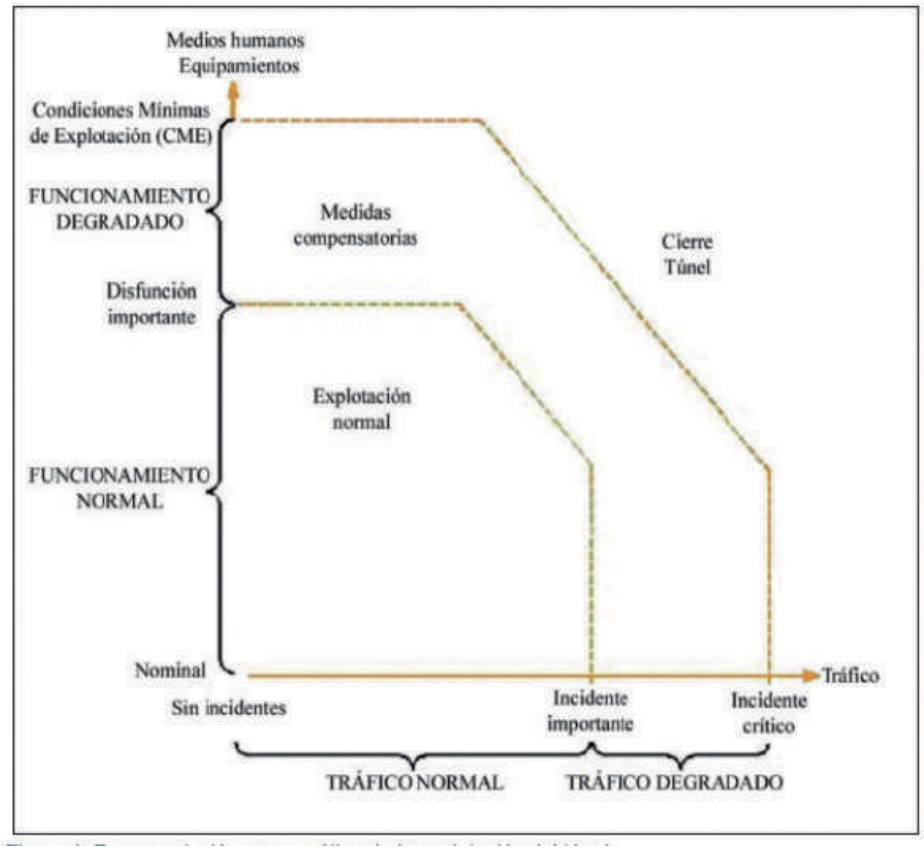
Esto permite que las actuaciones sean más efectivas y coordinadas, pero tienen como hándicap que la gestión sea más compleja, requiriendo así de operadores con mayores habilidades dado que es altamente probable la necesidad de atender varias incidencias simultáneas.

Al tratarse de túneles urbanos con elevado tráfico, cualquier incidente se magnifica provocando serias afectaciones a la fluidez del tráfico en el resto de túneles cercanos a su zona de influencia, y en general, al tráfico de una zona muy importante de la ciudad, dado que por lo general representan arterias principales.

Tomando el gráfico de la representación esquemática de la explotación de túneles aparecida en el documento de PIARC "Guía para la organización, contratación y formación del personal de explotación de túneles de carretera, 2007R04ES", la explotación de túneles urbanos con elevado tráfico se situaría continuamente en la franja que separa la explotación en modo ordinario y el modo degradado prácticamente el 60% del día. Continuamente han de activarse los procedimientos previstos en el Plan de Autoprotección para señalizar los incidentes más habituales (vehículos averiados obstruyendo al menos un carril, accidentes leves, niveles elevados de contaminación…). Por otra parte, es más probable llegar a modos de funcionamiento degradado por disfunciones de los sistemas de la instalación, dado que la exigencia en el funcionamiento de dispositivos es mayor para mantener los niveles de seguridad con tráfico tan elevado, garantizando las condiciones mínimas de explotación.

Como expondremos en los casos analizados, el contar con interacción directa con el centro de control y gestión de tráfico de la ciudad es vital para garantizar la coordinación y la correcta actuación de todos los actores implicados. Este hecho ha de ir acompañado de grandes esfuerzos de la administración por garantizar los protocolos de actuación que rigen esta coordinación, en caso que se trate de servicios separados.

Se van a analizar dos centros de control multitúnel que cuentan con alta intensidad de tráfico, cada uno en su propia escala. Se trata de los túneles de la ciudad de Barcelona, gestionados desde el Centro de Control de Túneles del Centro de Servicios Municipales, y de los túneles del Principado de Andorra, que se gestionan desde el Centro Nacional de Tráfico (CENATRA)



Zona de trabajo habitual de túneles urbanos de elevado tráfico (en naranja) .
Fuente de gráfico base: PIARC, 2007R04ES

2. TÚNELES DE BARCELONA

Se trata de los túneles cuya titularidad pertenece al Ayuntamiento de Barcelona. El Servicio de Operadores de Túneles (SOT) gestiona actualmente directamente 14 de los 35 túneles de la ciudad de Barcelona desde el Centro de Control de Túneles, ubicado en el Centro de Servicios Municipales (CSM). Se trata de los túneles que cuentan con telegestión. El resto de túneles son gestionados por los servicios de tráfico de la ciudad.

Centro de Control de Túneles, en el Centro de Servicios Municipales del Ayuntamiento de Barcelona.

Túneles de Barcelona. Fuente: Ayuntamiento de Barcelona

El CSM integra el Centro de Control de túneles, el Centro de Operaciones de ciudad, Centro de Gestión de Movilidad de Rondas y Centro de Gestión de Movilidad Urbana. Esto permite tener centralizados todos los servicios que han de coordinarse en la gestión e información ordinaria de la movilidad de la ciudad. En caso de incidencias, los recursos externos (Guardia Urbana, Bomberos, Emergencias Médicas) se activan a través del 112 y llamadas a la Sala Conjunta de Comando (SCC), que integra los citados recursos externos.

Esta integración de servicios permite una alta eficacia a la hora de actuar ante emergencias, gestionar adecuadamente el tráfico y comunicar al ciudadano.

Características de los túneles

Los túneles de clasifican en dos grandes grupos: los que están ubicados a la circunvalación de la B-10 (Ronda Litoral) y la B-20 (ronda de Dalt), y los que corresponden a otras vías subterráneas del interior de la ciudad. En total, se trata de 35 túneles (62 tubos), que equivalen a 18,2 Km de túneles (30,2 Km de tubos). Si bien la mayoría de túneles son inferiores a 500 m de longitud, encontramos los túneles de:

- Badal, 2.200 m
- Rovira, 1.306 m
- Glòries 950 m
- Oreneta 786 m
- Guineueta 987 m

La IMD varia en los diferentes túneles, con IMD que van de los 18.000 veh./día en el caso de ciertos túneles de ciudad, hasta los 150.000 veh. /día en los de Rondas.

Los elevados niveles de tráfico provocan tráfico denso en la mayor parte del día, y muy congestionado en horas punta, haciendo que el tiempo de recorrido se incremente considerablemente.

Diferentes túneles en hora punta

Organización de la gestión

El Servicio de Operadores de Túneles (SOT) realiza la vigilancia 24h de los túneles. Está formado por 1 operador y 1 jefe de turno 365d/24h. Un jefe de servicio (que ejerce como Jefe de Emergencias) completa el servicio.

Como recursos internos, el Ayuntamiento de Barcelona cuenta con Equipos de Vialidad que realizan tareas de señalización de la vía pública y primera intervención en caso de incidente, tanto en túneles de ciudad como en los de rondas. Éstos pertenecen a los equipos destinados al mantenimiento de las infraestructuras. Los operadores del SOT tienen contacto directo con ellos tanto para activar su actuación frente a incidentes menores (objetos caídos en la calzada, limpieza de hidrocarburos…), como para dar soporte en caso de accidentes.

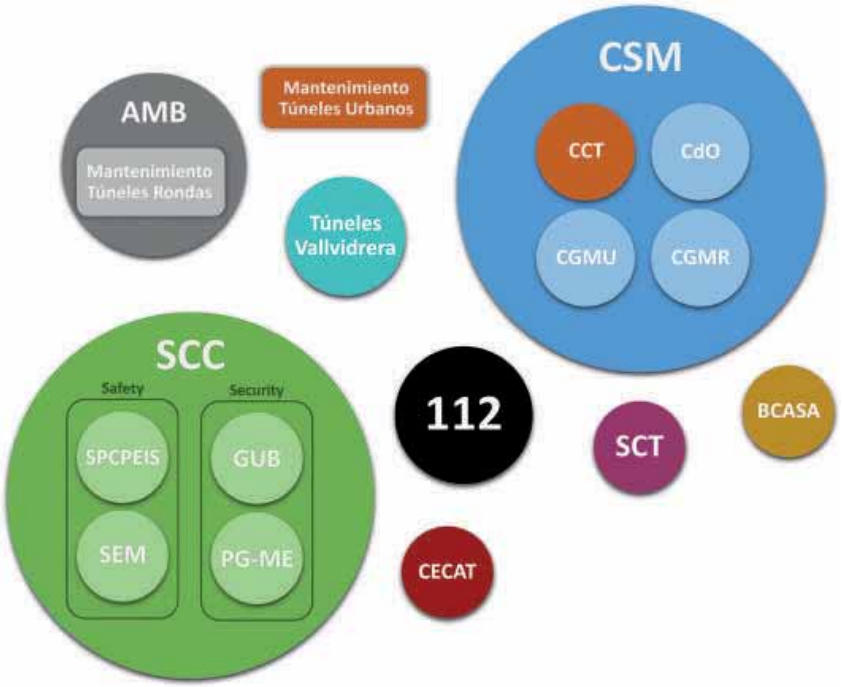
La integración de los diversos servicios del Ayuntamiento implicados en la gestión de la movilidad en una misma sala permite una rápida actuación coordinada, independientemente del tramo de carretera, túnel o calle donde se produzca un incidente. La comunicación es fluida y regida por los protocolos de nivel superior supervisados por técnicos del Ayuntamiento que actúan como responsables de cada uno de los servicios, coordinados por un responsable de la sala, manteniendo a su vez el Centro de Control de Túneles su independencia de actuación frente a incidencias de acuerdo al PAU.

Los recursos externos son activados a través del 112 y llamada a Sala Conjunta de Comando (SCC): Guardia Urbana (GUB), Servicio de Bomberos (SPCPEIS), Emergencias médicas (SEM), Mossos d'Esquadra (PG-ME). La

mayoría de incidentes activan siempre a la GUB, debido a la complejidad y alto impacto al tráfico que puede tener cualquier incidente independientemente de su gravedad. Además, gran cantidad de túneles no disponen de mecanismos de cierre o señalización que permita activar desvíos de forma remota, por lo que es necesario el desplazamiento de patrullas. En el caso de las Rondas, se dispone de efectivos motorizados de la GUB específicamente destinados a esta circunvalación para mejorar el tiempo de respuesta.

También se coordinan actuaciones con otros gestores relacionados con los accesos a la ciudad, como son Servei Català del Trànsit (SCT) y la concesionaria de los túneles de Vallvidrera. También existe comunicación directa con BCASA, que es quien regula los pozos de desagüe que evitan la inundación de los túneles.

En cuanto al mantenimiento, las tareas que implican cierre de túnel únicamente pueden desarrollarse en horario nocturno. El cierre parcial siempre se prioriza por encima del cierre total, debido a la complejidad de las desviaciones de tráfico que deben señalizarse conjuntamente con Guardia Urbana,

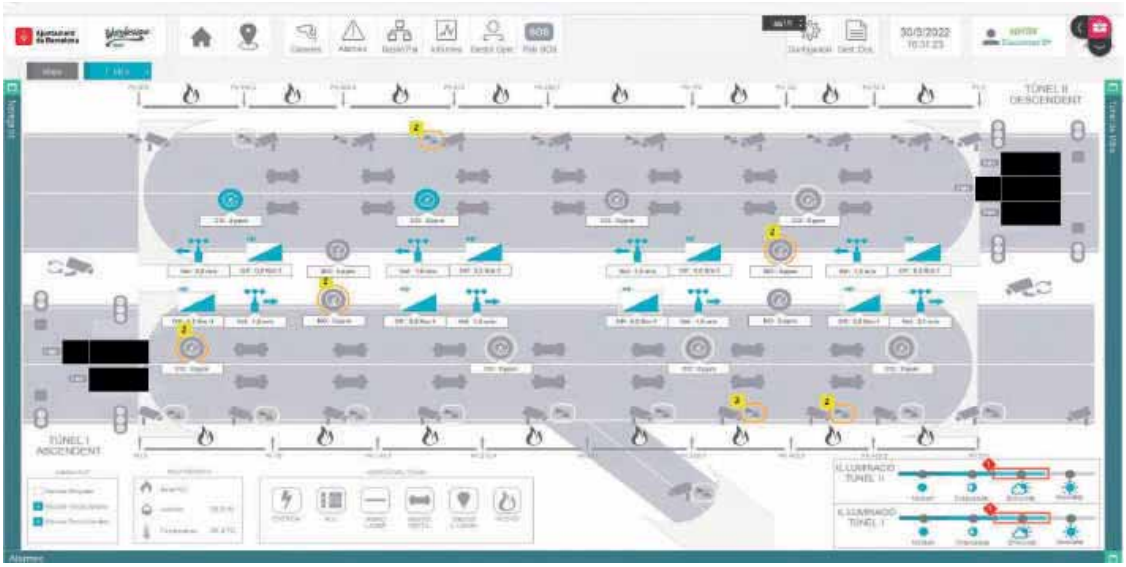


Diferentes organismos vinculados a la gestión del tráfico urbano y gestión de túneles del CCT

Sistemas

Los túneles se vigilan con un total de 229 cámaras, contando DAI, exteriores y locales técnicos. 45 postes SOS, 30 PMV, 42 Aspa-Flecha y 26 paneles de velocidad variable. Los túneles de mayor longitud disponen de sistemas de cierre con barrera. En el caso de las Rondas las barreras se encuentran principalmente en los ramales de acceso a la circunvalación.

Al tratarse de túneles que han ido sido integrados progresivamente, conviven tres sistemas SCADA diferentes. Actualmente se están migrando los sistemas a un único SCADA de gestión, para poder así simplificar y mejorar la operativa de los operadores. También se están integrando de forma progresiva a este sistema el resto de túneles que no están telecontrolados.



Sistema SCADA al que se están migrando todos los túneles en explotación

Gestión de incidentes

Se contabilizan una media de 141 incidentes mensuales que requieren de la activación del Plan de Autoprotección. No se incluyen en este recuento los cierres totales o parciales ocasionados por tareas de mantenimiento correctivo o preventivo. Tampoco se contemplan los incidentes relacionados con retenciones en el interior del túnel, dado que esta situación se mantiene a lo largo del día haciendo imposible su recuento. Sí que existen protocolos específicos de cierre de acceso al túnel y paso regulado por semáforos por acumulación excesiva de vehículos en el interior, pero esto solo se contempla en el túnel de mayor dimensión, el de Badal.

	Accidente	Animal suelto	Vehículo detenido	Vehículo averiado	Baldeas	Fuego	Humo	Manifestación	Meteorología (severo)	Objeto sal.zada	Opacidad	Pretón	Avería general sistemas	Vertido de líquidos	Total 1er trimestre 2022	Media mensual
Rovira	2		6	4	3			1				2	4		22	7
Camèlies			8	2	2		1	4				1	3		21	7
Lesseps	1		4	4									2		11	4
Mitre	4		1	6									1		12	4
Badal	8	1	35	24								1	1		70	23
Glòries	6		56	9	1			2	3			2	7	1	87	29
Ronda Litoral (B10)								2							2	1
Colom	5		7	9							1		1		23	8
Pla de Palau	8		11	8			1						2		30	10
Vila Olímpica	9		6	9			1	1				1			27	9
Poblenou	3		7	9								1			20	7
Diagonal Mar	1		2	6											9	3
Guinueta	18		10	31						1					60	20
Jordà	6		1	4											11	4
Oreneta	6		3	9									1		19	6
														Media mensual:		141

Los túneles del interior de la ciudad cuentan con la propia regulación semafórica de los cruces cercanos a las bocas que regulan el flujo de vehículos que pueden acceder el túnel. Esto está especialmente presente en túneles como el de Glòries, que gracias a esta regulación se evitan congestiones severas en su interior, hecho importante al tratarse de un túnel altamente estratégico para la salida y entrada de la ciudad.

En caso de incidente en túneles, el Servicio de Operadores realiza la primera intervención señalizando de acuerdo al PAU y emitiendo avisos a Guardia Urbana y 112. Pero en paralelo se activan los servicios de Gestión de Movilidad de Rondas y Gestión de la Movilidad Urbana ubicados en la misma sala. Estos canales de coordinación y comunicación permiten descargar a los operadores de túneles de la gestión necesaria a aplicar en el resto de las vías urbanas con motivo de los incidentes de túnel (envío de paneles informativos, coordinación de desvíos con Guardia Urbana, actualización de página web y aplicación informativa de tráfico…).

Así se asegura una actuación más eficiente y permite poder gestionar diversos incidentes en túneles simultáneos. También pueden aplicarse protocolos de actuación temprana al tratarse del caso contrario: que una incidencia de tráfico urbano pueda acabar afectando a los túneles.

En cuanto a las ayudas a la explotación, la detección de incidentes mediante DAI resulta muy complicada en hora punta debido al alto nivel de tráfico. Alarmas como la de "vehículo detenido", "objeto caído", o "tráfico lento" únicamente tienen utilidad en horas de tráfico bajo (generalmente horario nocturno). Los incidentes relacionados con vehículos averiados o accidente leve se detectan al identificar cambios de carril fuera de lo habitual. Evidentemente el tiempo de reacción se ve perjudicado por este hecho, requiere mayor atención por parte del operador para identificar si se trata de una situación extraordinaria (respecto a un túnel no urbano con menor intensidad de tráfico). Cada túnel, además, tiene características diferentes, por lo que el operador ha de desarrollar la habilidad de identificar cuándo están sucediendo estas situaciones anómalas para cada escenario.

3. TÚNELES DEL PRINCIPADO DE ANDORRA

Centro Nacional de Tráfico (CENATRA), desde donde se controlan los túneles

Debido a su compleja orografía, el Principado de Andorra cuenta con numerosos túneles que han constituido vías alternativas a las carreteras generales que discurren por el limitado espacio de sus valles.

Tanto la gestión de los túneles como la gestión del tráfico de las carreteras generales se realiza desde el Centro Nacional del Tráfico (CENATRA). Desde este centro se controlan los seis túneles del país gestionados por el Departament de Mobilitat (Gobierno de Andorra).

El CENATRA integra dos servicios: el Centro de Control de túneles, y el Centro de Información y gestión de tráfico. Ambos servicios se complementan para gestionar el tráfico nacional, y se dan soporte mutuo en caso de incidentes de la red de carreteras o en los túneles, permitiendo alta eficacia en las actuaciones y en la comunicación a los usuarios de la vía.

En caso de incidencias los recursos externos se activan a través del 112 (Policía Nacional, Bomberos y Servicio de Urgencias Médicas). También se activan los Servicios de Circulación Comunales, cuya competencia es gestionar el tráfico dentro de las poblaciones y carreteras secundarias.

Túnel	Tubos	longitud (m)	long. total (m)
Pont Pla	1 tubo	1.260	1.260
Dos Valires	2 tubos	2.930	5.860
La Tapia	1 tubo	505	505
St. Antoni	2 tubos	270	540
La Pedrera	1 tubo	140	140
Radio Andorra	2 tubos	170	340
		SUMA (m):	**8.645**

Túneles controlados desde el CENATRA

Características de los túneles

Desde el CENATRA se gestionan túneles urbanos e interurbanos. Podemos considerar túneles de connotación urbana:

- Pont Pla, 1.260m
- La Tapia, 505 m
- Radio Andorra, 2x 170 m

El concepto de tráfico elevado es relativo a las dimensiones del país, y Andorra, con unos 78.000 habitantes, registra una IMD en túneles urbanos de hasta 22.000 veh./día. Esto provoca retenciones en hora punta, especialmente en los túneles que dan acceso a las poblaciones centrales (Andorra La Vella y Escaldes), donde se concentra el núcleo empresarial del país. El tráfico es especialmente intenso en momentos de alto turismo, ya que los flujos de movimiento se concentran en horas muy concretas y provocan la saturación de las vías urbanas y por consiguiente, de los túneles. Esto sucede especialmente en periodos festivos de los países vecinos, o durante la época invernal debido a la alta actividad de las pistas de esquí ubicadas en las poblaciones más al norte del país.

Retenciones en interior de túnel para acceder al núcleo de Andorra la Vella / Escaldes

Organización de la gestión

El CENATRA realiza la vigilancia de túneles 365d/24h. El servicio está formado por 2 operadores que gestionan tanto los túneles como el tráfico del país, acompañados por un Jefe de Turno.

Como recursos internos también se dispone de un Equipo de Primera Intervención en Túneles y de un Equipo de Vialidad. Éstos se encargan de realizar la primera intervención en caso de incidente en los túneles, y también pueden realizar operativos de señalización en cualquier punto de la red viaria del país para mejorar la movilidad. Su base de operaciones está ubicada en los propios túneles, lo que permite tiempos de intervención rápidos inferiores a los 5 minutos. Su actuación está detallada en los Planes de Emergencia y los operadores los activan ante cualquier incidencia.

La integración del servicio de control de túneles y el de gestión e información del tráfico es total. De hecho, los mismos operadores son multifuncionales y pueden bascular de unas actividades a otras en función de la carga de trabajo. Los protocolos de actuación y comunicación están integrados en el funcionamiento del CENATRA, lo que permite actuaciones muy eficientes y sin pérdidas de información.

Los recursos externos son activados a través del 112 y llamadas a los Servicios de Circulación Comunal para la gestión del tráfico urbano. A nivel de comunicaciones se cuenta con emisoras TETRA que permiten tanto la comunicación interna como la comunicación con canales exclusivos de Protección Civil, a los que tienen acceso todos los recursos externos y permite una mejor coordinación en caso de actuaciones.

Se diferencian claramente las intervenciones dentro del ámbito del Plan de Emergencia Interior y el Exterior. En el Interior, los recursos que gestiona la sala de control son suficientes para hacer frente a los incidentes de gravedad baja o media, sin tener que hacer intervenir ningún recurso externo. En el Plan de Emergencia Exterior se establece claramente qué incidentes son susceptibles de movilizar la ayuda de los cuerpos de orden, intervención y sanitarios. Gracias al tamaño del país, los tiempos de intervención son cortos y permite la movilización total en un tiempo medio de 10 minutos.

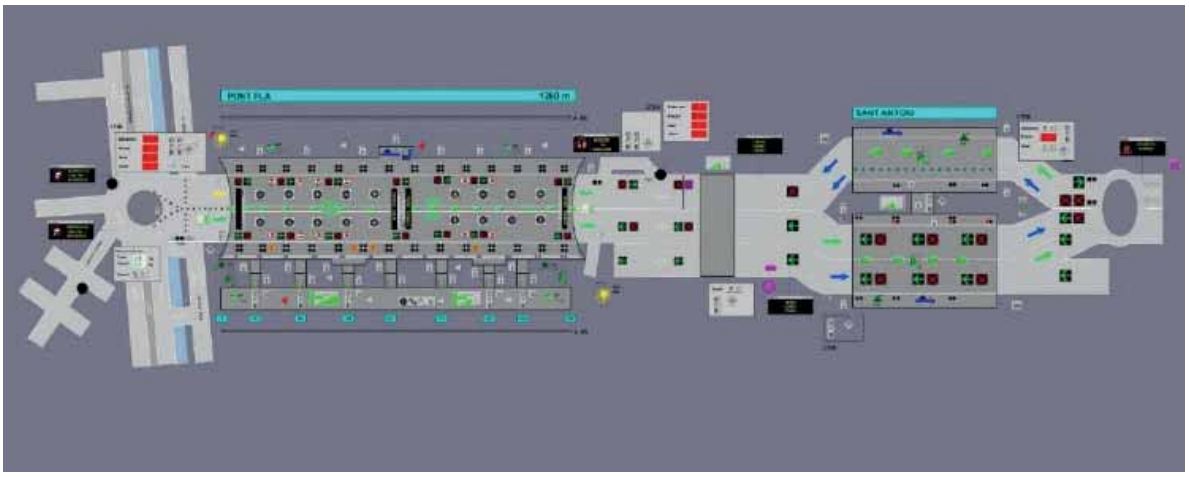
Un factor importante a tener en cuenta en los túneles del Principado es su característica de túneles de alta montaña, que hace especialmente difícil las operaciones en época invernal. Entre los meses de octubre a mayo se extrema la vigilancia, se realiza un seguimiento exhaustivo de las previsiones meteorológicas y se activan más efectivos en calle para hacer frente a los episodios de nevadas, muy comunes en esas fechas y que pueden llegar a acumular varias decenas de centímetros de nieve en las vías urbanas. A parte de tener contemplados estos incidentes en el Plan de Emergencias, existen protocolos específicos que coordinan la actividad del CENATRA con otros servicios. Por ejemplo, el de coordinación con los equipos de COEX que realizan la retirada de nieve, o el de establecimiento de puntos de control de cadenas realizado por la Policía en el acceso o salida de los túneles, para evitar vehículos atrapados en la nieve que interrumpirían el tráfico urbano e interurbano.

En cuanto al mantenimiento, se sigue la planificación marcada por el Plan correspondiente. Semanalmente se coordinan los cierres de carril o túnel previstos en el plan y se comprueba su viabilidad de acuerdo con el estado de las vías y la planificación de otras actividades en las mismas. Los cierres totales de circulación en al menos un sentido se priorizan en horario nocturno, dado el alto impacto al tráfico urbano que provocan. Estos cierres son realizados totalmente por el personal de explotación del túnel, siendo informados previamente los Servicios de Circulación de las poblaciones afectadas.

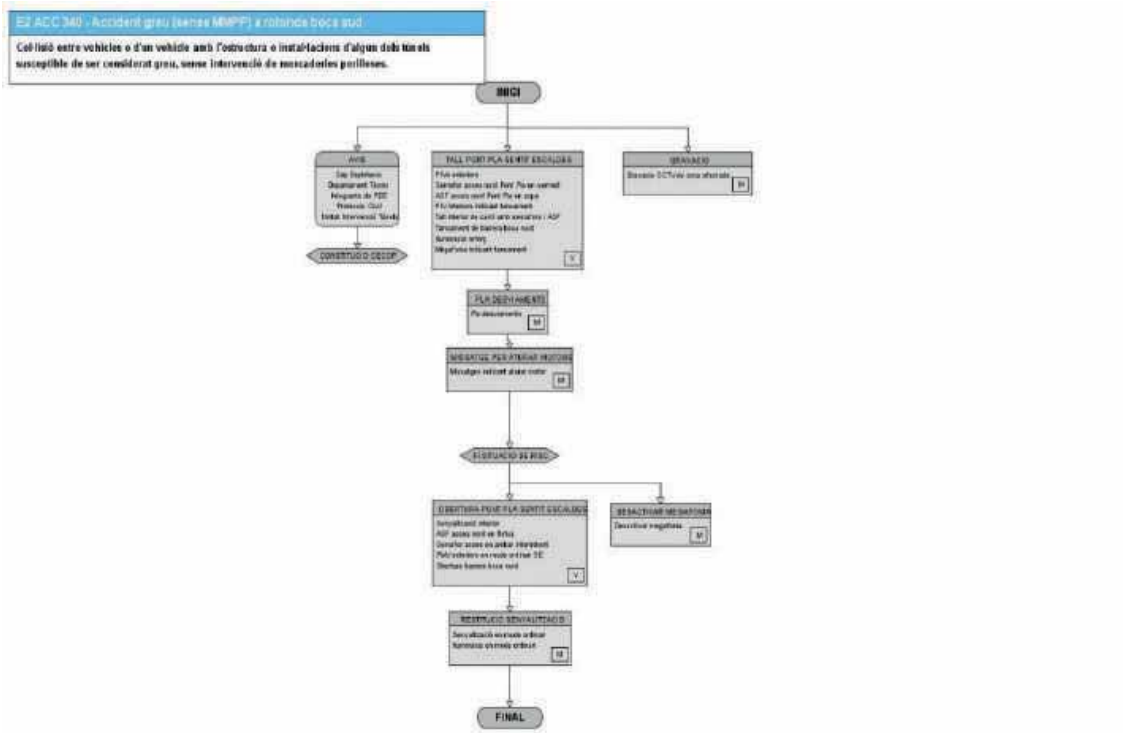
Sistemas

Los túneles están equipados con todos los sistemas de seguridad establecidos por la normativa. Cuenta con 250 cámaras, sumando el sistema DAI, cámaras de accesos y de interior de galerías de evacuación. Se gestionan 126 postes SOS, 30 PMV, 186 ASF y 44 CLV. Todos los túneles cuentan con sistemas de cierre con barrera, sistemas de ventilación (en túneles superiores a 500m) y control de la calidad del aire.

Todos los túneles están integrados en un mismo sistema SCADA, lo que permite una gestión eficiente por parte de los operadores. Además, se cuenta con un módulo de gestión de procedimientos con todas las actuaciones del Plan de Emergencia de cada túnel integradas, de forma que los operadores puedan actuar de acuerdo a los planes sin margen de error. No es necesario consultar los documentos de cada Plan de Emergencia: con un sistema de búsqueda se puede acceder a cualquier ficha de actuación de cualquier túnel, y se puede actuar sobre los dispositivos desde el mismo gestor de procedimientos. De esta forma la gestión es totalmente homogénea a pesar de controlar túneles de diferentes características.



Sistema SCADA, representación de tres túneles urbanos y semi-urbanos, integrados en la misma aplicación y representados de forma conjunta, con protocolos de actuación similares.



*Ejemplo de ficha de del Plan de Emergencia en el Gestor de Procedimientos.
Ejecuta planes de forma coordinada para señalizar incidencias.*

Gestión de incidentes

	Pont Pla	St. Antoni	La Pedrera	Dos Valires	La Tapia	Radio Andorra
P-MET-10 Fenómenos meteo. Leves	11			10	9	5
P-MET-20 Fenómenos meteo. Severos	4			4	4	2
P-TRA-100 Peatones	2					
P-TRA-100 Ciclistas	6					
P-TRA-110 Vehícuo en anchurón	9		1	9		
P-TRA-120 Veh. Detenido permitiendo paso	1					
P-TRA-131 Veh. Pesado (en túnel no autorizado)	1					
P-TRA-132 Paso aut. MMPP				297		
P-TRA-150 Conducción temeraria	6					
P-TRA-151 Cariil o tubo no disponible	1	3	1	16	4	1
E1-TRA-180 Animales sueltos		1				
E1-TRA-190 Veh. Obstaculizando carril		1	2		1	
E1-TRA-240 Retenciones (cierre acceso túnel)	21			1		1
E1-TRA-290 MMPP no autorizadas	1					
E1-ACC-270 / 340 Accidente	2			2	1	
E3-FOC-410 Fuego						
Media mensual - Activación del Plan Emerg. Int.	65	5	4	339	19	9
				Total:		441

Datos de 2022, media de incidentes que han activado el PEI

Mensualmente se activan una media de 441 incidencias tipificadas en los Planes de Emergencia. Obviando el protocolo correspondiente al código P-TRA-132 que hace referencia al paso autorizado y controlado de vehículos de MMPP, y los cierres de túnel en referencia a tareas de mantenimiento, podemos considerar una media de 118 incidencias mensuales gestionadas desde el CENATRA. Tampoco se han indicado las incidencias relacionadas con densidad dentro de los túneles, pero si se han contemplado los cierres provocados por retenciones en su interior. Los Planes de Emergencia son muy estrictos y en caso de retenciones tan solo se permiten 150 vehículos acumulados en el interior del túnel. En este caso se pasa a regular el acceso mediante semáforos de bocas. Los túneles considerados urbanos son los que presentan mayor número de incidencias.

En caso de incidente el operador de túneles, bajo supervisión del Jefe de Turno, ejecuta la activación del plan correspondiente señalizando en primera instancia. A su vez, avisa a los equipos de Primera Intervención que se encuentran en los túneles para que se desplacen hacia el punto conflictivo. En paralelo, el operador de gestión del tráfico avisa al 112 y a los servicios de Circulación correspondientes. Llegados a este punto, el operador de túneles realiza el seguimiento del incidente, informando al Jefe de Turno y intercambiando información con los Agentes de Primera Intervención. Mientras, el operador de gestión del tráfico avisa a la población mediante paneles informativos, redes sociales, APP de tráfico, crónica radiofónica, etc.. Tanto el seguimiento de la incidencia por parte del operador de túneles como la gestión de la información de tráfico han de ser coordinadas por el mismo Jefe de Turno, único responsable de ambos servicios. Esto permite mejor coordinación de actuaciones, pero puede limitarse la efectividad si son varias las incidencias simultáneas que deben atenderse. Por otra parte, todos y cada uno de los acontecimientos que sucedan en la red viaria son conocidos por los operadores de la sala, por lo que la integración de servicios y la garantía de una buena comunicación son totales.

Las alarmas de DAI son muy útiles, dado que se registran momentos de tráfico elevado, pero muy concentrado en tramos horarios concretos. Exceptuando ciertos momentos, la detección de DAI es rápida y precisa, y las alarmas de "vehículo detenido", "objeto caído", o "tráfico lento" ayudan mucho al operador a detectar anomalías. En época invernal, la caída de nieve en el interior del túnel al paso de los vehículos puede ocasionar falsas alarmas.

4. LECCIONES APRENDIDAS Y CONCLUSIONES

La explotación de túneles urbanos con tráfico elevado requiere de una gestión con características particulares. De acuerdo con los casos expuestos, podemos identificar los siguientes puntos clave para asegurar el éxito de las operaciones:

- Operadores proactivos y altamente entrenados. Por lo general se concentran una gran cantidad de túneles de diferentes características y particularidades, cada uno con comportamientos diferentes a distintas horas del día. El conocimiento y la experiencia es un grado, y dado que los sistemas DAI reducen su efectividad para detectar ciertos incidentes en momentos de retenciones, es necesario operadores muy entrenados que sepan identificar rápidamente los conflictos a través de las cámaras. Se requiere personal altamente proactivo, ya que la detección de incidencias vendrá más de la capacidad de observación e intuición del operador que de alarmas objetivas de los sistemas de ayuda a la explotación.

  Así mismo será necesario valorar adecuadamente la posibilidad de incrementar el número de operadores en función de la carga de trabajo, especialmente al integrar progresivamente más túneles telegestionados.

- Valorar adecuadamente la carga de trabajo del operador. Dada la dificultad de gestionar los túneles urbanos, la inclusión de nuevas infraestructuras al telecontrol debe ir acompañada de un estudio de carga de trabajo para valorar si es necesario incrementar el número de operadores.

- Coordinación total de todos los actores principales. Las actuaciones del centro de control de túneles han de ir acompañadas por actuaciones coordinadas de otros servicios que desarrollan actividades de gestión de tráfico, tanto desde centro de control como en calle. Para lograr este objetivo debe existir implicación por parte de la administración o entidad propietaria y debe establecer claros protocolos de comunicación y actuación para favorecer la acción coordinada. Estos protocolos han de revisarse periódicamente y se han de promover reuniones con todas las partes implicadas.

- Protocolos de actuación homogéneos. Si existe una diferencia temporal importante en la puesta en marcha de los túneles es muy probable que los planes de actuación sean diferentes o las incidencias no se identifiquen con la misma terminología. Es importante actualizar los Planes de Explotación para homogeneizar al máximo estas actuaciones.

- Minimizar las aplicaciones de gestión y la documentación a consultar. Idealmente se debería utilizar un único sistema SCADA , o al menos, que la operativa sea muy similar entre sistemas, para facilitar la actuación de los operadores. Los sistemas han de adaptarse a la explotación, y no la explotación a los sistemas. Debido al carácter urbano, es interesante que la aplicación permita desactivar temporalmente alarmas de DAI que detectan retenciones en las horas punta para no saturar a los operadores.

  Debería contarse con integración de los planes de actuación mediante un gestor de incidencias o un gestor de planes, para minimizar la consulta de documentación en un momento de resolución de incidencias.

- Simplificación de roles de los actores. Por lo general, existen diversas organizaciones que realizan tareas alrededor de la gestión de túneles: diferentes empresas de mantenimiento privadas o públicas, otras explotaciones, COEX… Deben establecerse claramente las competencias y las vías de comuni-

cación para agilizar la resolución de problemas, tanto técnicos como de tráfico.

- Estructura y organización del servicio. Internamente debe existir una estructura clara de tareas a realizar y un reparto claro de las mismas, entre los operadores y jefes de turno. Debe realizarse de acuerdo a la experiencia y estar optimizado: maximizar la vigilancia en horas punta, favorecer la revisión de sistemas y realización de informes y tareas formativas en horas valle, etc.. Prever modificaciones en función de las incidencias.
- Canales de comunicación ágiles. A parte del teléfono, emisoras de radiocomunicación para comunicarse con Equipos de Primera Intervención, Policía, Bomberos, Sanitarios…

  También otros medios internos que permitan comunicación en tiempo real y asíncrona, como canales de mensajería instantánea.
- Formación inicial y continua. Imprescindible contar con un plan formativo completo para nuevos operadores, pero también de reciclaje: ejercicios de gabinete, simulador, retorno de experiencia de otros actores de la explotación y de otros túneles, espacios de debate y de revisión de actuaciones pasadas…
- Realización de simulacros periódicos a gran escala. Se trata de la mejor práctica para detectar deficiencias sistemáticas, y así garantizar un mejor desempeño en caso de emergencia real. Debe realizarse una planificación teniendo en cuenta las infraestructuras gestionadas y la proximidad entre ellas.

Como hemos visto, la explotación de túneles urbanos de tráfico elevado cuenta con una complejidad alta, que requiere operadores mejor entrenados y capaces de soportar situaciones de alta carga de trabajo. Las incidencias pueden ser más difíciles de detectar, se pueden dar varias de forma simultánea y la afectación al tráfico de la ciudad es alto.

La homogeneización y la simplificación es clave: en las aplicaciones, en los planes de emergencia, en los flujos de información y en los protocolos de coordinación. Y todo ello ha de estar adaptado a las necesidades y la operativa de la explotación, nunca a la inversa.

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

FOURTH SESSION:

New vehicle propulsion energies and their impact on road tunnels

IMPACT OF NEW ENERGY CARRIERS ON TUNNEL DESIGN AND SAFETY - STATUS REPORT OF PIARC TC 4.4 WG4

Peter Sturm
Graz University of Technology, Austria

Gary Clark
Atkins, UK

Alternative propulsion technologies, including battery-electric vehicles, are becoming more prevalent. Whilst such vehicles remain a small overall proportion of the vehicle fleet, the combination of impacts of Government policy and technological advances in alternative fuels is expected to accelerate their increase in numbers on the road and in tunnels in coming years.

As a result of these changes, the nature of tunnel safety risk (including from fire) is expected to change with time, and detailed consideration of the risk of significant incidents involving such vehicles is required. This should include the evaluation of incident consequences with particular attention paid to fire characteristics and toxic emissions and their impact on tunnel users and on emergency intervention strategies.

PIARC technical committee TC4.4 initiated working group WG4 in order to investigate this issue within the PIARC working cycle 2020 -2023.

There are too few recorded examples of incidents involving vehicles with new propulsion technologies, commonly called new energy carriers (NEC), to be able to make statistically relevant statements about the effects on the tunnel design and infrastructure. It is also currently not possible to derive specific instructions from experience gained from incidents of such vehicles. Hence, PIARC TC4.4 WG4 collates currently available information on ongoing or recently finished research programmes and highlights their most important elements so far. WG4 consists of approximately 30 members from 16 different countries around the world.

A first report concerning the status of ongoing research in the topic of NEC vehicles has already been published by PIARC [1]. The paper presented here expands on the previous work and describes the work done within the working group to date.

IMPACTO DE LOS NUEVOS VECTORES ENERGÉTICOS EN EL DISEÑO Y LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES - INFORME DE SITUACIÓN DEL TC 4.4 WG4 DE LA AIPCR

Las tecnologías de propulsión alternativas, incluidos los vehículos eléctricos de batería, son cada vez más frecuentes. Aunque este tipo de vehículos sigue representando una pequeña proporción del parque automovilístico, se espera que la combinación de los efectos de la política gubernamental y los avances tecnológicos en materia de combustibles alternativos acelere su aumento en la carretera y en los túneles en los próximos años.
Como resultado de estos cambios, se espera que la naturaleza del riesgo para la seguridad de los túneles (incluido el derivado de los incendios) cambie con el tiempo, por lo que se requiere un examen detallado del riesgo de incidentes significativos en los que se vean implicados dichos vehículos. Esto debería incluir la evaluación de las consecuencias de los incidentes, prestando especial atención a las características del fuego y a las emisiones tóxicas y a su impacto en los usuarios del túnel y en las estrategias de intervención de emergencia.
El comité técnico TC4.4 de la AIPCR puso en marcha el grupo de trabajo WG4 para investigar esta cuestión dentro del ciclo de trabajo 2020-2023 de la AIPCR.
Hay muy pocos ejemplos registrados de incidentes con vehículos con nuevas tecnologías de propulsión, comúnmente llamados nuevos portadores de energía (NEC), para poder hacer afirmaciones estadísticamente relevantes sobre los efectos en el diseño y la infraestructura del túnel. Tampoco es posible en la actualidad obtener instrucciones específicas a partir de la experiencia adquirida en los incidentes de dichos vehículos. Por ello, el Grupo de Trabajo TC4.4 de la AIPCR recopila la información disponible actualmente sobre los programas de investigación en curso o recientemente finalizados y destaca sus elementos más importantes hasta el momento. El WG4 está formado por unos 30 miembros de 16 países diferentes de todo el mundo.
La AIPCR ya ha publicado un primer informe sobre el estado de la investigación en curso en el tema de los vehículos NEC [1]. El documento que aquí se presenta amplía el trabajo anterior y describe la labor realizada en el seno del grupo de trabajo hasta la fecha.

IMPACT DES NOUVEAUX VECTEURS D'ÉNERGIE SUR LA CONCEPTION ET LA SÉCURITÉ DES TUNNELS - RAPPORT D'ÉTAPE DU WG4 DU CT 4.4 DE L'AIPCR

Les technologies de propulsion alternatives, notamment les véhicules électriques à batterie, sont de plus en plus répandues. Bien que ces véhicules ne représentent encore qu'une faible proportion du parc automobile, la combinaison des effets des politiques publiques et des progrès technologiques dans le domaine des énergies alternatives devrait accélérer l'augmentation de leur nombre sur les routes et dans les tunnels dans les années à venir.
En conséquence, la nature des risques liés à la sécurité dans les tunnels (notamment l'incendie) devrait évoluer avec le temps, et il est nécessaire d'examiner en détail le risque d'incidents importants impliquant ces véhicules. Cela devrait inclure l'évaluation des conséquences des incidents, avec une attention particulière portée aux caractéristiques des incendies et aux émissions toxiques, ainsi qu'à leur impact sur les usagers du tunnel et sur les stratégies d'intervention d'urgence.
Le comité technique TC4.4 de l'AIPCR a créé le groupe de travail WG4 afin d'étudier cette question dans le cadre du cycle de travail 2020-2023 de l'AIPCR.
Il y a trop peu d'exemples enregistrés d'incidents impliquant des véhicules dotés de nouvelles technologies de propulsion, communément appelés nouveaux vecteurs énergétiques (NEC), pour pouvoir faire des déclarations statistiquement pertinentes sur les effets sur la conception et l'infrastructure du tunnel. Il n'est pas non plus possible, à l'heure actuelle, de tirer des recommandations spécifiques de l'expérience acquise lors d'incidents impliquant de tels véhicules. Par conséquent, le WG4 du TC4.4 de l'AIPCR rassemble les informations actuellement disponibles sur les programmes de recherche en cours ou récemment terminés, et met en évidence leurs éléments les plus importants jusqu'à présent. Le WG4 est composé d'environ 30 membres provenant de 16 pays différents dans le monde.
Un premier rapport sur l'état de la recherche en cours sur le thème des véhicules NEC a déjà été publié par l'AIPCR [1]. L'article présenté ici développe le travail précédent et décrit les travaux réalisés à ce jour au sein du groupe de travail.

1. MOTIVATION

Alternative propulsion technologies, including battery-electric vehicles, are becoming more prevalent. Whilst such vehicles remain a small overall proportion of the vehicle fleet, the combination of impacts of Government policy and technological advances in alternative fuels is expected to accelerate their increase in numbers on the road and in tunnels in coming years.

As a result of these changes, the nature of tunnel safety risk (including from fire) is expected to change with time, and detailed consideration of the risk of significant incidents involving such vehicles is required. This should include the evaluation of incident consequences with particular attention paid to fire characteristics and toxic emissions and their impact on tunnel users and on emergency intervention strategies.

PIARC technical committee TC4.4 initiated working group WG4 in order to investigate this issue within the PIARC working cycle 2020 -2023.

There are too few recorded examples of incidents involving vehicles with new propulsion technologies, commonly called new energy carriers (NEC), to be able to make statistically relevant statements about the effects on the tunnel design and infrastructure. It is also currently not possible to derive specific instructions from experience gained from incidents of such vehicles. Hence, PIARC TC4.4 WG4 collates currently available information on ongoing or recently finished research programmes and highlights their most important elements so far. WG4 consists of approximately 30 members from 16 different countries around the world.

A first report concerning the status of ongoing research in the topic of NEC vehicles has already been published by PIARC [1]. The paper presented here expands on the previous work and describes the work done within the working group to date.

2. INTRODUCTION

The alternative fuels considered in this paper are limited to those thought to be most relevant on the roads worldwide at the time of writing and in the near future, as far as it is reasonable to predict. These include:

- Battery electric vehicles (BEV);
- Hydrogen fuel cells electric vehicles (FCEV); and
- Compressed or liquified gas (CNG, biogas, LPG, LNG).

Table 1 gives an overview of the categories of vehicle propulsion systems. While vehicles propelled with internal combustion engines (ICE) and fuelled with liquid or gaseous fossil fuels dominate the current vehicle fleet, BEV are penetrating the market. BEV are most commonly used in urban areas and for relatively short driving distances. Hybrid vehicles try to combine the positive aspects of both propulsion systems, the ICE and liquid or gaseous fuels for long distances and the BEV for short distances. It has to be mentioned that fossil fuels like CNG or LPG are listed as alternative fuels, although they have been on the market for decades. However, due to carbon reduction policies, such fuels might increase in share during a time-limited period as a bridging technology to reduce the usage of carbon rich fuels.

Table 1 : Categories of propulsion systems for motorized vehicles

System	**Internal Combustion Engines**			**Battery electric vehicle**		**Fuel cell electric vehicle**
Propulsion concept	ICE	Full hybrid	Plug-in hybrid	Range extender	E-car	Fuel cell
Main energy storage	Tank			Battery		Tank
Main energy source	Fossil fuels, bio-fuels, H2, synthetic fuels			Electricity		H2
Main propulsion unit	ICE			E-motor		E-motor
Difference	-	Possibility to drive fully electric, regenerative breaking	As full hybrid, but with external E-charging unit	ICE as range extender	-	-
Secondary energy storage	-	Battery		Tank	-	Battery
Secondary energy source	-	Electricity		ICE	-	Electricity
Secondary propulsion unit		E-motor		ICE	-	-

It is noted that there is a technical distinction between a battery and an accumulator. A battery is not rechargeable whereas an accumulator is rechargeable. In all applications considered in this report the BEV main energy storage system is an accumulator. However, this distinction is not widely used and indeed the BEV manufacturers refer to the main energy store as a battery. This report has maintained this convention to aid understanding by the reader.

3. THE ROLE OF NEW ENERGY CARRIERS WITHIN THE FUTURE VEHICLE FLEET

Climate change policy aims at eliminating fossil fuels from the transport sector. While for an intermediate time span low-carbon containing gas-based fuels, like CNG and LPG, will still be used, in future, energy carriers like batteries and hydrogen shall remain.

According to information provided by the hydrogen council (based on data from car manufacturers) BEVs will dominate the car usage in urban regions, fuel cell electrical vehicles (FCEV) will cover the medium to long range transport for light commercial vehicles as well as heavy duty vehicles, and hydrogen fuelled ICE might be used in long distance transport (HGV, trains, ships, aircraft) [2].

However, the type of NEC vehicles that will be used in the future will depend heavily on future policy. According to global sales figures the share of battery electrical vehicles is growing rapidly. This growth is mostly driven by emerged sales in China and in Europe. According to EV Volumes, a commercial industry monitor [5], China more than doubled their BEV sales between 2020 and 2021 while in West and Central Europe the increase was 66%. The global market share in 2021 amounted to 8% of all passenger cars sold.

In the framework of a German research project regarding the influence of alternative energy carriers on tunnel safety ([3], [4]), a relevance of the individual energy carriers for usage in road vehicles was projected (see Table 2). According to this information BEV will play, in the near future, a considerable role for cars and Light Duty Commercial vehicles, while hydrogen might become important for HGV and busses in 15 to 20 years from now. Alternative fossil fuels will play a more pronounced role than today in the bus sector.

Table 2: relevance of energy carriers in road vehicles in Germany, [3]

	Cars			Light HGV			Heavy HGV			Bus		
	2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040
Conventional	high	high	medium	high	high	high	high	high	high	high	high	high
Hybrid[2]	high	medium	medium	low	medium	medium	low	medium	low	high	medium	high
BEV	medium	high	high	low	medium	medium	low	low	low	medium	high	high
CNG	low	low	low	low	low	low	low	low	low	low	low	medium
LNG	low	low	low	low	low	low	low	low	medium	low	low	medium
LPG	low	low	low	low	low	low	low	low	low	low	low	low
FCEV	low	low	medium	low	low	medium	low	low	medium	low	low	medium
H_2	low	low	low	low	low	low	low	low	medium	low	low	medium

The number of hybrid vehicles as a combination of conventional ICE and electrical vehicles on the road is constantly growing. Table 1 gives the categories of hybrid vehicles according to the usage of the main propulsion system. In full-hybrid vehicles the ICE is the dominating engine and the electric system is mainly used as power storage and support for short periods. The recharging of the battery is done by regenerative breaking. In a mild hybrid system (plug-in hybrid) the electric propulsion system is already capable of propelling a vehicle for a reasonable distance. These vehicles offer the additional possibility to recharge the battery via an external power source. In a range-extender version the ICE would be only used to produce electricity as soon as the available battery capacity is too low to run the engine only from stored electrical energy.

However, it has to be mentioned that the hybrid technology is supposed to be a transition technology for passenger cars as long as the mileage and charging time of BEVs are not sufficient for mid- and long-distance journeys.

ICE based hybrid technology is not an area of application for HGV.

Figure 1 shows the prediction of the fleet distribution of passenger cars (PC) with conventional fuels and new energy carriers for Germany. It has to be mentioned that in this figure hybrid cars are listed as alternatively powered cars. While the new registrations of hybrid cars will decline after 2030, they will still account for the bulk of the overall alternative PC fleet. However, from 2025, BEVs are likely to dominate new registrations of alternative cars. From 2035 on, it is expected that BEV will generally dominate new PC registrations.

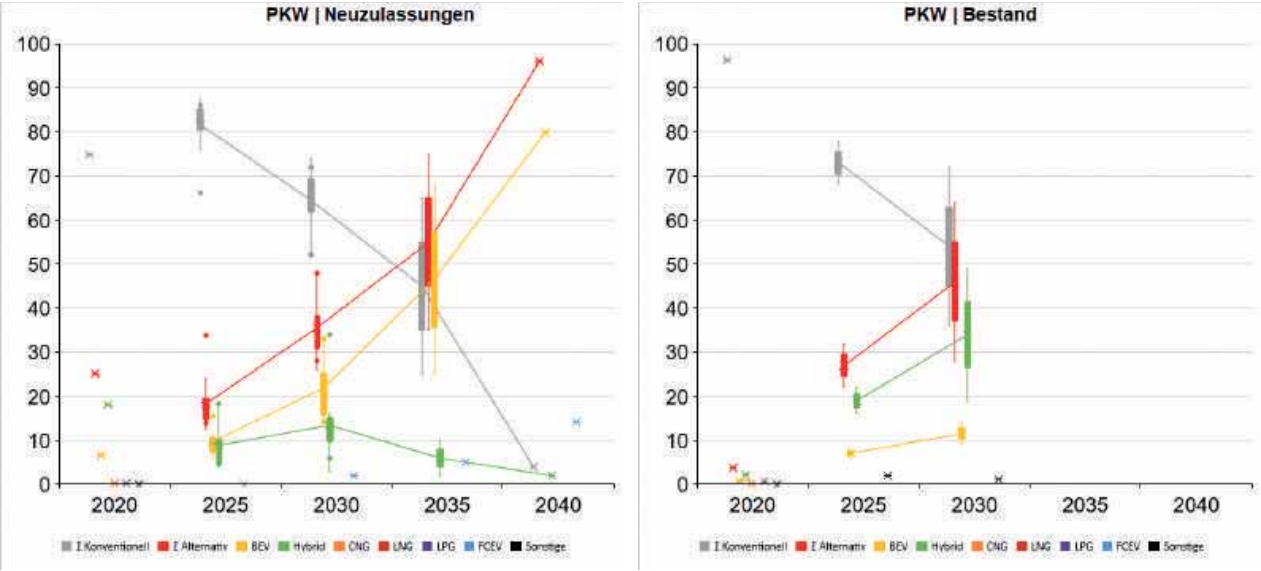


Figure 1: Projection of PC fleet distribution, new registrations right, fleet distribution left [4]

Hydrogen as a fuel can be either used in fuel cell electric vehicles (FCEV) or in ICE vehicles. The amount of fuel cell (FC) powered vehicles on the road is very small. Although this technology is quite old, the non-availability of fuel has prevented its widespread usage. Currently only a few car brands offer FC powered cars. Due to the high vehicle costs and fuel restrictions, only cars in the ownership of research institutions and/or public bodies are currently found on the road. Nevertheless, it is to be expected that in the near future this technology may substitute conventional vehicles in the mid/long range transport sector, for PCs as well as HGVs.

Compressed hydrogen in gaseous form may also be used in ICE vehicles. Hydrogen storage in liquid form was investigated strongly in the first decade of this century, but abandoned due to the high costs of cryogenic tank systems. The possibility of storing hydrogen in metals was also not successfully implemented due to the low storage capacity respectively the high weight of the tank in relation to stored hydrogen. Due to lack of studies and current application the latter two storage forms will not be addressed in this report. State of the art is currently a storage of gaseous hydrogen (GH2) at pressure levels of 700 bar for PC and 350 bar for HGV applications.

The prevalence of LPG and CNG fuelled vehicles depends strongly on the tax policy of the various countries, as well as on restrictions for environmental reasons in various cities. Hence the share of such vehicles may vary between a few percent and up to 20%. CNG plays an important role in urban public transport systems as well as for light duty commercial vehicles. LNG is being increasingly used for high energy demand vehicles (trucks, buses). However, the distribution network of LNG is currently quite poor.

From a technical point of view, tanks and fuel lines to the ICE are well established, and safety implications of such fuels well understood. However, from a climate change and greenhouse gas policy perspective, vehicles powered by gas from fossil fuels can only be seen as a bridging technology for the next decade.

4. TECHNICAL CONSIDERATIONS RELATED TO VEHICLES WITH ALTERNATIVE FUELS

4.1. Battery electrical vehicles

Battery electric vehicles (BEV) use the high efficiency of electric motors to propel the vehicle. The electrical energy is stored on an electrochemical basis in rechargeable batteries (accumulators). The application of this technology is currently concentrated in the area of passenger cars and light commercial vehicles. It is being tested for heavy commercial vehicles, but is currently only used in local transport due to the high weight of the energy storage device. For PC applications, the batteries are usually installed in the vehicle floor. The energy stored in PC vehicle batteries is usually specified in kWh, the electrical tension level is at 400V. Figure 2 illustrates the main parts of the propulsion system of a BEV.

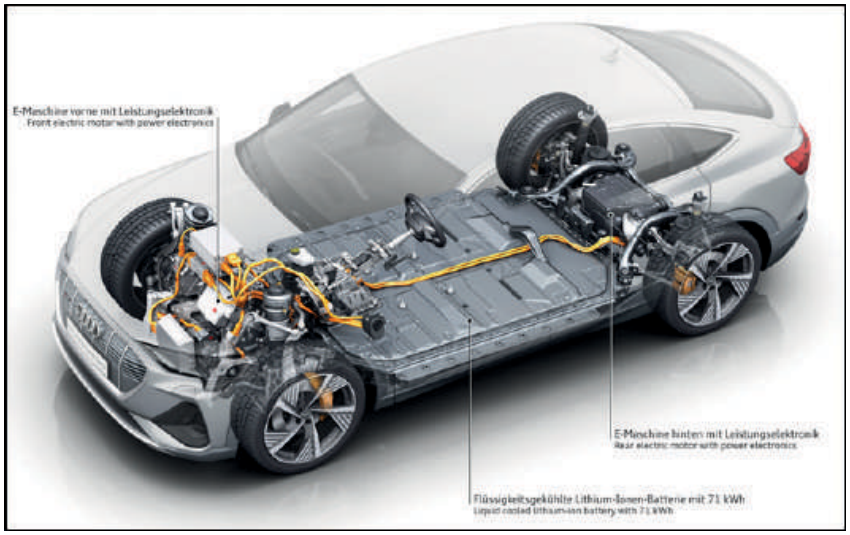


Figure 2: Sketch of a BEV, [6]

Damage to batteries might result in fires. Such damage can be due to mechanical reasons (traffic incidents) or during malfunctions of the battery (thermal problems) and are associated with fire hazards as well as with chemical and electrical risks. Currently, Li-Ion technology dominates the battery market for electrical vehicles. So this is the only battery technology taken into account is this paper.

In the case of road traffic incidents, the energy provider is in most cases the source of a fire. In the case of BEVs, the battery is the critical element. As soon as the separator between anode and cathode is damaged a short cut occurs, causing a so-called thermal runaway which can lead to a fire. Thermal runaway, which initiates with a chain reaction where cells fail one after the other, heating up and igniting, may also be caused by external heat input or overloading during charging.

According to Doughty und Roth [7], the most common reaction to battery damage is an uncontrolled exothermic reaction within a battery cell, which results in a generation of heat (i.e. thermal runaway) and the release of toxic and combustible gases (i.e. venting). In particular, the combustibility of the electrolyte was extensively discussed in a study by Hess et al. [8]. According to Mikolajczak et al. [9] in the case of a thermal runaway, a 7 to 11-fold higher heat release, compared to the electrical energy stored in the cell, can be observed.

However, compared to ICE propelled vehicles there are significantly less hot ignition sources in an electrical vehicle. Flammable battery coolants (glycol) are used, but they are confined in the battery, in a protective en-

closure. This implies that a fire of an electric vehicle may be less likely than the one of an ICE vehicle. Willstrand et al. [10] found in their investigations that fires in BEVs are less common than in ICEVs and in particular it is rare that fires originate in the traction battery. Considering that the battery is well-protected from a fire, many BEV fires may not involve the traction battery at all.

4.1.1. Fire characteristics

The burning behaviour and heat release rate are strongly dependent on the degree of damage, the construction type of the battery, the status of charge (SOC), the collapse of the internal battery cooling system, etc.

Detailed, reliable information about the maximum heat release rate (HRR) of BEV is rare. Most data are available for fire tests at battery pack level. Collella et al. [11] reported a peak HRR of 300 kW for a 16 kWh battery pack (at 50% SOC) with one extra peak of 550 kW due to the burning of the plastic cover of the battery. Various tests were performed and qualitative conclusions concerning the fire behaviour were made. They concluded that: thermal runaway of large-scale battery packs for electric vehicle applications can generate several cubic meters of pure flammable gases, and, if properly mixed with air, they can generate several tens of cubic meters of a flammable mixture. The resulting flammable mixture can combust as flash fire or generate an overpressure event depending on the ventilation conditions as well as the presence of confined or congested areas (i.e. due to the presence of wreckage) in the tunnel. The potential for overpressure events becomes higher for fire loads involving large battery pack cargos, where the amount of vented gas could be substantial. But even if this kind of flash fire or overpressure is theoretically possible, it is highly improbable in practice. Indeed, it requires that the fire vaporises quickly the whole electrolyte then ignites the cloud created. Or, due to the battery configuration (cells and packs) and real fire propagation, there will rather be successive vaporisation and inflammation of small amounts of electrolyte.

Willstrand et al. [10] combined the data from their battery and vehicle fire tests and found a linear relationship between the peak heat release rates and the energy stored in the battery. It should be noted, however, that the logarithmic representation of the ordinate simulates accuracy and does not reflect the large range of fluctuation, especially at high energy densities.

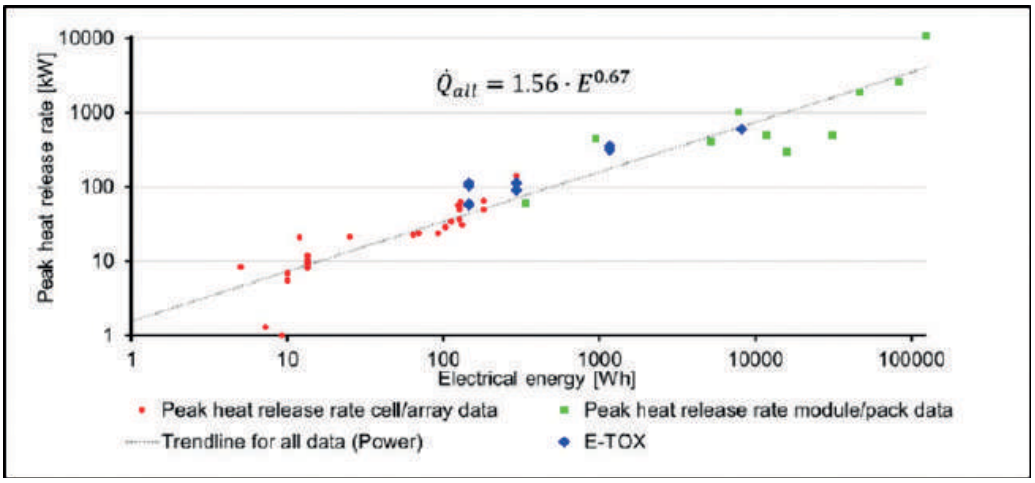


Figure 3: Peak heat release rates as a function of the energy stored in LI-Ion batteries, [10]

Full scale tests for passenger cars were performed in investigations by Lecocq et. al [13], Lam [14] and Willstrand et al. [10]. According to these tests performed by Lecocq et. al [13] the characteristics of the burning behaviour and the heat release rate of the tested vehicles do not differ significantly (see Figure 4) between ICE and EV.

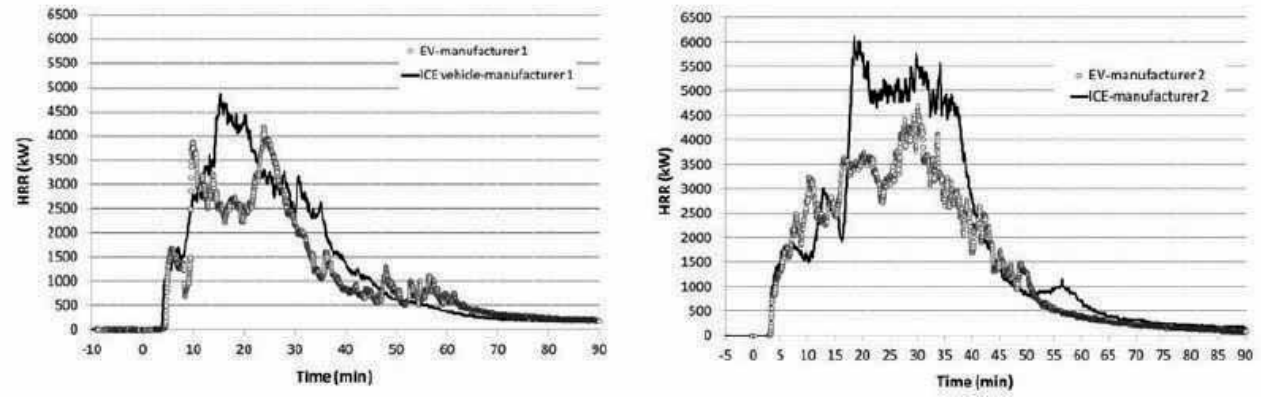


Figure 4: Heat release rate of conventional cars (solid line) and BEV (dotted line) of two different manufacturers, [13]

Willstrand et al. [10] tested three different vehicles, one ICE full-size van, model year 2011, a BEV full-size van with a 40 kWh battery and model year 2019 (BEV A) and a 2016 BEV family car with a 24 kWh battery (BEV-B). Figure 5 depicts the results of the heat release rate (convective part). Vehicle size of the ICE car and the BEV A are similar, the max. HRR differs, peaking at 7 MW for the BEV and around 6 MW for the ICE. According to the test report, the effective heat of combustion in MJ/kg was almost equivalent for both full-size vans, whereas that of the BEV family car was considerably smaller.

It has to be noted that the air flow rate during these tests was around 24 m^3/s (at 20°C) which is in the range of 10 to 20% of standard fire ventilation rates. Hence it is expected that in tunnel situations with a higher volume flow rate peak heat release rates may be higher and the burning duration shorter.

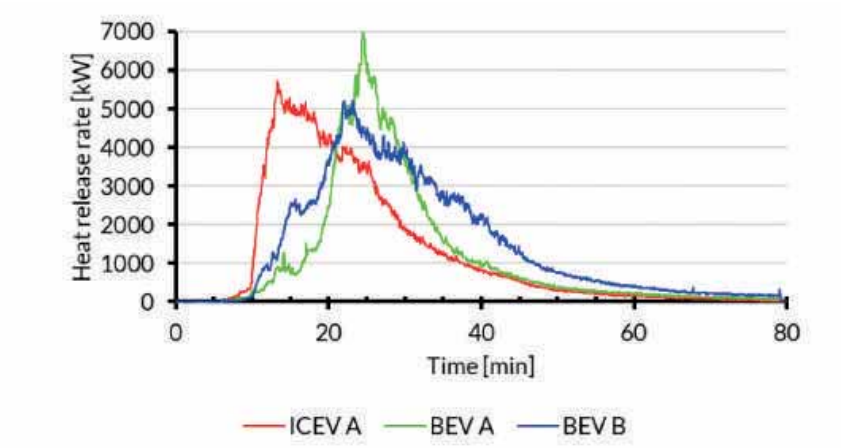


Figure 5: Heat release rate of a conventional car (red line) and BEVs (blue and green line), [10]

Full scale fire tests in a road tunnel were performed in the framework of the BRAFA research project [15],[16]. Two ICE PCs and 3 BEVs were burned in a road tunnel in the tunnel test facility Zentrum am Berg (ZaB) [17] in Austria. Two of the BEV vehicles were model year 2020, one family car and one SUV, both with an 80 kWh NMC battery and one light duty vehicle model year 2016 with a 24 kWh LMO battery. For comparison purposes, an identical 2020 model year SUV and an equivalent light commercial vehicle, both with a combustion engine, were also included in the tests.

Figure 6 shows the convective HRR derived from temperature measurements up and downstream the fire site for a compact car BEV with an 80 kWh LMO battery at 100% SOC. The fire was ignited by an externally tri-

ggered thermal runaway in the battery compartment. The HRR peaked at around 7 to 8 MW, the average HRR was in the range of 2.7 MW.

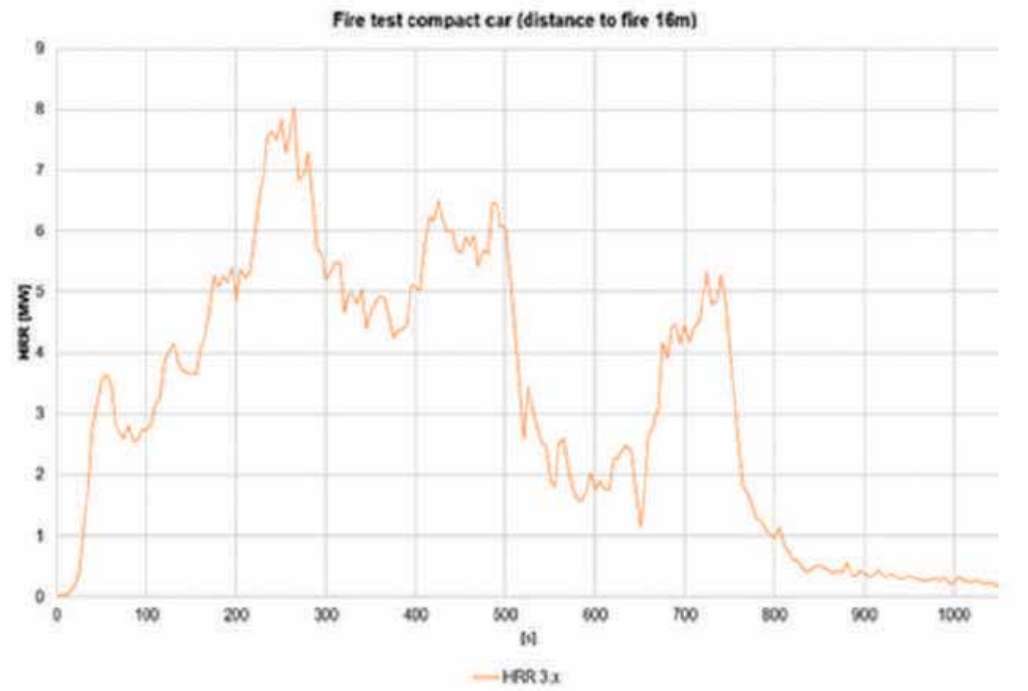


Figure 6: Heat release rate of a BEV with an 80 kWh NMC battery, [15]

Figure 6: Heat release rate of a BEV with an 80 kWh NMC battery, [15]

Figure 7 shows the HRR for two identically built SUVs, one propelled by a diesel fuelled ICE, the other one with an 80 kWh NMC battery at 100% SOC. In both cases the fire source was ignited at the rear seats. However, it has to be mentioned that in the case of the BEV the battery didn't get involved in the fire for the first 800 s (full voltage in all cells of the battery). As the fire already degraded, a thermal runaway in the battery was triggered by injecting a saline solution into the battery casing. This resulted in a very quick thermal reaction of the whole battery and in an extreme quick increase of the HRR within a short time. While in the case of the ICE the max. HRR didn't exceed 5 MW, the BEV HRR peaked at 9 to 10 MW. It has to be mentioned that the external ignition of multiple cells of the battery resulted in an extreme and maybe unrealistic quick increase of the HRR. Nevertheless, it showed the potential of a BEV fire as soon as the battery is fully involved into the burning characteristics. However, the test also showed that although the vehicle already burned for more than 10 minutes, the battery was still not involved in the fire. This shows that the internal cooling of the batteries of modern BEVs has been strongly improved.

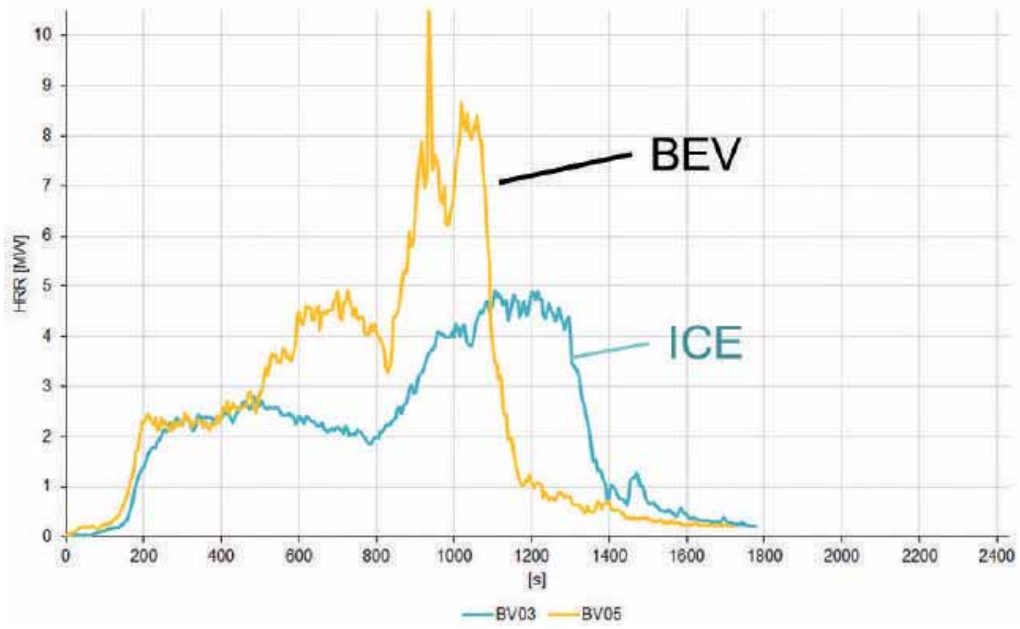


Figure 7: Heat release rate for two almost identical SUVs, ICE and BEV with an 80 kWh NMC battery, [15]

4.1.2. Toxic gases

The biggest threats for tunnel users captured by a vehicle fire in a tunnel are the toxic gases. While for conventional cars gases like CO, CO2, HCl and HN form the critical components, BEV vehicles with Li-Ion batteries add hydrogen fluoride (HF) as a very critical component. Research on single Li-ion pouch cells came up with CO, CO2, H2 and many different HC as vented gases as a result of the thermal runaway, i.e. before any combustion activity [11]. The remarkable amount of HF in the flue gases was confirmed by experiments with BEV fires [13]. Tests with full battery elements showed that metals like cobalt, lithium, manganese but also F-aerosols, HF and Phosphine (Ph3) are to be found in relevant amounts as flue gases [12]. Measurements performed in the framework of the ETOX project [10] showed a clear dependency of the HF-emission quantity from the electrical energy stored in modern batteries. On average the production rate was found to be in the range of 300 mg/Wh.

There are far fewer well-documented full-scale vehicle fire tests than tests on batteries. As with battery fires, the pollutant hydrogen fluoride HF is the additional critical component in BEV fires. It should be noted, however, that HF - although at high concentrations but of very short duration - also occurs in conventional vehicle fires, due to the evaporation/combustion of the air conditioning coolant. In BEV fires, however, there is a second noticeably longer-acting emission period.

The quantitative data for these gases vary noticeably between the individual tests depending on the chemistry used in the battery, but qualitatively it can be stated that relevant concentrations are to be expected. HF was detected in relevant doses in the tests carried out in 2012 at INERIS [13] and as part of the E-TOX project [10]. Willstrand et al. [10] lists the measured HF emission levels of different experiments (Figure 8). The scatter of the measured values is very high. A trend is not discernible. Compared to the data published by INERIS [12], the current cell chemistry appears to release significantly less HF. HF measurements for BEV with 80 kWh batteries performed in the BRAFA project [15] confirmed the trendline derived from the ETOX tests.

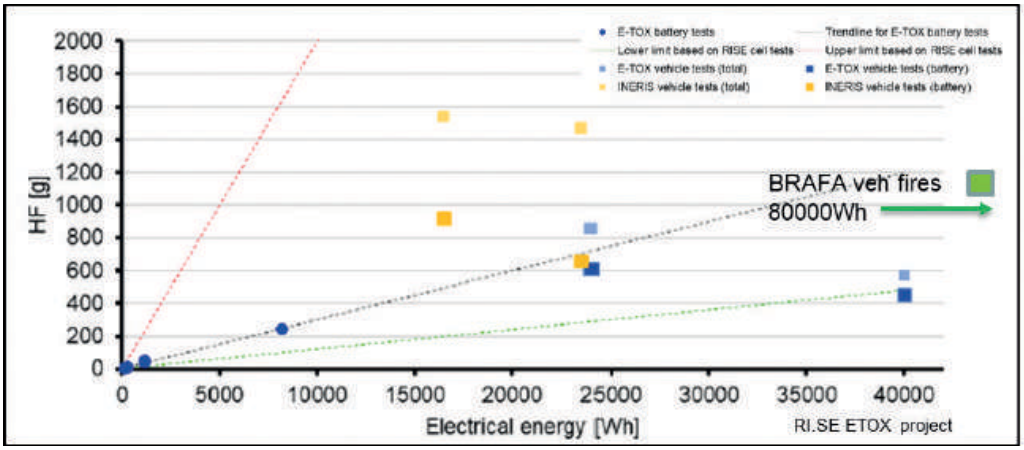


Figure 8: HF-Emission quantity as a function of the energy stored in LI-Ion batteries,[10], extended by results from [15]

Gas and particle measurements performed in the Framework of the BRAFA project [15] were intended to simulate full scale vehicle fires in a typical tunnel environment. Measurements were performed at different locations inside the tunnel. Mechanical ventilation was applied which produced an air speed in the tunnel of 1.5 to 2 m/s. Figure 9 depicts as an example the results from a full-scale test of a SUV with a 80 kWh NMC battery at a distance of 16 m downstream of the fire. The profiles of CO are at a height of 6.4m (sensor 2.1), 4.8 m (sensor 2.2) and 1.6 m (sensor 2.3) above road surface. The temperature values are given for the soffit (T2.1) as well as for 6 m (T2.4) and 2 m (T2.8) above road surface. Neither the CO concentration nor the temperature values reached critical values in the region up to 2 m above road surface.

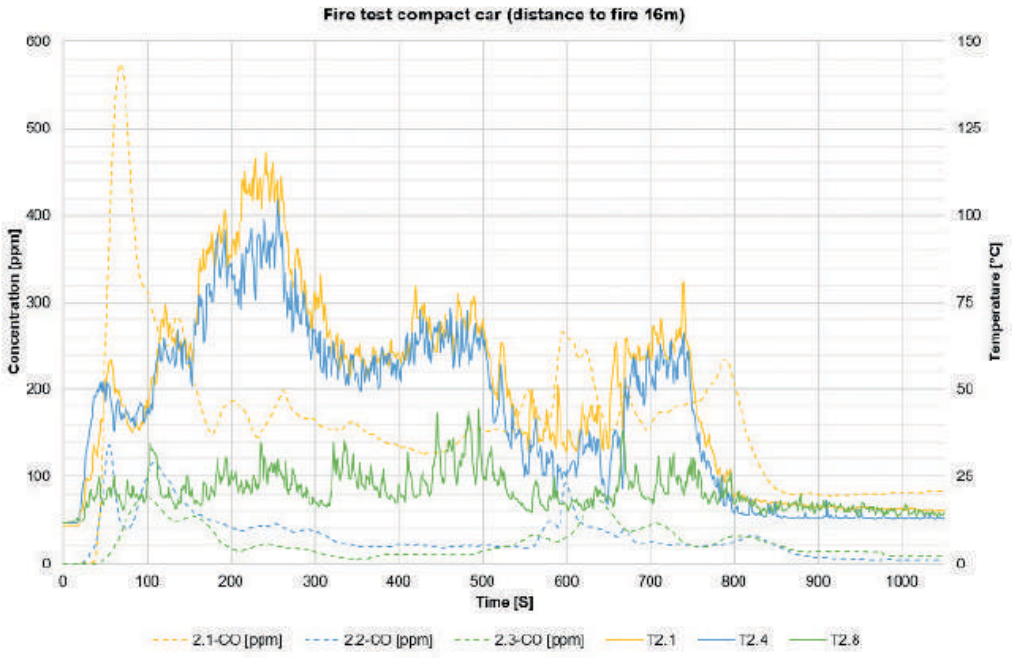


Figure 9: BEV fire test; vertical temperature distribution and CO concentration, 80 kWh battery, [15]

Table 3 shows the concentration values of different pollutants measured during the fire test of BEV with an 80 kWh battery. When comparing with the IDLH 30 (immediate dangerous to life and health, 30-minute exposure time) values as health criteria, it can be seen that for the two BEVs with 80 kWh batteries the threshold va-

lue for HF was violated within the smoke layer, but at a height of 1.6 m above road level (i.e. the relevant region for a tunnel user) the measured values were always far below the critical values.

Table 3: Pollutant concentrations of full-scale BEV and ICE fires at 16 m downstream the fire location at different heights above road surface, [15]

Test-Nr.	HCl [mg/m³]			SO_2 [mg/m³]			H_3PO_4 [mg/m³]			HF [mg/m³]		
Location	16 m downstream fire location											
Height	6.4 m	4.8 m	1.6 m	6.4 m	4.8 m	1.6 m	6.4 m	4.8 m	1.6 m	6.4 m	4.8 m	1.6 m
BV01 (BEV), 80 kWh	61.8	31.0	4.4	2.8	14.3	1.5	2.5	1.3	0.3	38.4	10.3	13.5
BV02 (BEV), 24 kWh	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
BV03 (ICE), diesel	61.2	32.1	0.9	0.9	3.0	0.5	0.1	0.1	0.1	8.3	3.2	0.7
BV04 (ICE), diesel	n/a	6.3	n/a	n/a	3.7	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	*	n/a
BV05 (BEV), 80 kWh	18.8	35.0	2.6	0.5	9.3	0.7	n/a	n/a	n/a	17.3	20.1	5.3
IDLH-30		81			286			1092			27	
n/a = not analysed * = below detection limit												

4.2. Fuel cell electric vehicles

FCEV vehicles (often called hydrogen vehicles) combine the benefits of a high energy carrier (H2) with the possibility of achieving reasonable travel distances, also for heavy vehicles. Polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells are the current technology in use in road transport systems.

Figure 10 depicts the relevant parts for propelling a FECV vehicle. The safety relevant components are the H2 tank system, the high voltage battery (400 V) and the fuel lines towards the fuel cell.

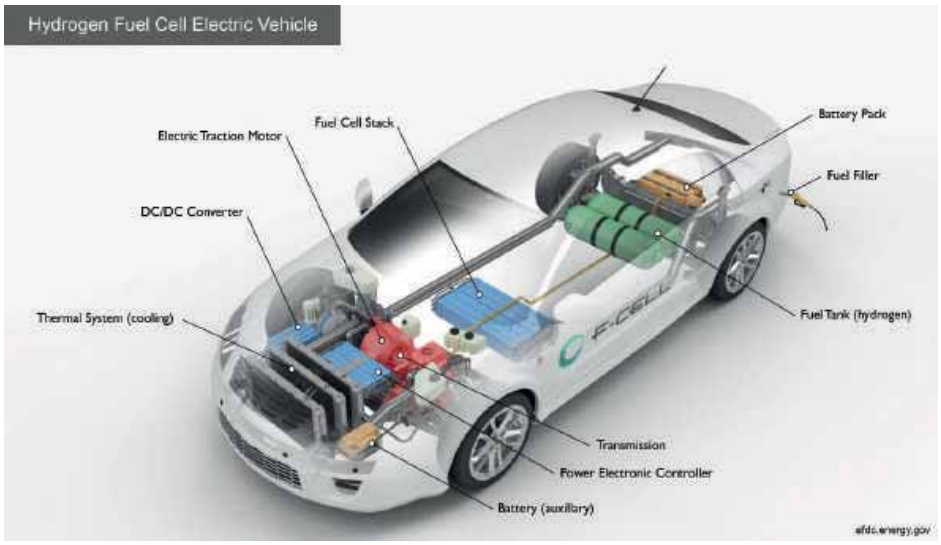


Figure 10: Key components of a FCEV, [18]

The risk concerning FCEV is twofold. As in such a case the electric motor requires high voltage and the electricity is produced by the fuel cell using stored hydrogen, the safety aspects of an e-vehicle meet with the safety threats of the H2 storage and fuel lines. The safety requirements for the storage system (hydrogen pressure

vessel) are quite robust and more stringent than safety standards for CNG tanks [19] which can be explained by the pressure differences (350-700 bars for H2, 200 bars for CNG). In the case of light vehicles, tanks are generally positioned under the vehicle. In the case of heavy goods vehicles, they are also positioned in the lower part, commonly behind the driver's cab. In case of buses they are located on the top of the vehicle.

In Figure 11 the safety related parts of a powertrain of a FCEV are shown. The effects of failures or malfunctioning safety systems range from fire and explosion to electric shocks due to the high voltage (400 V).

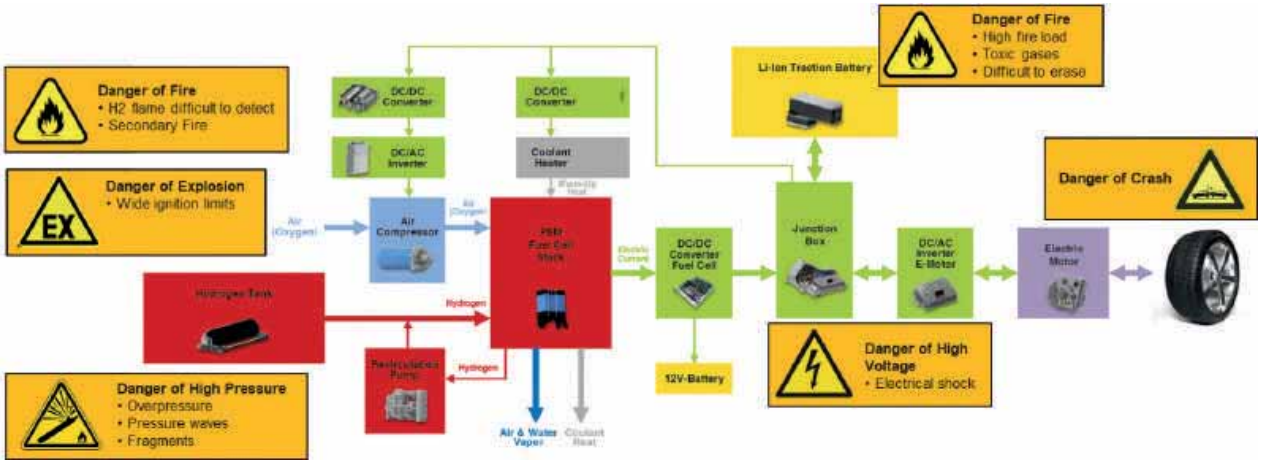


Figure 11 : Hazards of a FCEV powertrain, [22]

The hazards related to the battery are as described in the section of this paper related to BEV, although the battery size is smaller compared to a BEV. It is around ten times smaller when the propulsion is mainly based upon the fuel cell, and two times smaller when the propulsion is mainly base on the battery and the fuel cell mainly used to charge the battery (range extender technology).

Due to its wide ignition range (4 to 76 % Vol) and its detonation range (18 – 59 % Vol), hydrogen poses a particular risk in enclosed facilities. The minimum energy of 0.17 mJ required for igniting H2 causes in most situations a fire rather than an explosion.

External heating of the H2 tank will result in a concentrated release of H2 and a jet flame. A thermally activated fuse (TPRD) at every on-tank-valve shall prevent a rupture of a tank cylinder by over-pressure caused by rising temperatures due to e.g. a fire. A rupture of the tank as a consequence of an incident is considered to be very unlikely, due to current safety standards in the design and manufacture of tanks. A malfunction of a TPRD could lead to a rupture of a tank followed by an explosion. General safety instructions in case of a fire from escaping gas are: do not extinguish until leak can safely be removed and remove all ignition sources if safe to do so.

Any rupture of a fuel line between receptacle and tank on one side and tank and fuel cell on the other side would lead to a release of a relatively limited amount of H2 as a pressure drop-triggered valve immediately closes the connection between tank and fuel line.

In case of accidental release of the gas, for example following a collision, four main phenomena could occur with differences in terms of users' consequences: Fire, jet fire, vapor cloud explosion (VCE) or tank rupture.

As in traditional vehicles, a fire may concern a hydrogen vehicle. Assuming the TPRD works correctly, a jet fire will break out during the vehicle fire. Any leakage of hydrogen from the tank or the fuel lines may result in a jet flame if the required (very low) ignition energy is provided by a hot source in the immediate vicinity of the leakage. A VCE may occur if no ignition source is present in the immediate vicinity but a gas cloud is formed and encounters such an ignition source.

Assuming a TPRD malfunctions in a situation of engulfing fire, a tank rupture is likely to occur. Current tank technology is based on full composite gas cylinders (type 4), primarily made from carbon composite with a polymer liner. The polymer lining tends to lose impermeability when being exposed to high temperatures, making such a cylinder prone to leakage. This downside turns to a benefit in case of a fire as gas is released which reduces the probability of a tank rupture.

The 2020 SANDIA report [20] summarises the results from investigations related to the use of hydrogen in vehicles. The results of model tests concerning the release of H2 in tunnels [27] showed that a 9.5% homogeneous hydrogen mixture produced pressure pulses that were too small for sensors to detect. When the hydrogen content in the mixture was increased to 20% and 30%, the pressure pulses measured 35 kPa and 150 kPa, respectively. Comparing to information provided in [28] an overpressure of 35 Pa corresponds to 'serious wounds from flying glass near 50% probability' (40 kPa overpressure is the threshold value for body-wall penetration from flying glass and 43.4 kPa corresponds to 50% probability of eardrum rupture). An overpressure of 150 kPa is already in the range of >50% probability of fatality from direct blast effects. The model tests showed also that the presence of vehicles had an insignificant effect on the deflagration as shown by the pressure pulse, but that ventilation during a release reduces the hazard dramatically. Grothe et al. [27] also mentioned, that the amount of hydrogen stored in a standard tank and released through a source like the TPRD will produce very lean hydrogen concentrations which are assumed to create very small pressure pulses.

Vapour cloud explosions in open space were investigated by Royle et al. [29] in an experiment. The effects of a VCE of a hydrogen-air mixture at a stoichiometric ration of 1.2 (reported to produce the highest overpressure) stored in a 3 x 3 x 2 m cube was investigated. Figure 12 shows the test site.

Figure 12: Set-up of the hydrogen VCE test, [29]

In the near field, values were well over 100 kPa and dropped to less than 20 kPa some 30 m away. However, as the authors noted, a premixed region of 18 m^3 hydrogen-air are unlikely to occur in a tunnel.

In order to overcome the problem of having no real test data of hydrogen release from FCEV in tunnels, CFD based numerical calculations were performed by multiple persons. Middha and Hansen [30] investigated the

explosion risk of hydrogen vehicles (bus and PC) in tunnels. The bus had 8 cylinders with a capacity of 5 kg H2 at 350 bar each while the PC had one cylinder with 5 kg H2 at 700 bar. Two different tunnels, one with a horseshoe profile (60 m^2) the other one with a rectangular profile (50 m^2) and a length of 500 m each were investigated. From the coupled dispersion combustion simulations, it is predicted that overpressure values can produce minor damage to people and property within the tunnel. As described in the SANDIA report [20] the data produced in the CFD calculations were combined to create a frequency of exceedance curve for overpressures during combustion of gaseous hydrogen clouds. Overpressure values outside the hazardous range (defined as less than 0.1 bar) are much more likely than higher overpressures that can be hazardous to tunnel occupants.

Current research within the HyTunnel-CS project deals with the risks related to hydrogen usage in tunnels in general and of FCEVs on fire in particular [23], [25]. Primary findings presented in Marakov D et al. [25] were:

- Mechanical ventilation promotes hydrogen mixing and reduces hazard distance defined by the lower flammability level (LFL)
- TPRD release direction at the angle 45° deemed to have overall smallest flammable hydrogen envelope
- The effect of a hydrogen jet fire on design HRR was found to be negligible for small TRPD diameters (< 2 mm).
- The use of a fibre-reinforced composite material which loses its tightness when exposed to higher temperatures in order to allow leakage, instead of a standard tank with TPRD can avoid tank rupture, long jet flames or fire balls as well as pressure peaking phenomena due to blast waves.

Quantitative results from the HyTunnel-CS project are expected to be presented during their final conference in July 2022.

4.3. Fossil gas and biogas powered vehicles

Natural gas (mainly based on methane) can be either stored as compressed natural gas (CNG) or liquified natural gas (LNG). They are chemically identical (mostly methane). Non-fossil alternatives, generally referred to as biogas (compressed or liquified), are also very similar chemically. CNG is stored at a maximum pressure of 200 bar while LNG needs to be cooled down and stored in cryogenic tanks at around -130°C at 10 bar. Standard safety elements for a CNG tank are an electromechanically triggered gate valve, which closes the fuel line as soon as the engine is stopped or an incident detected. A TPRD is activated as soon as a temperature of 110°C (+/- 10°C) is exceeded. Although not required by law, many brands are additionally equipped with a pressure activated pressure relief device (PPRD), backed up by a bursting disk in case the PPRD fails. LNG tanks have more or less the same safety features as CNG, with the exception of the TPRD. A PPRD as well as a burst disc are mandatory. A boil-off of LNG happens as soon as the tank pressure exceeds 16 bar. In such cases the gas will be released via a venting pipe in the rear of the driver's cabin (HGV).

Liquified petroleum gas (LPG or autogas) consists mainly of propane and butane and is stored in a compressed liquid form at 10 bar (at 20°C). Standard safety elements in LPG cars are overpressure devices which are activated automatically at a pressure of 27 bar and close automatically as soon as the pressure in the tank is back to standard conditions. An electromechanically controlled shut-off valve closes the fuel line as soon as the engine is stopped or an incident detected. Some cars are also equipped with a TPRD.

Concerning CNG (and compressed biogas) vehicles jet fires or fires from leaking gas from the fuel line may be a source of risk. According to Zalosh et al. [31] due to the high storage pressure and the small flammable range, the chance of an ignition of leaked gas is low. In case of vehicle fires engulfing the tanks, the TPRD will open resulting in a pronounced jet flame. Modeling CNG jet fires done within a CETU-INERIS study [33] concluded, that only the scenario with a bus with 8 tanks á 9 kg CNG on fire and the jet fire triggered while users were still evacuating the bus lead to lethal effects.

Concerning CNG, modelling has shown that in case of jet fire following a fire, the only dangerous situation is a bus in the right lane (near the wall) and TPRD oriented horizontally. In this case, the TPRD are located on the upper part, so a jet fire could be triggered while users are still evacuating. This could subject to lethal effects (T°>120°C) to all bus passengers

In case of a failure of the TPRD and (if available) the PPRD, a tank rupture might happen. It has to be mentioned that a failure of both of the safety elements is very unlikely. However, work performed at RISE [32] demonstrated that also CNG containers with proper working TPRD might explode in case of a severe vehicle fire.

In case of LNG, the situation gets a little bit more complicated. LNG releases can also produce flammable vapor clouds. Due to the larger amount of LNG stored in a vehicle these clouds have the potential to be bigger. In case of a release of LNG at the bottom of a vehicle it was concluded in the SANDIA report [21] that a liquid pool may form prolonging the dissipation period and reducing buoyant dispersion. These factors increase the chance of ignition by a source on the ground. LNG comes with the risk of a boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE). Such events result from very quick heating of super cooled liquids which result in a rapid change in phase when the volume increase is quicker than the rate of the blown-off gas volume flow via any valve.

5. EMERGENCY INTERVENTION

In case of an incident, vehicles powered by NEC may need to be treated differently compared to conventional vehicles. As long as the registration plate is visible, identification is possible using information provided via apps like the Crash Recovery System (CRS). However, the access to such services is quite often not given. The ISO 17840 standard "Road vehicles – information for first and second responders" shall improve this situation. General information about rescue operations for NEC vehicles is given in [24]. Some tests have been performed by fire brigades on individual bases and limited research concerning fire fighting of NEC vehicles has been carried out recently. There is limited information and experience available concerning emergency intervention for fires involving BEV and FCEV.

5.1. Battery electric vehicles

A critical issue for BEVs is the fact that a battery fire cannot be easily extinguished, as the oxidation process goes on, even without any external supply of oxygen. The only way to stop the fire is to cool the batteries. Colella et al. [11] reported, that up to 10 m^3 of water were needed to extinguish the fire, i.e. to cool the batteries. This quantity is confirmed by various manufacturers of e-cars in their vehicle safety cards for fire brigades. As there is a remarkable risk of re-ignition of e-cars even after they have been cooled down, such vehicles may need to be kept in special locations and monitored for several days (up to 14 days). Field tests done in the framework of the BRAFA research project demonstrated the positive effect of a direct injection of water into the battery casing [15]. In such a case the amount for controlling a BEV fire is strongly reduced.

Vehicle recovery for damaged BEVs is a special matter of concern. According to various national regulations, damaged batteries may be treated as dangerous goods in transportation. Currently, damaged Lithium batteries, in some countries, must be transported according to the ADR 2015 P908/LP904 regulation. In addition ADR exemption 1.1.3.1 (d) applies, which allows towing of the broken-down vehicle to the next appropriate safe place by competent authorities for the emergency response or under their supervision. The transport of damaged EV may be restricted to companies with a special license. Amendments concerning the handling of damaged BEV or batteries are in discussion [26].

5.2. Fuel cell electric and gas vehicles

For FCEV, both the high-pressure storage tank and the battery need special consideration. Since the batteries are smaller than those of BEVs, the statements made for BEVs apply to a lesser extent.

Concerning the fuel storage tank, the intervention issues for FCEV and CNG vehicles are similar. The only difference is that the ignition ranges of released H2 are much wider than that of CNG. Due to the high storage pressure, the jet flame resulting from burning hydrogen released via the pressure relief valve is even more pronounced. In general, the hydrogen venting position is towards the ground. Due to the high pressure and the low molecular weight, a quick dispersion and dilution of the vented gas can be expected.

Advice from car manufacturers is not to extinguish any hydrogen flame, as, in general, after a few minutes all fuel is already burned. As hydrogen flames are almost invisible secondary fires may occur.

For all currently available FCEV, emergency response guides exist which describe the procedures for intervention in case of an incident. Clear guidance is given for power supply shut-down as well as for cutting areas for passenger recovery.

6. PENDING TOPICS

Until now, hazards associated with conventional vehicles have provided the benchmark for the definition of safety standards and system requirements in road tunnels, as well as governing the relevant design parameters for the tunnel structure and also for equipment like ventilation and detection systems. As discussed in the sections above, the introduction of NEC vehicles may have implications on existing standards, design parameters and intervention strategies.

This may concern topics such as the following which need to be considered in design in the context of the increasing presence of NEC vehicles on the roads:

- Structure: fire characteristics, effects of explosions
- Ventilation: design, operating strategy
- Sensors: fire detection, toxic gases
- Fire suppression: extinguishers, fixed firefighting systems
- Firefighting: vehicle identification, firefighting strategy
- Drainage system: waste water collection and treatment, fire traps
- Impact on materials for structure and equipment
- General tunnel operation and emergency planning
- Risk assessment and tunnel safety levels
- Etc.

Research to some of these topics has already been performed, e.g. impact on risk assessment [3], [4]. PIARC TC 4.4 WG4, for the 2019-23 cycle of work, will progress and summarize the findings of these current studies and include them in the final report. According to PIARC's timetable, the work shall be finished in the first months of 2023 and the published report available in the second half of 2023

Acknowledgements

This paper is based on the work performed within WG4 of the Technical Committee 4.4 within the current PIARC working cycle. Currently, a full report concerning the impact of NEC on road tunnels is in preparation. Information from the working version of the WG4 report provided by Christoph Willman (CETU), Jonathan Gehandler (RISE) and Carlo Barbetta (Systemair) as well as from other active members of WG4 was partly used in this paper. Special thanks to Antoine Mos (CETU) and Ignacio Del Rey (Typsa) for the abstracts in French and Spanish.

7. REFERENCES

[1] PIARC; Impact of new propulsion technologies on road tunnel operations and safety case studies, Technical Committee TC4.4 – Tunnels, report 2022R05EN, www.piarc.org, 2022

[2] Hydrogen Council; Vision Document 2017, www.hydrogencouncil.com

[3] Schmidt, R., Lehan, A., Fößleitner, P., Kammerer, H.; Influence of alternative energy carriers on tunnel safety – a quantitative consequence analysis, In. Proceedings of the 11th Conference Tunnel Safety and Ventilation, 2022 Graz, Austria

[4] Kohl B., Kammerer H., Heger O., Schmidt R., Sturm P., Fößleitner P., Einfluss von Fahrzeugen mit neuen Antriebstechnologien auf die Tunnelsicherheit, FE 15.0675/2020/ERB, project report, Bundesanstalt für Straßenwesen, Deutschland (publishing in progress)

[5] https://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/ (accessed March 31st 2022)

[6] AUDI AG, https://www.audi-mediacenter.com/en/photos/detail/audi-e-tron-sportback-55-quattro-87493 (accessed May 25th 2022)

[7] D. H. Daughty und P. E. Roth, „A General Discussion of Li Ion Battery Safety," The Electrochemical Society Interface, 2012

[8] S. Hess, M. Wohlfahrt-Mehrens und M. Wachtler, „Flammability of Li-Ion Battery Electrolytes. Flash Point and Self-Extinguishing Time Measurements.," Journal of the Electrochem. Soc., 2014

[9] C. Mikolajczak, M. Kahn, K. White und R. T. Long, „Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment, Final Report," Exponent Failure Analysis Associates, Inc. - The Fire Protection Research Foundation, 2011

[10] Willstrand, Ola; Bisschop, Roeland; Blomqvist, Per; Temple, Alistair; Anderson, Johan; Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles; RISE Report 2020:90; ISBN: 978-91-89167-75-9 (electronic); 2020

[11] Colella F, Biteau H., Ponchaut N., Marr K., Somandepalli V., Horn Q, Long R., Electric Vehicle Fires, Proceedings of the Seventh International Symposium on Tunnel Safety and Security, Montreal, Canada, 629-636, 2016

[12] Mellert L.D., Welte U., Hermann M., Kompatscher M., Ponticq X., Electric Mobility and Road Tunnel Safety, Hazards of Electric Vehicle Fires; Proceedings of the ninth International Symposium on Tunnel Safety and Ventilation, 221-228, Graz, Austria 2018

[13] Lecocq A., Bertana M., Truchot B., Marlair G., Comparison of the fire consequences of an electric, Boras: 2. International Conference on Fires In Vehicles FIVE, 2012

[14] Lam C. M., Full-Scale Fire Testing of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles. In Proceedings from 4th International Conference on Fires in Vehicles – FIVE, 2016

[15] Sturm P., Fößleitner P., Fruhwirt D., Heindl S., Heindl S., Heger O., Galler R., Wenighofer R., Krausbar S., BRA-FA – Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen, DOI: 10.3217/8vj91-gc832, data: DOI: 10.3217/ysgwn-3a318; 2021; https://projekte.ffg.at/projekt/3290205 (accessed 28. May 2022);

[16] Sturm P., Fößleitner P., Fruhwirt D., Schirmer A., Reinwald B., Küchbacher M., Wenighofer R., Heindl S., Nöst T., Leonhardt P., Hödl A., Krausbar S., Brandversuche mit E-Fahrzeugen in Tunnelanlagen, Berg Huettenmaenn Monatsh, https://doi.org/10.1007/s00501-020-01054-2, Springer Verlag, 2020

[17] ZaB: Tunnel Test Facility Zentrum am Berg www.zab.at/en (accessed 31. May 2022)

[18] https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work; accessed March 31st 2022

[19] LaFleur C.B., Muna A.B., Ehrhart B.D., Bran-Anleu G., Blaylock M., Houf W.G., Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle Tunnel Safety Study, Sandia report SAND 2017-11157, Sandia National Laboratories, 2017

[20] Glover A. M., Baird A.R., LaFleur C.B., Hydrogen Fuel Cell Vehicles in Tunnels, Sandia report SAND 2020-4507 R, Sandia National Laboratories, April 2020

[21] LaFleur C.B., Glover A.M., Baird A.R., Jordan C. J., Ehrhart B.D., Alternative Fuel Vehicles in Tunnels, Sandia report SAND 2020-5466, Sandia National Laboratories, 2020

[22] Trattner A., Safety aspects related to Fuel Cell Vehicles, International Conference on Tunnel Safety and Ventilation, Graz, Dec. 1st to 3rd 2020, www.tunnel-graz.at/archive (accessed December 15th 2020)

[23] Hytunnel-CS; https://hytunnel.net/, accessed May 31st 2022

[24] Gehandler J., Karlsson P., Vylund L., Risks associated with alternative fuels in road tunnels and underground garages, SP Report 2017:14, ISSN 0284-5172, 2017

[25] Makarov D., Molkov V., Preliminary results from the HyTunnel-CS project, Webinar on New Energy carriers in Road Tunnels, 21-22 October 2021, PIARC, ITA-COSUF, KTP, http://ita-cosuf.org/index.php/blog/item/40-report-on-piarc-ita-cosuf-kpt-webinar-on-new-energy-carrier-in-road-tunnels-20-21-october-2021, accessed May 30th 2022

[26] UN/SCETDG/49/INF.12, Transport of damaged/defective lithium batteries, Step I, Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals, Sub-Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods, 12 May 2016

[27] Grothe M., Merilo E., Colton J., Chiba S., Sato Y., Iwabuchi H., Large-scale Hydrogen Deflagrations and Detonations, in Int J Hydrogen Energy, vol. 32, no. 13, pp. 2153-2133, 2007

[28] National Fire Protection Association, NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations, Quincy, USA, 2017

[29] Royle M., Shirvill L., Roberts T., Vapour cloud explosions from the ignition of methane/hydrogen/air mixtures in a congested region, in International Conference on Hydrogen Safety, 2007

[30] Middha P., Hansen O., CFD Simulation Study to Investigate the Risk from Hydrogen Vehicles in Tunnels, Int J Hydrogen Energy, vol. 34, pp. 5875-5876, 2009

[31] Zalosh R.G., Amy J., Hofmeister C. E., Wang W., Dispersion of CNG fuel releases in naturally ventilated tunnels, Center for Firesafety Studies, Worcester Polytechnic Institue, vol. 1, 1994

[32] Gehandler J., Lönnermark A., CNG vehicle containers exposed to local fires, RISE Rapport 2019:120_rev1

[33] Willmann C., Truchot B., new energy carriers and additional risks for user's safety in tunnels, International symposium on tunnel safety and security, 5-7 May 2021

QUANTITATIVE RISK ASSESSMENT APPROACHES FOR NEW VEHICLE PROPULSION ENERGY CARRIERS IN ROAD TUNNELS

Bernhard Kohl[1], Oliver Heger[1], Anne Lehan[2], Patrik Fößleitner[3]
[1] ILF Consulting Engineers Austria GmbH, Austria
[2] Bundesanstalt für Straßenwesen, Germany
[3] Graz University of Technology, Austria

With an increasing share of alternative propulsion energies, potential effects of these systems on the road infrastructure become an important issue. One question that has been investigated in the recent years is the potential impact on tunnel safety. Meanwhile significant knowledge about the physical consequences in case alternative energy carriers are involved in a tunnel incident, in particular in a tunnel fire, has been obtained. The paper demonstrates how the relevant new findings on the risk of various vehicle propulsion systems can be implemented in existing quantitative risk assessment approaches. Therefore, the results of recent research activities focusing on consequence modelling of tunnel incidents involving new propulsion energies are presented, and the consequence models, with respect to the impact of such incidents on tunnel users, are implemented in the newly adapted German risk assessment methodology for road tunnels. Precise input data, in particular for incident frequencies with the involvement of new propulsion energies are missing. Nevertheless, the indicative results already demonstrate a future tendency. Incidents with new propulsion energies seem to have a minor influence on the overall risk of modern tunnels, which is typically dominated by mechanical collisions. Fire- and explosion risks for their own, however, appear to increase significantly. A fundamental question arises related to this finding. Is the implement of additional risk mitigation measures in order to mitigate sever consequence of very unlikely events necessary, even though the influence of these measures on the overall risk and therefore their cost-effectiveness might be rather small? In the end, it is up to public authorities and decision makers to resolve this issue, whereby the presented findings and developed tools shall serve as a profound base for decision making.

ENFOQUES DE EVALUACIÓN CUANTITATIVA DEL RIESGO DE LOS NUEVOS VECTORES ENERGÉTICOS DE PROPULSIÓN DE VEHÍCULOS EN LOS TÚNELES DE CARRETERA

Con una proporción cada vez mayor de energías alternativas de propulsión, los efectos potenciales de estos sistemas en la infraestructura vial se convierten en un tema de relevancia. Una cuestión que se ha investigado en los últimos años es el potencial impacto en la seguridad de los túneles. Mientras tanto, se ha obtenido un conocimiento significativo sobre las consecuencias físicas en caso de que los vehículos impulsados con energías alternativas se vean involucrados en un incidente en un túnel, en particular en un incendio en un túnel. El artículo demuestra cómo nuevos hallazgos relevantes sobre el riesgo de varios sistemas de propulsión de vehículos pueden implementarse en los enfoques de evaluación de riesgos cuantitativos existentes. Por lo tanto, se presentan los resultados de actividades de investigación recientes centradas en el modelado de consecuencias de incidentes en túneles que involucran nuevas energías de propulsión y los modelos de consecuencias, con respecto al impacto de tales incidentes en los usuarios del túnel, se implementan en la recientemente adaptada metodología alemana de evaluación de riesgos para túneles viales. Faltan datos de entrada precisos, en particular sobre frecuencia de incidentes que involucren nuevas energías de propulsión. Sin embargo, los resultados orientativos ya muestran una tendencia futura. Los incidentes con nuevas energías de propulsión parecen tener una influencia menor en el riesgo general de los túneles modernos, que normalmente está dominado por colisiones mecánicas. Sin embargo, los riesgos de incendio y explosión, por sí solos, parecen aumentar significativamente. Surge una pregunta fundamental relacionada con este hallazgo. A saber: si nuestro objetivo es implementar medidas adicionales de mitigación de riesgos para mitigar las consecuencias severas de eventos extremadamente improbables, aunque la influencia de estas medidas en el riesgo general y, por lo tanto, su rentabilidad podría ser bastante pequeña. Depende de las autoridades públicas y de los tomadores de decisiones resolver este problema, pero con los hallazgos presentados y las herramientas desarrolladas, esta decisión se puede tomar sobre una base bien informada.

APPROCHES D'ÉVALUATION QUANTITATIVE DES RISQUES POUR LES NOUVEAUX VECTEURS ÉNERGÉTIQUES DE PROPULSION DES VÉHICULES DANS LES TUNNELS ROUTIERS

Avec une part croissante des énergies alternatives de propulsion, les effets potentiels de ces systèmes sur l'infrastructure routière deviennent un enjeu important. Une question qui a été étudiée ces dernières années est l'impact potentiel sur la sécurité des tunnels. Depuis lors, des connaissances importantes sur les conséquences physiques dans le cas où des vecteurs énergétiques alternatifs seraient impliqués dans un incident dans un tunnel, en particulier dans un incendie, ont été obtenues. Ce document montre comment les nouvelles découvertes pertinentes sur le risque de divers systèmes de propulsion de véhicules peuvent être implémentées dans les approches existantes d'évaluation quantitative des risques. Par conséquent, les résultats d'activités de recherche récentes axées sur la modélisation des conséquences d'incidents dans les tunnels impliquant les nouvelles énergies de propulsion sont présentés et les modèles de conséquences, en ce qui concerne l'impact de tels incidents sur les usagers des tunnels, sont mis en œuvre dans la méthodologie allemande d'évaluation des risques pour la route récemment adaptée. En particulier pour les fréquences incidentes impliquant de nouvelles énergies de propulsion, il manquent encorde des données d'entrée précises.. Néanmoins, les résultats indicatifs montrent déjà une future tendance. Les incidents impliquant de nouvelles énergies de propulsion semblent avoir une influence mineure sur le risque global dans des tunnels modernes, qui est généralement dominé par les collisions mécaniques. En revanche, les risques d'incendie et d'explosion, quant à eux, semblent augmenter de manière significative. Une question fondamentale se pose en lien avec ce constat : Est-il nécessaire de mettre en œuvre des mesures d'atténuation des risques supplémentaires afin d'atténuer les conséquences graves d'événements très improbables, même si l'influence de ces mesures sur le risque global et donc leurs rentabilités seraient plutôt faibles ? Au final, il est aux pouvoirs publics et aux décideurs de répondre à cette question avec les résultats présentés et outils développés servant de base de décision solide.

1. INTRODUCTION

The dramatic climate changes which already effect communities all over the world evidently call for a rethinking in our energy consumption behaviour and the worlds energy economy. The reduction of greenhouse gas emissions has become an important political goal. At the same time the annually growing number of vehicles and increasing mileage result in a steadily increasing energy requirement. Therefore, one crucial step to achieve climate protection goals on the way to a carbon-neutral future, is the decarbonisation of the transport sector by replacing fossil fuels with climate-friendly alternative propulsion energy carriers.

With an increasing share of alternative fuels, potential effects of these systems on the road infrastructure become an important issue. One question that has been investigated in the recent years is the potential impact on tunnel safety. Several research projects investigated the physical consequences, in case vehicles with alternative energy carriers are involved in a tunnel incident, in particular in a tunnel fire. The two probably most promising emission-free energy carriers, with vehicles already in the series production stage, are Lithium-Ion batteries used in battery electric vehicles (BEV) and compressed gaseous hydrogen (CGH2), used in fuel-cell electric vehicles (FCEV). Therefore, recent research activities have focused on the physical consequences of these energy carriers (Willstrand, 2020), (Lecocq, 2012), (Meller, 2016), (HyTunnel, 2021), (LaFleur, 2017), (Sturm, 2021).

While the behaviour of Lithium-Ion batteries and hydrogen involved in tunnel fires is now understood to a large extent, research on the potential consequences for tunnel users, and further on tunnel risk in general, has only emerged very recently. One major contribution to this research questions has been made by CETU, where the influence on risk due to the increasing share of new-energy-carrier vehicles (NEC vehicles) was treated by the modification and application of a full tunnel risk assessment based on the French tunnel risk assessment methodology (Willmann, 2020). However, energy storage technologies are rapidly developing and additional fundamental research on alternative-energy-carrier behaviour lead to even better understanding of potential hazards.

One major contribution to our understanding of tunnel fires involving BEV using Li-Ion batteries, was made by the BRAFA project. There, full scale fire tests for newest generation BEV where conducted under realistic conditions in a full scale test tunnel in the tunnel research facility "Zentrum am Berg" (ZaB) at the "Montanuniversität Leoben" in Styria, Austria (Sturm, 2021). In this project heat release rates (HRR) and moreover gas concentrations where measured in a completely realistic environment – a full BEV fire in a full scale tunnel with mechanical (longitudinal) ventilation – for the first time. One of the major research targets of the BRAFA project was the quantitative assessment of consequences and risks posed by BEV fires to tunnel users. Therefore, the gas concentrations and temperatures measured during the fire tests where translated into heat release rates and gas yields. The rates where then implemented into the Austrian tunnel risk model TuRisMo.

Another very recent research project, the HyTunnel project (HyTunnel, 2021), is focussing on hydrogen as a climate friendly energy storage for the transportation sector and, among other things, the physical consequences of hydrogen incidents in closed environments, such as tunnels or parking garages. The project is still in progress but the findings and engineering models developed so far, based on CFD- and experimental studies conducted in the scope of HyTunnel, allow to treat Hydrogen incidents in fully quantitative tunnel risk models. A first attempt in developing consequence models based on the findings of HyTunnel was made in the context of the research project FE15.0675/2020/ERB, launched by the German Federal Highway Research Institute BASt (Kohl B. K., 2022). During this project the current knowledge about the whole spectrum of alternative propulsion energies and their potential effect on risk for tunnel users has been surveyed and transformed into quantitative assessment methods, which were then incorporated in the newly adapted German tunnel risk assessment approach (Kohl B. K., 2019).

The BRAFA project as well as the project launched by BASt are based on latest research findings with respect to physical consequences of alternative-energy-carrier fires in tunnels. While BRAFA was focussing on BEV fires, the latter attempts to include all energy carriers into one holistic tunnel risk assessment approach and is

in particular also treating the risk of hydrogen powered vehicles. The remainder of the present paper presents the major findings with respect to tunnel risk assessment, generated in the scope of these two research projects, and documents the used methods. The BEV fire tests as well as the fire consequence model deduced in the BRAFA project are presented in section 2. The qualitative selection of hydrogen scenarios and the mathematical models for their assessment are discussed in section 3. Section 4 discusses the combination of the developed sub-models and presents the results of an exemplary risk study taking available forecasts for the future vehicle fleet into account. The findings of this assessment as well as the validity range of the presented approach and open research questions are finally discussed in section 5.

2. A CONSEQUENCE MODEL FOR BATTERY ELECTRIC VEHICLES

BEV utilize highly efficient electric motors. The electrical energy is stored as electrochemical energy in rechargeable batteries, which are often installed in the vehicle floor, in case of passenger cars, or on the top, in case of busses. One of the major concerns with respect to the operation of BEV in tunnels is the phenomenon known as "thermal runaway", where an inner shortcut in the battery due to external thermal- or mechanical stress on the battery, or overcharging as well as aging effects, lead to an exothermal process, which results in the emission of flammable and highly toxic gases (Sturm, 2021). This phenomenon is well known and the potential effects in terms of heat production and emission of toxic gases have been examined over the last decade on different scales, from battery-cell tests (Larsson, 2017) to fire tests of full BEV in scaled tunnels (Lecocq, 2012) and other enclosed compartments (Kutschenreuter, 2020). However, a comprehensive full scale test under realistic tunnel conditions, in particular with real life tunnel cross-sections, focusing on heat production and toxic-gas emission of BEV from the latest generation was missing. This important knowledge gap was closed in the scope of the BRAFA project.

During the BRAFA project, a quantitative model to assess the consequences of BEV fires in a tunnel has been developed. This consequence model is based on the combination of a one-dimensional flow model, a three-dimensional smoke propagation model and a one-dimensional survivability model. This structure is identical to the structure of typical consequence models for conventional vehicle fires. The specific characteristics of BEV fires where then incorporated in the model by the implementation of model fire curves (HRR time curves) and fire gas emission rates obtained from BEV full scale fire tests carried out in the scope of the BRAFA project. The implementation of the specific BEV characteristics is described in the following.

2.1. Fire Curves for BEV fires obtained from full scale fire tests

Figure 1 depicts the measurement setup for the full scale BEV fire tests carried out in the tunnel research facility "Zentrum am Berg" in Styria, Austria. The measurements in the tunnel cross-section covered longitudinal flow velocity, air temperature, specific gas concentrations – in particular CO, CO2, HCl, HF, H3PO4, NOx and SO2 – and surface deposition of heavy metals. The research project addressed a variety of topics related to tunnel safety, such as structural safety, extinguishing techniques or effects on tunnel equipment, but the focus of the present paper lies on the findings related to passenger safety and in particular tunnel risk assessment.

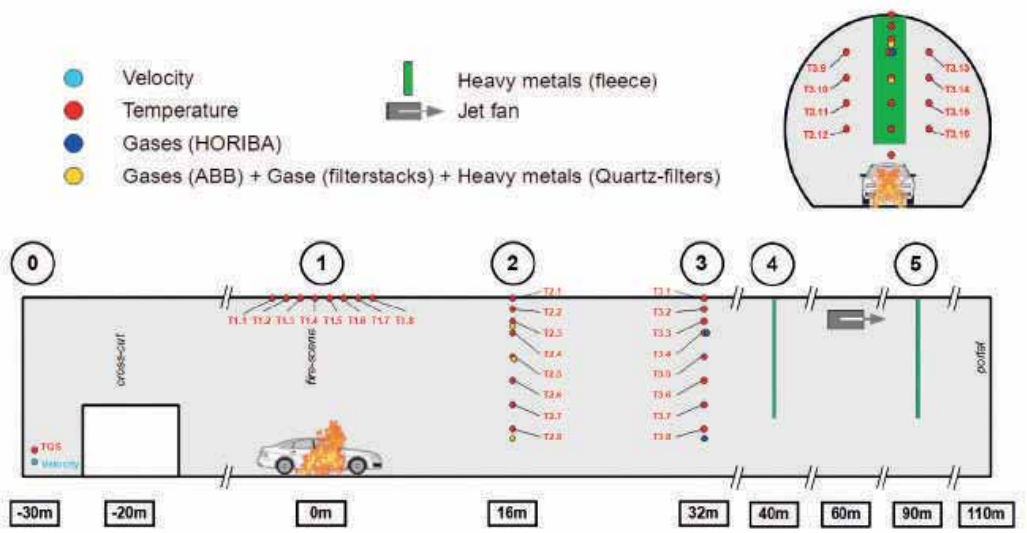


Figure 1: Schematic representation of the BEV fire test setup for the BRAFA project

Out of five full scale vehicle fire tests performed in the BRAFA project, three of them are relevant for this paper:

- one fire test with a conventional vehicle using an internal combustion engine (ICE)
- and two fire tests with BEV (BEV1 / BEV2), with a size comparable to the ICE vehicle.

As a first assessment step the gas concentrations have been compared to common tenability limits. For both, CO and HF as well as for all other measured substances, the obtained average concentrations were well below the respective AEGL-3 threshold values (Acute Exposure Guideline Levels for Airborne Chemicals, 2022). These findings are of particular interest because an increased HF emission and consequently high HF concentrations have long been suspected to be one of the major safety issues of BEV fires in enclosed compartments. According to the measured concentrations, this seems not to be the case for the specific tunnel and for the applied ventilation rate. However, according to findings on the physiological effects of fire hazards on the human body, toxic substances as well as temperature should not be treated individually but in a holistic approach in order to take interactions between the substances and between different hazards into account (D. A. Purser; J. L. McAllister, 2016). Further on, the measured concentrations depend on the fire development and the fire size as well as on tunnel characteristics like cross-section area and ventilation rate. Therefore, a fundamental model, which on the one hand acknowledges for the interactions between substances and between hazards, and on the other hand can be applied to any tunnel environment, was developed based on the measured data.

Figure 2 depicts the fire curves for BEV and for the conventional vehicle (ICE) measured during the BRAVA fire tests. The original fire curves have been shifted in order to eliminate the different initial time delays due to varying ignition sources. Time t=0 in Figure 2 represents the time the respective HRR curve starts to significantly increase, not the actual time of ignition. The fire curves resulting from the three vehicle fire tests differ significantly. However, some of the characteristics are associated with the specific test procedure (ignition procedure) and are not general for a generic BEV or ICE fire. These specific characteristics include the sharp HRR increase of BEV 1, which was due to the ignition procedure, where a collective thermal runaway of all battery cells was triggered by flooding the battery case with saline solution. This collective thermal runaway is supposed to represent worst case situations. In the event of an actual fire event in the tunnel with the fire originating in the battery (caused, for example, by a short circuit as a result of a mechanical impact), the thermal runaway will very likely begin in a few cells (where the mechanical impact caused the short circuit) and continues to cascade through the battery. The HRR increase in the first phase will consequently be less aggressive.

On the other hand, the ignition procedure for BEV 2 and ICE (ignition of vehicle interior) where identical. Also the vehicle types where very similar. Therefore, the different HRR increase within the first 100 s is assumed to be related to random variations in the fire growth and not associated with characteristic ICE or BEV fire behaviour. The fire curve of the ICEV vehicle is also to be discussed. In this case, the convective part of the fire load was 2 MW over a long period of time and only increased to 4 MW at the end of the observation period. ICEV passenger car fires are well researched and widely documented. Average maximum fire loads for ICE car fires are usually around 5 MW. The significantly lower fire load in the ICE fire test, at least for the majority of the duration of the fire, is related to an almost empty tank.

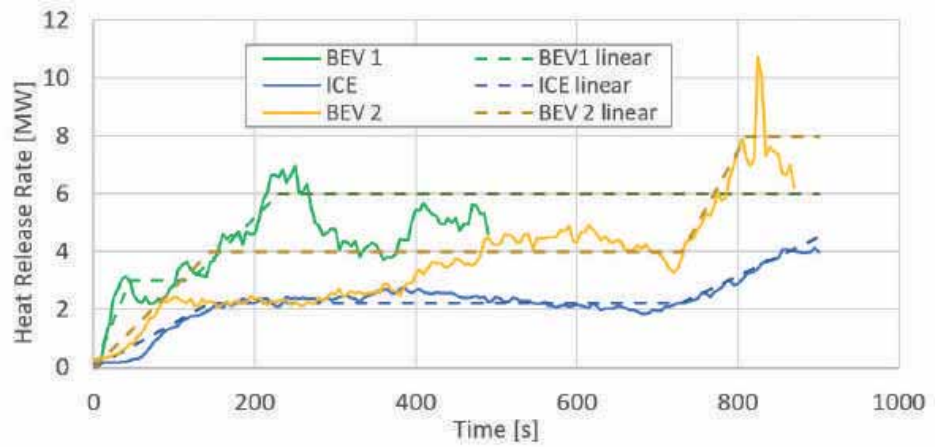


Figure 2:Original fire curves (solid lines) and linearized fire curves (dashed lines) for all three relevant full-scale fire tests, convective part of the HRR

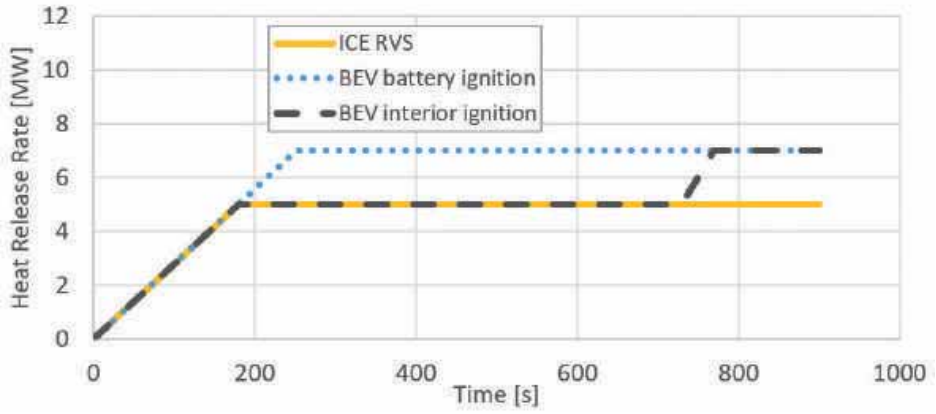


Figure 3:Deduced BEV model fire curve based on the original BRAFA fire curves and ICE fire curve according to RVS 09.03.11

In order to develop generic fire models, representative for ICE and BEV passenger-car fires, respectively, these special characteristics have been taken into account. The general fire curves developed based on the BRAFA fire tests, for BEV fires with different ignition types (ignition in the battery / ignition of the vehicle interior) as well as for the ICE fire, are depicted in Figure 3. For BEV bus fires, an increased maximum heat release of 36 MW has been assumed This is based on the assumption of a 30MW conventional BUS fire and a HRR increase due to the battery. The HRR contribution of the battery was modelled taking capacities of modern BUS batteries into account and by using a linear relation between battery capacity and released thermal energy (Willstrand, 2020).

2.2. Fire gas emission rates for BEV obtained from full scale fire tests

In addition to a changed heat release, the changed substance release is considered to be potentially significant when comparing BEV fires and ICEV fires. In the course of the BRAFA project absolute amounts of the major toxic gases, suspected to be emitted during a BEV or ICE fire, have been measured for consecutive time intervals during each of the three aforementioned full scale fire tests. The absolute amounts of released gases where than normalized by the thermal energy released in the respective time intervals, to obtain gas emission rates in dependence of actual heat release rates. This type of model has the advantage that the obtained gas emission rates can also be applied to other fire curves used in other tunnel risk methodologies or for predefined design fire curves. The obtained gas emission rates are presented in Table 1.

Table 1: Fire gas emission rates for BEV and ICE vehicle fires according to (Sturm, 2021)

Released Substance	BEV battery ignition [kg/MJ]	BEV interior ignition [kg/MJ]	ICEV [kg/MJ]
CO	0.001994	0.001883	0.001336
CO_2	0.093781	0.101416	0.124234
NO_x	0.000247	0.000340	0.000348
HCl	0.000520	0.000336	0.000387
SO_2	0.000118	0.000045	0.000044
H_3PO_4	0.000034	-	0.000004
HF	0.000487	0.000214	0.000050

2.3. Survivability model to assess BEV fires

In general, a variety of different metrics to quantify the consequence of a tunnel fire exist, trying to model the impact of fire hazards on persons inside a tunnel. One rather sophisticated method for consequence analysis is the FED/FIC approach according to the work of Purser (D. A. Purser; J. L. McAllister, 2016). This approach aims to model the physiological impact of fire hazards on the human body, taking the effect of reduced visibility, toxin- and temperature dosage intake as well as respiratory and visual irritancy into account. It in particular allows to assess the effects of toxic substances, typically associated with BEV fires, such as HF.

The degree of intoxication is determined based on the concentration of pollutants along the escape route of an evacuating person as well as on the exposure duration. In each time step, the "Fractional Effective Doses" (FED) with regard to asphyxiation and hypothermia, as well as the "Fractional Incapacitation Concentration" (FIC) are determined. An evacuee is assumed as incapacitated if one (or more) of the FED- or FIC values (see Equation 1) equals or exceeds a threshold value of 1.0. The dose-related FED values are the sum of all time steps considered from the start of the fire until the safe area is reached or until the person is unable to move. The FIC value, on the other hand, is based exclusively on the concentrations at the respective point in time.

$$FED_{Asphyxiation} = (FI_{CO} + FI_{CN} + FLD_{Irr}) \times V_E \times V_{CO}$$

$$FED_{Hypothermia} = \frac{1}{t_{Rad}} + \frac{1}{t_{Conv}}$$

$$FIC_{Irr} = \frac{C_{HCL}}{1000} + \frac{C_{HF}}{500} + \frac{C_{SO_2}}{150} + \frac{C_{NO_x}}{250}$$

Equation 1: Calculation of FED/FIC values during evacuation modelling

FI_{CO} ...	Contribution to Fractional Effective Dose associated with CO
FI_{CN} ...	Contribution to Fractional Effective Dose associated with HCN
FLD_{Irr} ...	Contribution to Fractional Effective Dose associated with irritants
V_E ...	Respiratory volume [l/min]
V_{CO2}) ...	Breathing rate increase due to CO2 Concentration
t_{Rad}/ t_{Conv} …	Time until incapacitation due to convective / radiative heat
C_i ...	Concentration of substance i in ppm

2.4. Consequence Analysis for a comparison tunnel

The BEV fire model can in general be implemented into any risk model and thereby allow to include BEV fires in any assessment methodology. To demonstrate the effect of the presented BEV consequence model, consequences in terms of expected fatalities per fire event have been calculated for a representative comparison tunnel. The comparison tunnel parameters are summarized in Table 2. The resulting consequence numbers for free-flowing traffic, as well as a congested traffic scenario, are shown in Figure 4 and Figure 5, for passenger cars and busses, respectively. The results imply that although slightly different heat release rates as well as gas emissions are observed in case of BEV fires, no increased consequences are to be expected in case of passenger car BEV fires. It must be noted that the fire curve as well as the emission rates for BEV busses where not measured directly but obtained by scaling passenger car fire test results to BUS fires and typical BUS battery capacities, as described in section 2.1. Therefore, the results for buses must be interpreted with care. So even though the consequences for BEV passenger car fires seem to be the same as for conventional passenger car fires, the situation might be different for busses, where significantly larger batteries are used. This is also indicated by an increasing consequence number for BEV bus fires, see Figure 5.

Table 2: Comparison tunnel parameters for the BEV consequence analysis based on the BRAFA fire curves

Tunnel Parameter	Parameter Value
Tunnel system	3 km long unidirectional tunnel tube with a slope of -1.5 % and a horseshoe cross section of 57 m^2
Distance between cross-passages	300 m
Traffic	30'000 veh./day with 85% passenger cars and 15 % large vehicles
Ventilation	Longitudinal ventilation with jet fans, target airflow velocity in fire mode 1.5 m/s – 2.0 m/s
Emergency response	Ventilation activation 120 s after fire start, Evacuation initialization 150 s after fire start

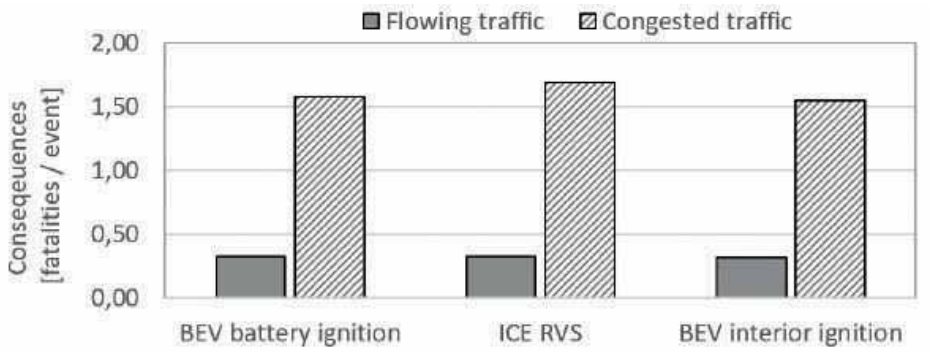


Figure 4: Consequence numbers associated with the three deduced fire curves for passenger cars; BEV fires for battery- and interior ignition, ICE fire according to RVS 09.03.11

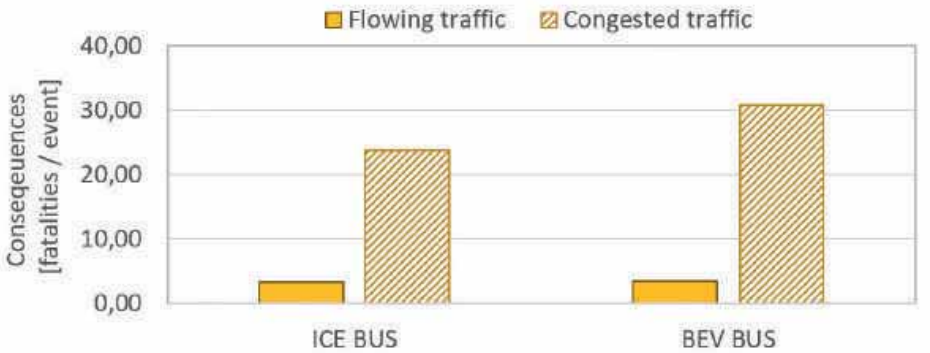


Figure 5: Consequence numbers associated with fire curves for bus fires

3. CONSEQUENCE MODELS FOR HYDROGEN POWERED VEHICLES

Beside electric-batteries, fuel cells operated with gaseous hydrogen, are one of the major technologies prospected to allow for a decarbonisation of the traffic sector. Therefore, the potential impact of FCEV on tunnel safety is of great importance. The prevalent technology at the moment utilizes hydrogen stored in pressure vessels. The compressed gaseous Hydrogen (CGH2) is stored in compressed-gas tanks at 350 bar in case of HGVs respectively buses or 700 bar in case of cars. For safety reasons a temperature activated pressure release device (TPRD) is installed at the hydrogen tanks. This TPRD is triggered as soon as a certain temperature in the vicinity of the valve is reached and consequently the total amount of hydrogen is released in a more or less controlled manner in order to prevent the hydrogen tank from bursting. Depending on the proper activation of the TPRD as well as on the nature of the incident (mechanical impact or vehicle fire) different hydrogen scenarios, posing significant threads to tunnel user, can occur:

- The hydrogen propelled vehicle is involved in a fire incident and the TPRD is activated correctly: Hydrogen is released from the tank in a controlled manner. This will result in a hydrogen jet fire in addition to the conventional fire of the vehicle body.
- The hydrogen propelled vehicle is involved in a fire incident but the TPRD is not activated. This can either lead to a delayed tank rupture followed by a vapour cloud explosion (VCE) of the released and stored hydrogen, if temperature and pressure inside the vessel are increased above a certain point, or it can lead to a conventional fire, if the tank withstands the vehicle fire even though the TPRD is not activated.
- The hydrogen propelled vehicle is involved in a mechanical incident which can leave the tank unharmed, or it leads to an immediate tank rupture and a VCE of the released and stored hydrogen. In this case the hydrogen is immediately ignited due to the low required hydrogen ignition power and the wide explosion limits.

In general, also the possibility for an unignited hydrogen release exists, where the vapour cloud spreads across the tunnel and is potentially ignited later on. However, due to the very low required ignition energy and the wide explosion range, this scenario is not taken into account explicitly in this paper. Consequence models for the remaining CGH2 scenarios – hydrogen jet fire and immediate/delayed tank rupture – to be used in tunnel risk assessments, have been developed in the research project FE15.0675/2020/ER, launched by the German Federal Highway Research Institute BASt, and are explained in the following.

3.1. Hydrogen jet fire model developed in FE15.0675/2020/ERB

For this scenario an initial conventional fire according to the fire curves defined in the German tunnel risk assessment method (Kohl, et al., 2019) is assumed. Depending on the vehicle, the conventional fire curves according to 5 MW, 30 MW or 100 MW are used. A typical TPRD activates, when a temperature of 110°C is reached at the location of the safety device. The developed consequence model for hydrogen jet fires applies the conventional vehicle fire curves shown in Figure 6 and their associated hazards according to the FED/FIC approach based on (D. A. Purser; J. L. McAllister, 2016).

The conventional hazards are modelled with the Fire Dynamics Simulator (FDS) software. In the CFD simulation, in addition to the distribution of the pollutants, also the time when the activation temperature of 110°C is reached at the TPRD location, is evaluated. Technically, as soon as the TPRD is activated a jet-fire is formed, either due to the hydrogen being immediately ignited because of its physical properties (low required hydrogen ignition energy) or due to the underlying already existing fire. Therefore, an additional jet flame is assumed at this point in time. The jet flame is not treated directly in the CFD model, but by acknowledging a certain so called "danger zone", which represents a fatal area for evacuating persons, in a linear one-dimensional egress and survivability model. This survivability model also accounts for the intoxication from the conventional fire according to the FED/FIC approach.

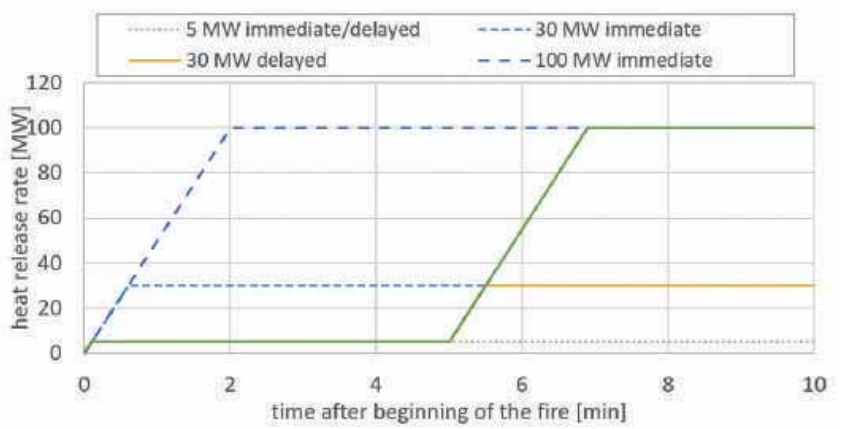


Figure 6: Fire curves according to the German tunnel risk model defined in (Kohl, et al., 2019)

The duration of the jet-fire depends on the hydrogen pressure inside the tank as well as the tank size and can be read of from tank blowdown nomograms (Bertau, Li, Tretsiakova-McNally, Molkov, & Makarov, 2016). Tank sizes as well as TPRD orientations are different and regulated via various standards, such as ISO 23273:2013, ISO 15916:2015 and ECE R134. Therefore, orientation as well as dimension of the jet flame depend on the type of involved vehicle.

- **Passenger cars** typically use hydrogen tanks with an operating pressure of 700 bar. The TPRD is situated in the back and discharging in backwards direction with an horizontal angle of 45°downwards.
- **Busses** use hydrogen tanks situated on the top of the vehicle, with the TPRD being assumed oriented upwards. The tanks operating pressure is 350 bar.
- **HGV** also use hydrogen tanks with an operating pressure of 350 bar, located behind the driver cabin. The blowdown direction of the TPRD is assumed perpendicular to the tunnel wall.

For passenger cars and HGV the danger zone has been estimated based on the HYRAM hydrogen modelling tool (HyRAM+ Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models, 2022), see figure Figure 7. The application of this engineering tool resulted in danger zones in longitudinal direction of 6.5 m and 3.0 m, for passenger cars and HGV, respectively. The shorter danger zone for the HGV results from the lower operating pressure as well as the assumed transverse orientation of the TPRD. To estimate consequences for bus jet fires, the results from (Cirrone D. S., 2021) bus in combination with an upwards orientation results in tenable conditions below a height of 2.0 m above the tunnel floor. Therefore, no additional hazard in form of a danger zone has been taken into account for bus jet fires.

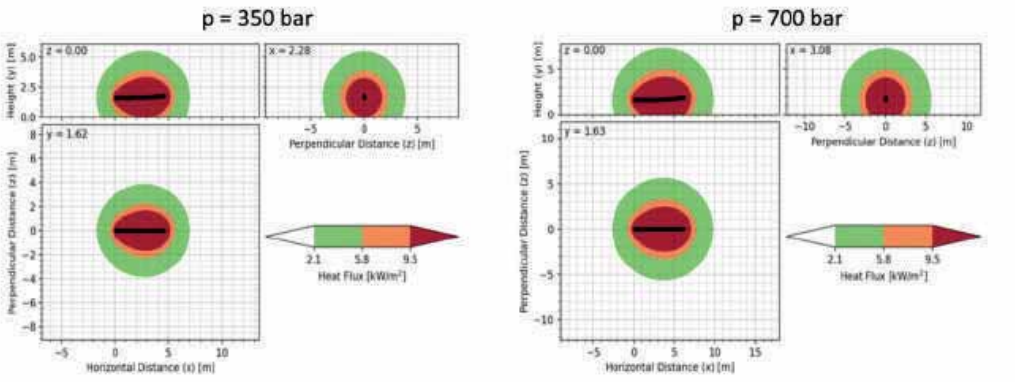


Figure 7: Dangerous zone according to car jet flame for different storage pressures (HyRAM+ Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models, 2022)

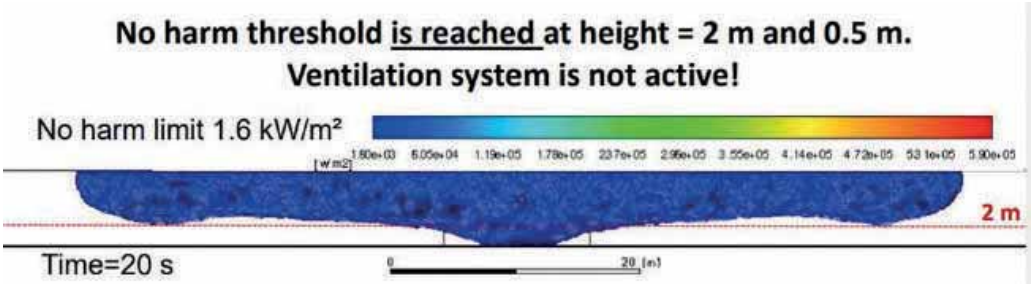


Figure 8: CFD modelling results of heat radiation for a bus jet fire (Cirrone D. S., 2021)

3.2. Tank rupture and Hydrogen VCE

A hydrogen VCE following a tank rupture can result from two initial events. The tank can either burst due to overheating and overpressure from being exposed to a fire of the hydrogen car body, or it can burst because of mechanical stress following a collision. In the latter case the explosion is assumed to take place directly after impact. In case of a tank burst and a VCE following a fire, the released heat according to the model fire curves shown in Figure 6 can be calculated and compared to experimental data of hydrogen fuel tank fire exposure burst tests (Zalosh R. W., 2005). As a result, delay times for tank burst of 300s, 66s and 60s, for 5 MW, 30 MW and 100 MW fires, respectively, were estimated.

Independent of the initial cause, two major hazards occur in case of hydrogen vessel burst followed by a VCE. First, the instant release of the stored pressure together with the pressure rise due to the explosive combustion of hydrogen leads to a pressure wave that propagates longitudinally along the tunnel. Second, the combustion of the released hydrogen also leads to a fireball, which also extends in longitudinal direction. To estimate the overpressure hazard area, the relationship between overpressure and distance from the origin of the detonation corresponding to explosions of different sizes of hydrogen tanks has been used (Molkov & Dery, 2020). To obtain this relationship, the overpressure of a hydrogen tank explosion in the tunnel was investigated both numerically and experimentally, and a correlation between the dimensionless peak overpressure ($\bar{P}_T$) and the dimensionless distance from the detonation origin ($\bar{L}_T$) was found, see Figure 9. Details about the model, and in particular the definitions of $\bar{P}_T$ and $\bar{L}_T$ are given in (Molkov & Dery, 2020). This model can be applied to arbitrary tunnels as geometric tunnel properties, like aspect ratio, hydraulic diameter and tunnel cross-section, are taken into account in the calculation of $\bar{L}_T$. Different CGH2 systems are acknowledged in the calculation of the mechanical expansion work based on storage pressure and volume. This engineering tool can be used for the consequence analysis of hydrogen pressure vessel explosions and VCE. Therefore, a danger zone associated with VCE overpressure is obtained by calculating the distance from the detonation origin, where an overpressure of at least 1 bar (fatality threshold value) is reached. This distance can be compared with person densities in the evacuation and survivability model.

To account for the hazard of a fast expanding fire front inside the tunnel, resulting from the combustion of the released hydrogen during a VCE, an empirical relation between the amount of hydrogen in the tank and the fireball diameter is used (Zalosh R. W., 2005). The resulting volume can then be mapped to the tunnel volume which allows to obtain the danger one according to the VCE fire ball.

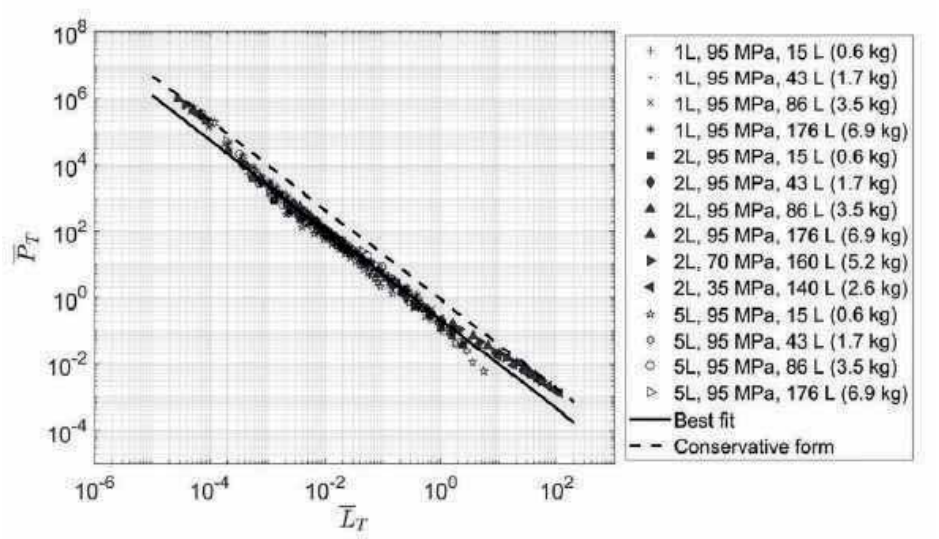


Figure 9: Relationship between dimensionless overpressure and dimensionless distance (Molkov & Dery, 2020)

3.3. Consequence Analysis for a comparison tunnel

As for BEV fires, the consequence models for hydrogen scenarios can in general be implemented into any risk model and thereby allow to include hydrogen scenarios in any assessment methodology. In the research project FE15.0675/2020/ER, the models have been implemented in the recently adapted German road tunnel risk assessment methodology. Therefore, the model has been applied on a comparison tunnel which has also been used during the adaption of the general risk assessment methodology (Kohl B. K., 2019). The parameters for the comparison tunnel are summarized in Table 3 and the resulting consequence numbers are shown in Figure 10 and Figure 11 for passenger cars and HGV, respectively.

Table 3: Comparison tunnel parameters for the CGH2 consequence analysis

Tunnel Parameter	Parameter Value
Tunnel system	1.2 km long unidirectional tunnel tube with a slope of -3 % and a horseshoe cross section of 54 m^2
Cross-passage distance	300 m
Traffic	40'000 veh./day with 85% passenger cars and 15 % large vehicles
Ventilation	Longitudinal ventilation with jet fans, target airflow velocity in fire mode 2.5 m/s – 3.0 m/s
Emergency response	Ventilation activation 60 s after fire start, Evacuation initialization 120 s after fire start

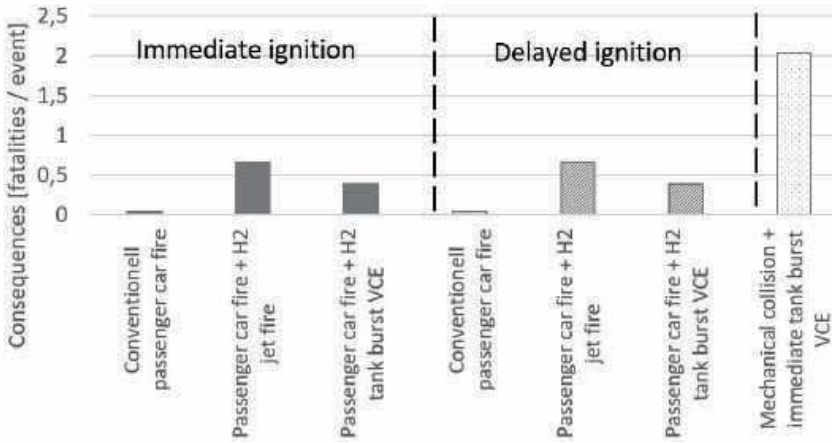


Figure 10: Consequence numbers associated with hydrogen incidents of passenger cars

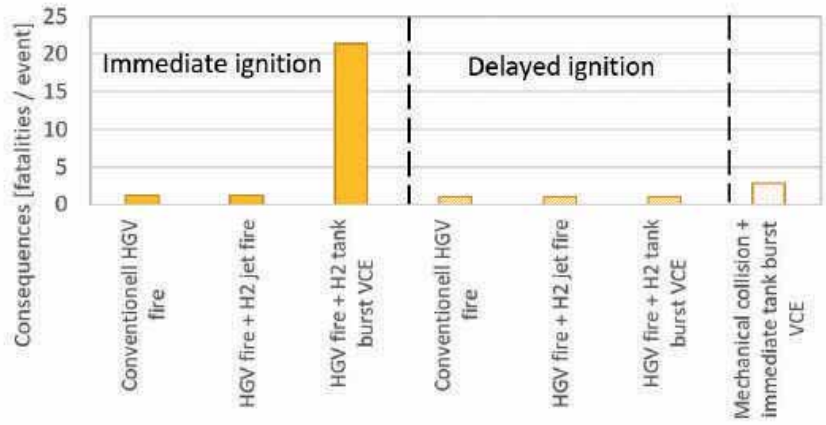


Figure 11: Consequence numbers associated with hydrogen incidents of HGV

The consequence numbers for conventional fires obtained in the BASt project are rather small in comparison to the numbers obtained in the BRAFA project, see Figure 4. This is on the one hand because of the different comparison tunnel, in particular the different longitudinal ventilation (higher target flow velocities / earlier emergency ventilation activation), and because consequences due to heat radiation where not taken into account explicitly in the conventional fires models associated with Figure 10 and Figure 11. The consequence numbers for hydrogen jet fires are limited on an absolute scale. They in particular are in the range of approximately 1 fatality per event. However, the relative increase in comparison to fatalities in case of conventional fires, is significant. This already indicates one of the potential issues of incidents involving hydrogen, namely that consequences in case of such incidents might be rather limited, if we compare it to the large historical tunnel fire events happened in Europe in the late 1990s, but they are not really mitigatable by current safety measures, for instance the emergency ventilation system. This observation becomes even more prominent, when it comes to explosive scenarios. The expected consequences for VCE following a hydrogen tank bust rise up to approximately 2 fatalities per event in case of an immediate explosion due to a mechanical impact and up to 20 fatalities per event in case of a delayed explosion following a fast growing HGV fire.

4. INDICATIVE RISK MODEL APPLICATION

Generally speaking, the risk concept is defined as the combination of frequency and consequences of potentially hazardous scenarios. The consequence models, developed to assess NEC scenarios and described above, are based on fundamental research in terms of detailed CFD analysis and full scale experiments, taken from primary and secondary sources. The development of frequency models for incidents involving NEC vehicles is at the moment much more delicate. Some indications for the change in scenario frequencies, for instance in the likelihood of BEV fires, can be deduced from experiments. However, for a serous prediction of incident frequencies, in particular for fire- and explosion incidents, the penetration rate of BEV vehicles or hydrogen propelled vehicles is simply too small. In statistics, also the absence of incidents can in general be used to estimate frequencies, but as the kilometrage of NEC vehicles is also unknown, this is not really an option.

It is, nevertheless, important for authorities and decision makers, to get at least an indicative statement about the potential development, not only in terms of consequences of these kind of incidents, but also with respect to the effect on tunnel risk as a whole. A first attempt to estimate the influence of NEC on tunnel risk can be made by combining the consequence models described in section 2 and section 3 with an event tree modification of the German road tunnel risk assessment method, that also includes NEC incidents. The results for this attempt with respect to the comparison tunnel according to Table 3 are presented in the following. Therefore, incident rates for conventional scenarios have been used also for NEC scenarios wherever possible (and plausible). For completely new distinctions in the event tree, and for conditional probabilities that could not be related to conventional incidents, probabilities based on an "order-of-magnitude" assessments have been estimated.

This indicative risk assessment has been carried out in two ways. For the first assessment the traffic prediction of the share of different energy carriers was deduced based on the assessment of available traffic forecasts for the years 2030-2040, focusing on Europe and Germany in particular. The expected risk value for the comparison tunnel was then calculated for the predicted traffic mix as well as for the hypothetical case of 100% conventional energy carriers.

The results are shown in Figure 12 and Figure 13, for the overall risk and the explosion-/fire risk, respectively. The overall risk, as the sum of mechanical-, fire- and explosion risk, is practically identical for the energy carrier mix according to the traffic forecast and the case where 100% conventional engines were assumed (Figure 12). Therefore, no increase in the overall risk for the traffic forecast compared to the current traffic mix, and consequently no influence of NEC vehicles, can be derived. However, if we look at the fire- and explosion risk in isolation, and blind out the mechanical part, the risk increases by about 30% due to the increased share of NEC vehicles in the prognosticated traffic mix. The results represent an order-of-magnitude estimation, rather than a precise prediction for the expectable development in terms of risk for tunnel users. However, the results indicate the fundamental challenges which arise with an increased appearance of NEC vehicles, in particular gas vehicles, in tunnels. The results of the risk analysis show that no increase in the overall risk for the traffic forecast compared to the current traffic mix can be derived. Fire and explosion risks are not relevant for the comparison tunnel in absolute terms, but they increase significantly for the forecast shares of alternative energy carriers in relation to conventional fire risk.

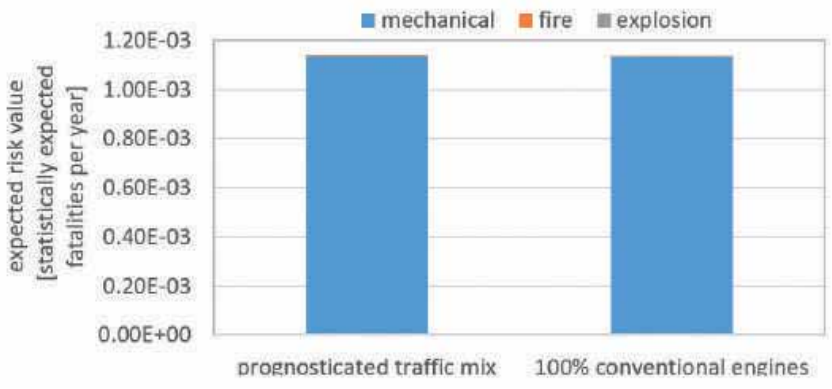


Figure 12: Comparison of the total risk according to the traffic forecast and 100% conventional engines

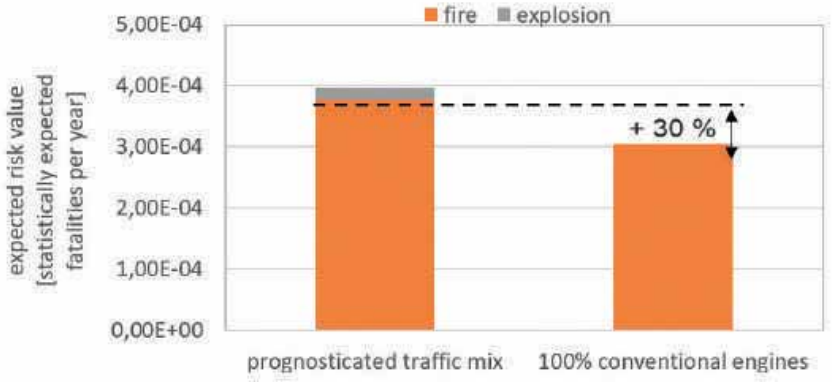


Figure 13: Comparison of the fire- and explosion risk according to the traffic forecast and 100% conventional engines

Figure 14: Comparison of total risk according to the three energy carriers that will most probably be used for passenger cars in the future. 100% share for each propulsion technology has been assumed for comparison

For the second assessment, only passenger cars have been investigated, and in each of the three assessment steps a share of 100% has been assumed for one of the relevant energy carriers of passenger cars (conventional / li-ion battery / fuel cell). By doing so, the influence of each energy carrier on tunnel risk can be compared, independent of their actual penetration rate in the future vehicle fleet, as this penetration rate may change from the current prognosis because of changing policies, political positions or technology leaps. The re-

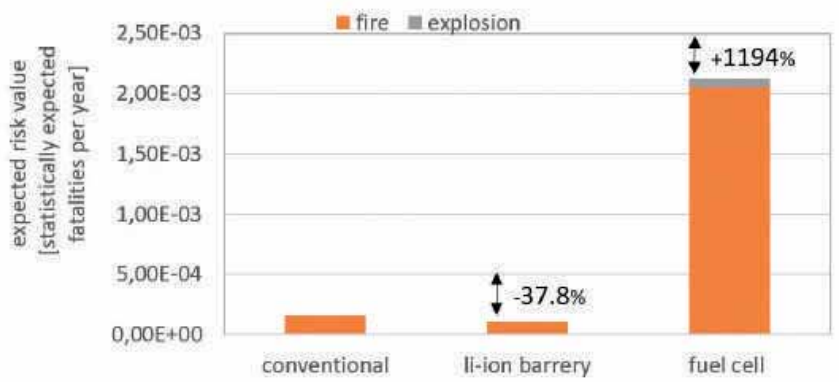


Figure 15: Comparison of fire- and explosion risk according to the three energy carriers that will most probably be used for passenger cars in the future. 100% share for each propulsion technology has been assumed for comparison

sult, which are presented in Figure 14 and Figure 15, confirm the findings from before. While the effect of NEC on the overall risk is insignificant – 0% change for BEV / 2% increase for fuel-cell vehicles (Figure 14)– the effect on the fire- and explosion risk is huge. For BEV the risk decreases by about 40%, mainly because of the assumption of a lower probability for fast-developing fires due to the absence of hydro-carbon-based fuel as a fire accelerant. For fuel cells, however, which use compressed gaseous hydrogen as an energy storage, the fire risk increases by roughly 1200 % (Figure 15). This is due to the backwards-oriented TPRD and the, in absolute terms, very low conventional fire risk. For a different tunnel type - for example with a relevant proportion of traffic jams, a steep negative incline, a weaker longitudinal ventilation or a slower fire detection system - it can be assumed that the fire risk associated with the spread of smoke is significantly higher. Since the effect of the jet fire directed backwards is largely independent of the tunnel characteristics and thus remains more or less the same for all tunnels, the influence of the FCEV on the fire risk for such a tunnel would also be significantly lower in relative comparison. Therefore, a most probably smaller, but still significant increase of fire risk due to jet fires can also be expected for other tunnels. In addition to jet fires, there are also completely new risks of explosions, which practically cannot occur for conventional vehicles and BEV. This all leads to a significant increase of fire- and explosion risk for hydrogen vehicles.

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Based on the findings from different research activities, consequence models for the most promising new energy carriers were presented in the scope of this paper. For BEV fire incidents, which potentially lead to slightly higher heat release rates and increased release of toxic gases, adapted fire curves and gas emission rates were developed and applied to a generic comparison tunnel. This exemplary analysis showed that no significant increase in terms of fire consequences has to be expected for BEV fires. For hydrogen, where completely new hazards need to be taken into account, engineering tools where used to formulate a comprehensive consequence model for jet fires and tank rupture VCE. This model was applied to another comparison tunnel which was also used in an exemplary tunnel risk assessment.

The consequence analysis as well as the indicative tunnel risk assessment showed that the fire risk is likely to increase significantly for hydrogen-driven vehicles. However, the overall risk is dominated by the mechanical collisions, and fire risk of conventional as well as alternative energy carriers plays a minor role. This is on the hand a reassuring finding, as the more or less consistent overall risk does not imply an immediate recommendation for action to counteract any risk increase because of NEC vehicles. However, even if jet fires and tank ruptures with VCE may be extremely unlikely from today's perspective, the same statement applies to them as to large fire events, namely that they may not be relevant in the overall risk context, but they will rise attention if happening in a tunnel. It is therefore of utmost importance to inform decision makers, tunnel authori-

ties and the general public that such incidents are extremely unlikely and are more or less negligible from an overall risk perspective in comparison to mechanical incidents, but cannot be completely avoided in tunnels. It is then up to the public discussion, if additional measures, independent of cost effectiveness, should be taken, in order to mitigate an increasing fire- and explosion risk. However, such mitigation measures, if indeed needed, have to be developed first, as the analysis of the well-equipped comparison tunnel showed that conventional tunnel safety measures, like a longitudinal ventilation system with a common ventilation control, may not mitigate the increase of fire- and explosion risk of jet fires and hydrogen VCE. The general finding of a more or less constant overall risk but an increase in fire and explosion risk due to NEC incidents, is based on the analysis of single a comparison tunnel. This comparison tunnel is regarded as representative, however, the results shall be interpreted with care, as the general validity of this statement still needs to be further analyzed. Therefore, further research, in particular the consideration of different tunnels (i.e. alternative safety equipment levels, frequent traffic congestions) is still ongoing.

The present paper demonstrates the current state-of-the art in tunnel risk assessment of NEC vehicles, but is, as all risk assessment methodologies, partly based on rough assumptions and also subject to significant uncertainties in many input parameters. The presented results should therefore be interpreted as indicative findings, which need to be sharpened and improved as soon as more data and new knowledge get available. It was the intention of the authors to present detailed insights into the modelling, rather than discussing findings based on a black box tool, with the aim to allow tunnel safety community to build on the obtained research findings and increase tunnel safety even further in the future.

6. ACKNOWLEDGEMENT

The project "BRAFA – Fire Effects of Vehicles with Alternative Drive Systems" was funded by the Austrian Research Promotion Agency (FFG), representing the Federal Ministry Republic of Austria for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology, as well as the "Autobahn and highway financing stock corporation (ASFINAG)". We thank Peter Sturm, Daniel Fruhwirt, Philip Leonhardt and Thomas Nöst (Institute of Thermodynamics and Sustainable Propulsion Systems, Graz University of Technology); Andrea Schirmer (Forschungsgesellschaft für Verbrennungs-krafmaschinen und Thermodynamic mbH); Simon Heindl, Alexander Hödl (Vehicle Safety Institute, Graz University of Technology); Robert Galler, Bernhard Reinwald, Robert Wenighofer (Chair of Subsruface Engineering, Montanuniversity Leopen); and Stefan Krausbar (Austrian Firebrigade Association) for their contribution to the BRAFA project, the findings of which have been employed in this paper.

The project FE 15.0675/2020/ERB "Impact of vehicles with new energy carriers technologies on tunnel safety" was commissioned and funded by Federal Republic of Germany, represented by the Federal Ministry for Digital and Transport (BMDV) as well as the Federal Highway Research Institute (BASt). We thank Harald Kammerer, Regina Schmidt (ILF Consulting Engineers Austria GmbH); and Peter Sturm (Institute of Thermodynamics and Sustainable Propulsion Systems, Graz University of Technology) for their contribution to the project, the findings of which have been employed in this paper.

7. REFERENCES

Acute Exposure Guideline Levels for Airborne Chemicals. (2022, 05 19). Retrieved from https://epa.gov/aegl

Bertau, S., Li, Z., Tretsiakova-McNally, S., Molkov, V., & Makarov, a. D. (2016). European Emergency Response Guide on Hydrogen and Fuel Cell Applications: HyResponse. Retrieved from http://www.hyresponse.eu/

Cirrone, D. S. (2021). HyTunnel. Retrieved 12 2021, from https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2020/05/13-HyTunnel-CS_WP3_Cirrone_CFD_Jet_Fire_Tunnel.pdf

D. A. Purser; J. L. McAllister. (2016). Assessment of HAzard of Occupants from Smoke, Toxic Gases and Heat. USA: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed., Springer-Verlag.

HyRAM+ Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models. (2022, 05 19). Retrieved from https://energy.sandia.gov/programs/sustainable-transportation/hydrogen/hydrogen-safety-codes-and-standards/hyram/

HyTunnel. (2021). HyTunnel-CS Pre-normative research for safety of hydrogen driven vehicles and transport through tunnels and similar confined spaces. Project No. 826193. Retrieved March 26, 2021, from https://hytunnel.net/

Kohl, B. K. (2019). Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen für Straßentunnel - FE15.0663/20197. German Federal Highway Research Institute BASt.

Kohl, B. K. (2022). Einfluss von Fahrzeugen mit neuen Antriebstechnologien auf die Tunnelsicherheit - FE 15.0675/2020/ERB, Unveröffentlichter Projektbericht der ILF Consulting Engineers und der TU Graz im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. German Federal Highway REsearch Institute BASt.

Kohl, B., Kammerer, H., Heger, O., Mayer, G., Brennberger, S., Zulauf, C., & Locher, P. (2019). Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen für Staßentunnel: FE 15.0663/20197.

Kutschenreuter, M. K. (2020). How Electric Vehicles Change the Fire Safety Design in Underground Structures. Proceedings of the ninth International Symposium on Tunnel Safety and Security. Munich.

LaFleur, C. B.-A. (2017). Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle Tunnel Safety Study. Sandia National Laboratories. U.S. Department of Commerce.

Larsson, F. (2017). Lithium-ion battery safety. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.

Lecocq, A. B. (2012). Comparison of the fire conseqeunces of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle. Proceedings of the 2nd International Conference on Fire in Vehicles - FIVE 2012. Chicago.

Meller, L. W. (2016). Elektromobilität und Tunnelsicherheit - Gefährdungen durch Elektrofahrzeuge: Forschungsprojekt VSS 2016/221. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute.

Molkov, V., & Dery, W. (2020). The blast wave decay correlation for hydrogen tank rupture in a tunnel fire. International Journal of Hydrogen Energy 45.

Sturm, P. F. (2021). BRAFA - Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Graz University of Technology. doi:10.3217/8vj91

Willmann, C. T. (2020). New energy carriers and additional risks for users' safety in tunnels. Proceedings from the 9th International Symposium on Tunnel Safety and Security.

Willstrand, O. B. (2020). Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles. RISE Research Institutes of Sweden.

Zalosh, R. W. (2005). Hydrogen Fuel Tank Fire Exposure Burst Test. SAE Paper Number 2005-01-1886.

Zalosh, R., & Weyandt, N. (2005). Hydrogen Fuel Tank Fire Exposure Burst Test. SAE Paper Number 2005-01-1886.

EL VEHÍCULO ELÉCTRICO TAMBIÉN CONTAMINA

Ramón Morera Fauquier
INNOVIA COPPTALIA S.A.U.

Los vehículos de combustión interna emiten CO2. Algunos defienden que, dicho motivo es uno de los principales factores que, de forma real, contribuyen al cambio climático, entre ellos podemos citar al presidente Obama que, en Twitter apoyó esta teoría pretendiendo dar soporte a una parte de la "Comunidad Científica". Aseveración que generó muchas discrepancias, pues, si con ella, se quiere defender la limpieza del vehículo eléctrico, hay que decir que este también contamina por la emisión de CO2 a la atmósfera, tanto en la fase de construcción de las baterías de "ion-litio" que, utilizan materiales altamente contaminantes, como en el consumo de energía eléctrica al recargar el paquete de baterías, para poder circular por los túneles, carreteras, caminos y calles, al ser generada el 86% de esta, en el Mundo, con combustibles fósiles. Consumo que lógicamente crecerá con el incremento del parque de vehículos eléctricos que, a su vez, inducirá al aumento de la producción de energía eléctrica, lo que obligará a funcionar durante más horas a las centrales de "Ciclo Combinado", de "Cogeneración" y de "Carbón". La consecuencia será, más emisión de CO2 a la atmósfera. Esta mayor emisión de CO2, en España, por circunstancias políticas, no se puede decrementar con la energía "Nuclear" y tampoco, por su propia naturaleza, con las energías "Renovables", al ser el sol y el viento unos combustibles intermitentes e inestables.

Además, el transporte y distribución de la energía eléctrica necesaria para la recarga de los vehículos eléctricos en numerosos puntos de las ciudades y en las vías de circulación, impulsará la construcción de nuevas líneas eléctricas, al estar las actuales redes de transporte y distribución prácticamente saturadas. O sea, más emisiones de CO2 y más impacto ambiental.

ELECTRIC VEHICLES ALSO POLLUTE

Internal combustion vehicles emit CO2. Some say it is one of the main factors that contribute to climate change, including President Obama who, on Twitter, supported this theory to give support to part of the "Scientific Community". A statement that generated many discrepancies, because, if with it, you want to defend the cleanliness of the electric vehicle, it must be said that this also pollutes by the emission of CO2 into the atmosphere, both in the construction phase of the "lithium-ion" batteries that use highly polluting materials, as in the consumption of electricity to recharge the battery pack, to drive through tunnels, roads, roads and streets, to be generated 86% of this, in the world, with fossil fuels. This consumption will logically grow with the increase in the number of electric vehicles which, in turn, will lead to an increase in the production of electrical energy, which will force the "Combined Cycle", "Cogeneration" and "Coal" power stations to operate for more hours. The consequence will be more CO2 emissions into the atmosphere. This higher CO2 emission, in Spain, due to political circumstances, it is impossible to be lowered with "Nuclear" energy and neither, by its very nature, with "Renewable" energies, as the sun and the wind are intermittent and unstable fuels.

In addition, the transport and distribution of the electricity needed to recharge electric vehicles in many points in the cities and on roads, will drive the construction of new power lines, as the current transport and distribution networks are saturated. It therefore more CO2 emissions and more environnemental impact.

LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES POLLUENT AUSSI

Les véhicules à combustion interne émettent du CO2. Certains affirment qu'il s'agit de l'un des principaux facteurs contribuant au changement climatique, notamment le président Obama qui, sur Twitter, a soutenu cette théorie dans le but d'apporter son soutien à une partie de la "communauté scientifique". Une déclaration qui a généré de nombreuses divergences, car, si avec elle, on veut défendre la propreté du véhicule électrique, il faut dire que celui-ci pollue aussi par l'émission de CO2 dans l'atmosphère, tant dans la phase de construction des batteries "lithium-ion" qui utilisent des matériaux très polluants, que dans la consommation d'électricité pour recharger le pack de batteries, pour circuler dans les tunnels, les routes, les chemins et les rues, pour être généré à 86%, dans le monde, avec des combustibles fossiles. Cette consommation croîtra logiquement avec l'augmentation du nombre de véhicules électriques qui, à son tour, entraînera une augmentation de la production d'énergie électrique, ce qui obligera les centrales à "cycle combiné", à "cogénération" et à "charbon" à fonctionner pendant plus d'heures. La conséquence sera une augmentation des émissions de CO2 dans l'atmosphère. Cette émission plus élevée de CO2, en Espagne, en raison des circonstances politiques, ne peut être réduite avec l'énergie "nucléaire" ni, par sa nature même, avec les énergies "renouvelables", car le soleil et le vent sont des combustibles intermittents et instables.

En outre, le transport et la distribution de l'électricité nécessaire à la recharge des véhicules électriques en de nombreux points des villes et sur les routes entraîneront la construction de nouvelles lignes électriques, les réseaux de transport et de distribution actuels étant pratiquement saturés. Cela signifie plus d'émissions de CO2 et plus d'impact sur l'environnement.

1. INTRODUCCIÓN

De las nuevas energías de propulsión que utilizan los vehículos que circulan por los túneles de las carreteras, la más generalizada es la energía eléctrica almacenada en paquetes de baterías "ion-litio" (LiCoO2) que se instalan en los vehículos. Preocupado, después de analizar incidentes reales y ensayos de incendio de un vehículo eléctrico en el interior de un túnel, tanto por la dificultad de su tratamiento y resolución, como por la emisión de subproductos metálicos, de CO2 y de otros gases tóxicos y corrosivos, durante el proceso de extinción del fuego, junto con el "dogma", transmitido por una gran parte de los medios audiovisuales y escritos, los vehículos de combustión interna emiten CO2, gas de "Efecto Invernadero", tanto en el interior de los túneles como a cielo abierto y en consecuencia, son uno de los principales factores que contribuyen al "Calentamiento del Planeta" y al "Cambio Climático "y que, para evitar este desastre hay que sustituirlos por vehículos eléctricos, me ha motivado para desarrollar esta ponencia.

En la actualidad, es el pensamiento "políticamente correcto" y se omite la influencia que puede tener sobre la variación del clima del planeta Tierra, los cambios regulares que se producen sin la intervención humana, como es la variación de la inclinación del eje de la tierra. También produce CO2 el respirar, las calefacciones, las actividades fabriles, agrícolas, ganaderas, portuarias y aeroportuarias, la producción de energía eléctrica, con la excepción de las de origen nuclear y de las renovables.

Un número significativo de estudios "Científicos", según algunos medios de comunicación, predijeron una edad de hielo para los años 70, con una drástica reducción de la producción de alimentos. Con posterioridad el "mantra" era que, se habían producido agujeros en la capa de ozono de carácter irreversible, por la acción de los aerosoles y de los gases de combustión. No se ha vuelto a hablar de ello.

En España, los apóstoles del cambio climático quieren ignorar que, en el clima Mediterráneo ha habido y habrá ciclos secos. Algunos españoles recordamos "la pertinaz sequía" de los años 40, 50 y 60 que terminaron con lluvias torrenciales, riadas, inundaciones, al igual que en años posteriores, a los periodos secos y calurosos le siguieron otros lluviosos o gélidos, por ejemplo:

- La riada de Valencia, 1957.
- Las riadas e inundaciones de Barcelona, Sabadell y Terrassa de 1962, seguidas por la gran nevada de Barcelona.
- Riada de Terrassa, 1971.
- La Borrasca "Gloria" de 2020.
- La nevada "Filomena" de 2021.

Los profetas de los desastres nunca tienen razón, pero son buenos vendedores y ahora les toca hablar del "Cambio Climático", vendiendo que los humanos lo estamos provocando, por abusar del planeta Tierra y por el uso de vehículos de combustión interna.

En esta ponencia, para entender que los vehículos eléctricos también contaminan al recargar las baterías y las dificultades para la resolución de un episodio de incendio en los túneles, vamos a exponer los siguientes temas:

- La teoría del cambio climático.
- La anatomía del coche eléctrico.
- La producción y el consumo de energía eléctrica.
- La contaminación y agresión al medio ambiente que, ocasionan los vehículos eléctricos en su construcción, en la operación periódica de recarga de energía eléctrica y en un episodio de incendio en el interior de un túnel, así como en la construcción y mantenimiento de las instalaciones de energías renovables.

2. LA TEORÍA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Existen en la atmósfera unos gases que retienen una parte de la radiación solar que llega a la Tierra (calor), posibilitando que sea lo suficientemente cálida para que haya vida. Este fenómeno se conoce como "Efecto Invernadero" y es beneficioso para el planeta y los seres vivos.

El incremento en demasía de la producción de gases de efecto invernadero (GEI) podría alterar la composición de la atmósfera de la Tierra y sería una de las causas del "Calentamiento Global" que, a su vez colaboraría con el "Cambio Climático". El "Cambio Climático" puede venir inducido directa o indirectamente por la actividad humana, sumándose a los cambios regulares que, de forma natural, se dan en nuestro planeta.

2.1. Cambios sin la intervención humana o cambios regulares

La tierra realiza cuatro tipos de movimientos:

- Rotación alrededor de su eje, con una duración de 23h 56m 4,1", en sentido levógiro. Es el día sidéreo.
- Traslación alrededor del sol, describiendo una órbita elíptica en 364d 18h, también en sentido levógiro. Es el año sidéreo.
- Precesión de los equinoccios, es el cambio lento y gradual en la inclinación del eje de rotación de la Tierra, que hace que su posición, en la esfera celeste, se desplace alrededor del polo de la eclíptica, trazando un cono y recorriendo una circunferencia completa cada 25.776 años, en dicho periodo la inclinación del eje de rotación de la tierra varía entre 23° y 27°, siendo el desplazamiento angular de 1° cada 71,6 años. Figura 1. Precesión y Nutación.

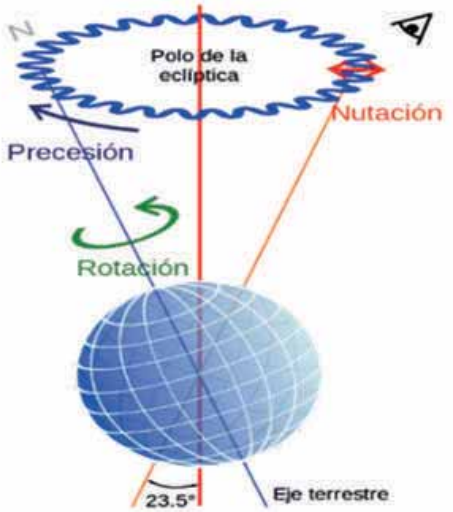


Figura 1. Precesión y Nutación

- Nutación, es la oscilación periódica del polo de la Tierra alrededor de su posición media en la esfera celeste que, produce un desplazamiento de unos 9" de arco, cada 18,6 años. O sea, en una vuelta completa de precesión, la Tierra habrá realizado 1.385 bucles. Mientras el eje describe el movimiento cónico de precesión, recorre a su vez una pequeña elipse o bucle en un periodo de 18,6 años, como si fuese una peonza.

Los polos terrestres no coinciden con los de la eclíptica u órbita que recorre la tierra alrededor del sol, Figura 2. El ángulo que forma el ecuador terrestre con la eclíptica es variable entre 22,1° y 24,5°, siendo su valor medio de 23° 26'. La variación en su inclinación ha pasado por ciclos de diferente amplitud, con un periodo medio de 41.000 años, en el último millón de años. Su variación, en la actualidad, es de 0,47" de arco por año.

Figura 2. Inclinación del eje de la tierra con relación a la eclíptica.

A estos cuatro movimientos hay que sumar los llamados "Telúricos", por ejemplo:

- Diciembre 2004, un tsunami en el sudeste asiático desplazó 17,8 cm el eje terrestre.
- Febrero 2010, el terremoto de intensidad 8,8 de la escala de Richter, que afectó a Chile, desplazó el eje terrestre unos 8 cm.
- Septiembre a diciembre 2021, la erupción del volcán Cumbre Vieja, en la isla de La Palma, ha emitido abundantes emisiones de SO2, CO2, Ha, S2H, He y Rn, ha afectado a los acuíferos y ha desplazado el eje de la tierra. Tal vez los daños al medio ambiente tarden 3.000 años en ser revertidos.

En función de la inclinación del eje de la Tierra, los rayos solares darán de modo más directo o indirecto a su superficie. En estos momentos acercándonos a los 24° de inclinación, las estaciones están más contrastadas, con veranos más calurosos e inviernos más fríos. Cuando la inclinación sea de 22,1° los inviernos serán más apacibles y los veranos menos calurosos.

La suma de todas estas variaciones y movimientos afectan en alto grado al clima y han dado y darán lugar a glaciaciones, periodos entre glaciaciones, inundaciones, sequías, lluvias torrenciales, incendios infernales, tormentas, temperaturas extremas y extinción de especies, pero a una escala de 80/90 años, es inapreciable. El clima de la Tierra va cambiando y sobrevivirá a nuestro paso por ella, como lo ha hecho cada 120.000 años (Mediavilla y Santisteban).

2.2. Cambios por la actividad humana

Ciertos gases que llegan a la atmósfera bloquean el calor y no permiten que el mismo escape, pudiendo colaborar con el "Cambio Climático".

Los gases que pueden contribuir a incrementar el "Efecto Invernadero" son:

- Vapor de agua (H2O), actúa como retroalimentador del "Efecto Invernadero", aumenta a medida que se calienta la atmósfera de la Tierra e incrementa la probabilidad de formación de nubes y precipitaciones.
- Dióxido de carbono (CO2), es el más significativo de los gases de larga duración "forzantes" del "Cambio Climático", se libera mediante:
    - Procesos naturales: la respiración de los seres vivos y las erupciones volcánicas.
    - Actividades humanas: la deforestación, el cambio de uso de los suelos y la utilización de combustibles fósiles:
        - Transporte por tierra, mar y aire, incluida la actividad portuaria y aeroportuaria.
        - Generación de electricidad, el 86% de la generada en el planeta Tierra.
        - Calefacción.
        - Industria.
- Metano (CH4), se libera por fuentes naturales y por la actividad humana:
    - Descomposición de desechos en vertederos y por el manejo del estiércol.
    - El cultivo de arroz.
    - La digestión de los rumiantes.
- Óxido nitroso (N2O), se produce por:
    - El cultivo del suelo, el uso de fertilizantes comerciales y orgánicos.

- Uso de combustibles fósiles.
- Fabricación de ácido nítrico.
- Quema de biomas.

Figura 3. Emisión de gases de "Efecto Invernadero" por sectores, año 2021.

En la Figura 3, se ha agrupado por sectores la emisión de los gases de "Efecto Invernadero" y el porcentaje que representa cada uno con relación al total de los emitidos por la actividad humana y se ve que, el sector del transporte emitió el 16% y de este un 10% corresponde al sector del transporte por carretera, pero ciertos políticos y los apóstoles del "Cambio Climático" siguen con el "mantra" que, los vehículos de combustión interna tienen una influencia perversa para el clima de la Tierra.

Los gases de "Efecto Invernadero" no son localista y no entiende de Ciudades, Autonomías, Estados y otras divisiones político-territoriales, acaban llegando a la atmósfera de la tierra y si es cierto que estos no se eliminarán nunca, se irán extendiendo por toda la atmósfera y "Cambiarán el Clima" del todo el planeta, independientemente del lugar de emisión.

3. LA ANATOMÍA DEL COCHE ELÉCTRICO

La mayor parte de los fabricantes han mantenido la carrocería y la estructura de los modelos convencionales, haciendo un "restyling.

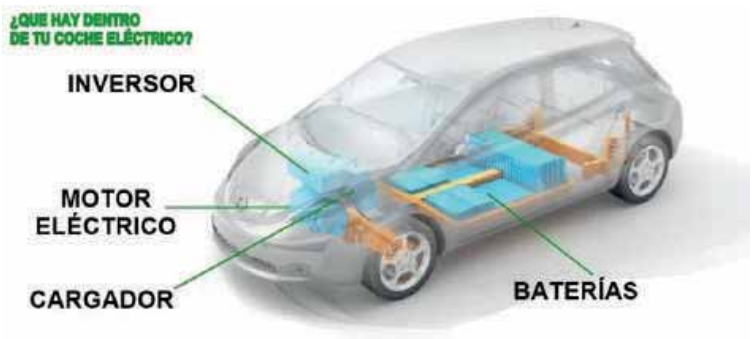


Figura 4·. Interior de un coche eléctrico.

Y se han limitado a:

- Sustituir el motor de combustión interna por uno eléctrico de Corriente Alterna (CA).
- Eliminar el depósito de carburante, la caja de cambio de marchas y el embrague.
- Añadir un gran paquete de baterías.
- Montar un reductor de una sola velocidad, para pasar de las 8.000 RPM del rotor del motor eléctrico a las de giro del eje motriz.
- Instalar un sistema eléctrico: cableado, convertidor e inversores bidireccionales.

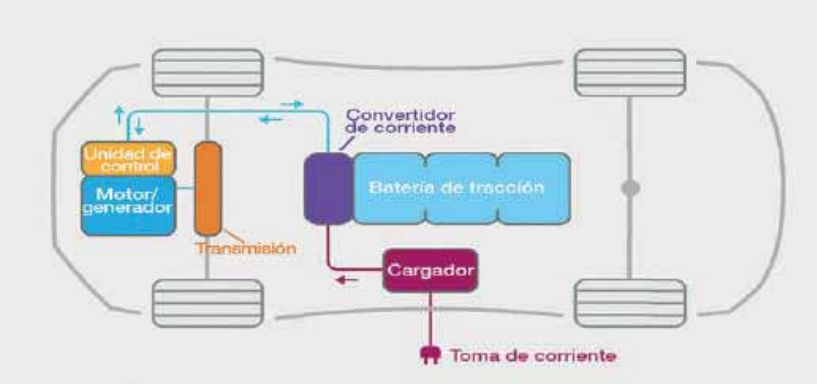


Figura 5. Esquema vehículo eléctrico.

3.1. Motor propulsor

De Corriente Alterna (CA), constituido por un rotor y un estator.

Trabajan con tensiones comprendidas entre los 360 y los 400 Voltios (V).

Peso, alrededor de los 30 Kg, muy inferior que el conjunto motor propulsor de un vehículo de combustión interna, que pesa entre 150 Kg y 300Kg.

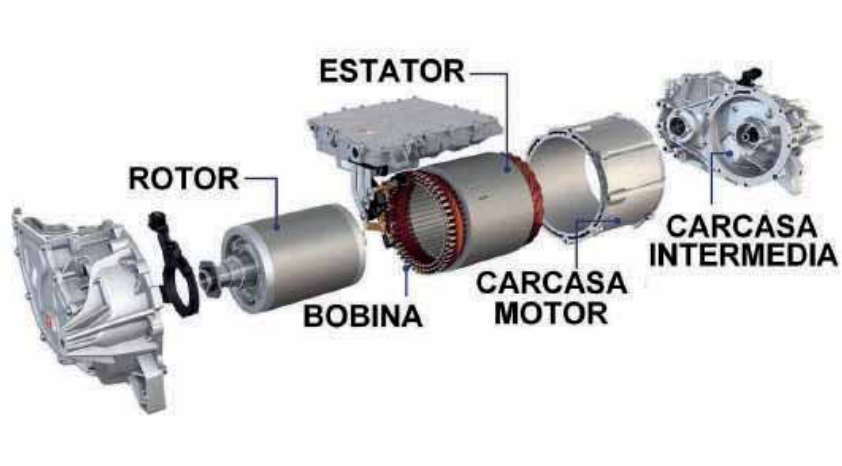


Figura 6. Despiece de motor eléctrico

3.2. Refrigeración del motor

El circuito de refrigeración es muy parecido al de un vehículo de combustión. La diferencia más significativa radica en el sistema de accionamiento de la bomba de líquido refrigerante:

- Mecánico en el motor de combustión interna.
- Eléctrico en el motor eléctrico.

En el motor eléctrico se refrigera la carcasa o estator y en el caso de llevar lubricación por aceite, este se refrigera a través de un intercambiador de calor, como en los motores de combustión.

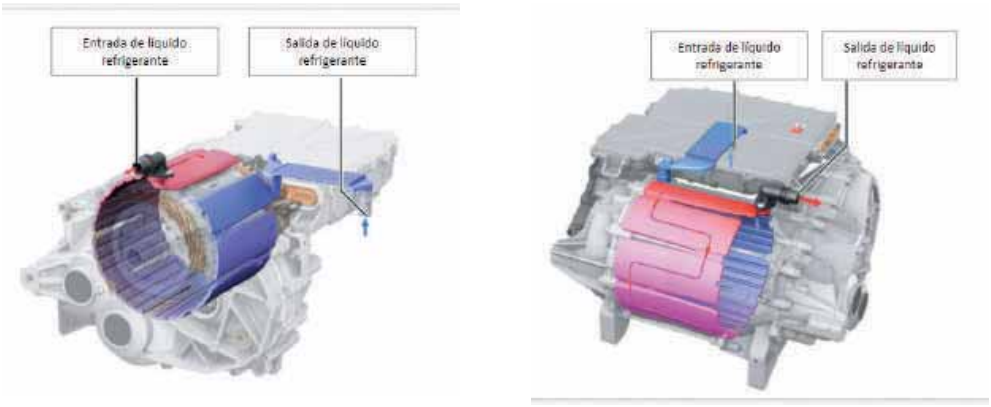


Figura 7. Refrigeración motor eléctrico

3.3. Calefacción y climatización del habitáculo

El rendimiento de un motor eléctrico es muy superior al de un motor de combustión interna y al no tener casi pérdidas de calor que, se puedan destinar a la calefacción del habitáculo, se utilizan para esta función resistencias de "Coeficiente de Temperatura Positivo" (PTC) o una bomba de calor y para el aire acondicionado una bomba de calor.

3.4. Batería

Es el depósito del carburante, las predominantes son las de "ion-litio" (LiCoO2). Hay otras variantes: Ion-litio ferroso (LiFePO4) y polímero de litio (LiPo).

Un paquete de baterías está constituido por varias baterías de "ion litio" y cada una de ellas por múltiples celdas, estas celdas constan de dos electrodos de metal, el ánodo (-) y el cátodo (+), inmersos en un electrolito de sales de Li.

Su peso está en función de la tecnología de la batería y fundamentalmente de la autonomía del vehículo, a mayor autonomía mayor peso:

- Capacidad 22 KWh, pesa unos 290 Kg.
- Capacidad 85 KWh, pesa unos 544 Kg.

3.4.1. Gestión térmica de la batería

A mayor flujo de corriente eléctrica, mayor es el calentamiento de las baterías y como el rendimiento de las de "ion-litio" depende fundamentalmente de su temperatura, por sufrir el efecto "Goldilocks", es decir no funcionan bien cuando están sometidas a demasiado frío o a demasiado calor:

- Las temperaturas demasiado bajas o elevadas pueden provocar daños permanentes en las baterías y su degradación:
  - No admiten una carga rápida cuando la temperatura es inferior a 5°C.
  - No pueden cargarse con temperaturas inferior a 0°C.
  - Se degradan aceleradamente con temperaturas superiores a 45° C.
- Las temperaturas extremas disminuyen su capacidad, se aprecia en la Figura 8:
  - A -10°C, la capacidad se reduce a un 60%.
  - A 0°C, la capacidad se reduce a un 80%.
  - A 21,5 C, temperatura óptima, la capacidad es del 100%.
  - A 40°C, la capacidad se reduce a un 80%.

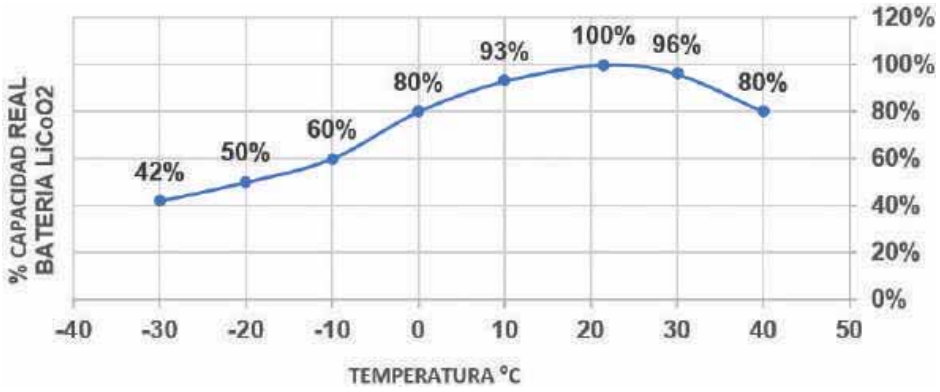


Figura 8. Gráfico Temperatura batería/porcentaje de capacidad.

Ergo, las baterías necesitan gestión térmica, lo que obliga a instalar un sistema de control de su temperatura. La solución más habitual, es mediante un refrigerante a base de agua circulando a través de los conductos de refrigeración ubicados dentro de la estructura de la batería, impulsado por una bomba independiente de la del circuito de refrigeración del motor.

Figura 9. Circuito de refrigeración de un paquete de baterías.

3.4.2. Vida útil de las baterías

Las baterías de "ion-litio" no sufren el "efecto memoria", pero con el uso disminuye su capacidad, debido a los ciclos de carga/descarga incompletos, perdiendo alrededor de un 2,3% de capacidad al año.

La vida útil de las baterías, según los fabricantes y con ciclos de carga/descarga completos, está comprendida entre los 150.000 Km (3.000 ciclos) y los 200.000 Km (4.000 ciclos). A partir de los 150.000 Km la capacidad de la batería tendrá, probablemente, menos del 75% de la capacidad inicial.

El precio de substitución de una batería de:

- 52KWh de un Renault Zoe 18.000€.
- 64 kWh de un Hyundai Kona 20.000€.

3.5. Carburante y autonomía

El carburante, es la corriente eléctrica y el consumo, por término medio, es de 13 KWh/100 Km.

La autonomía de un vehículo eléctrico está en función de la capacidad de su batería y se mide sin calefacción, sin AA y a una temperatura ambiente de 21,5°C. Según datos facilitados por algunos fabricantes:

- Huyndai Kona EV: de 64 kWh tiene una autonomía de 484 Km.
- VW ID.4: de 77 kWh tiene una autonomía de 511 Km.
- Tesla X: de 100 kWh tiene una autonomía de 560 Km.

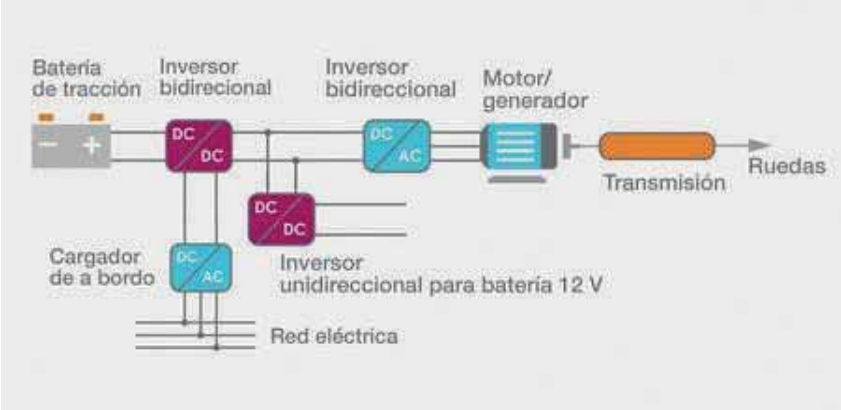


Figura 10. Flujo de la energía eléctrica en un coche eléctrico.

4. LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La energía eléctrica es el combustible del vehículo eléctrico y el factor de la contaminación atmosférica, durante el proceso de carga de la batería, por emisión de CO2, en función del "mix" de generación de energía eléctrica que se tenga en el momento de dicha carga.

En España, la potencia eléctrica total instalada en 2021, para la generación de energía eléctrica era de 112.800 MW. En la Figura 11 se ha desglosado por fuentes de generación y puede apreciarse que las de "Energías Renovables" representan el 55,80% del total y las "Energías no Renovables" 44,20%.

POTENCIA ELÉCTRICA TOTAL INSTALADA EN EL AÑO 2021: 112.800 MW			
Fuente de Generación	**Potencia Instalada MW**	**Fuente de Generación**	**Potencia Instalada MW**
Nuclear	7.558	Eólica	28.877
Carbón	5.866	Hidráulica	18.274
Ciclo combinado	26.282	Solar	14.664
Cogeneración	6.091	Resto renovables	1.128
Resto no renovables	4.061		
TOTAL NO RENOVABLES	49.858	TOTAL RENOVABLES	62.942

Figura 11. Potencia total instalada en España en el 2021, desglosada por Fuentes de Generación (REE).

La potencia total producida, en España, en el año 2021, según REE fue de 259.850 GWh:

- La total consumida por los usuarios 256.387 GWh.
- La total consumida en bombeo -4.437 GWh.
- El saldo de la potencia exportada/importada 884 GWh.

En la Figura 12, se ha desglosado por fuentes de generación y puede apreciarse que las de "Energías Renovables" fue del 46,70% del total generado y las "Energías no Renovables" del 53,30%.

Figura 12. Producción de energía eléctrica en España, desglosada por fuentes, año 2021 (REE).

5. CONTAMINACIÓN

5.1. Principios básicos sobre la transformación de la energía

Hay que tener en cuenta que:

- La energía no se crea ni se destruye.
- E=mc2, teoría de la relatividad:
  - La masa es energía.
  - La masa de un cuerpo es una medida de su contenido energético.
  - Cualquier incremento de la energía de un objeto debe producir un aumento de su masa, que es indiferente si el incremento de energía se hace acelerando el objeto, calentándolo, cargándolo con electricidad o realizando un trabajo.

En consecuencia, cualquier obtención de energía se produce transfiriéndola de una masa o transformando una fuente de energía, por ejemplo:

- Plantas y animales muertos, hace millones de años, transfirieron su energía para la formación de combustibles fósiles.
- Combustibles fósiles, transfieren su energía en forma de calor para la automoción, calefacción y producción de electricidad.
- Energía solar, transfiere la radiación del sol que recibe la tierra al medio ambiente, lo que permite el desarrollo de las especies vegetales y animales, la acción clorofílica y también, transferirla directamente a unos paneles situados en tejados o en el campo para la producción de agua caliente o electricidad.
- Eólica, transfiere la acción del viento a unos molinos gigantes, con aspas de unos 100 m de envergadura, para la generación de energía eléctrica.

Las 3 fuentes producen un impacto medioambiental y emisiones de CO2 a la atmósfera.

5.2. Contaminación en la producción de energía eléctrica

La electricidad que produce una central, cada año, depende de la potencia instalada y del número de horas que esta funciona a lo largo del año. A continuación, en la Figura 13 se establece una comparación entre la potencia instalada y la generada por cada tecnología en el año 2021, según REE. https://www.ree.es/es/datos/generacion/estructura-generacion.

En la cuarta columna de la Figura 13, se ve la diferencia entre la potencia instalada de cada fuente de generación y la cobertura de la demanda.

En la quinta columna de la Figura 13, se ha incluido el número de horas que ha operado, en el año 2021, cada tipo de tecnología y como un año tiene 8.760 horas, vemos que las centrales nucleares funcionan casi siempre, y las eólicas y las solares muy poco, por lo siguiente:

- La energía eléctrica, en la actualidad, no se puede almacenar, excepto con centrales de bombeo, en consecuencia, se ha de consumir cuando se produce.
- El combustible de las Centrales Solares y Eólicas es, respectivamente, el sol y el viento, combustibles intermitentes, inestables y poco fiables al no generar electricidad si no hay sol o con una nula o inadecuada velocidad del viento.

Fuente de Generación	Potencia Instalada (1)	Cobertura demanda anual (2)	Diferencia (2)-(1)	Horas Funcionamiento al año
Nuclear	6,70%	20,80%	14,10%	7.150
Carbón	5,20%	1,92%	-3,28%	850
Ciclo combinado	23,30%	17,12%	-6,18%	1.693
Cogeneración	5,40%	10,04%	4,64%	4.283
Resto no renovables	3,60%	3,44%	-0,16%	2.200
TOTAL NO RENOVABLES	**44,20%**	**53,32%**	**9,12%**	
Eólica	25,60%	23,38%	-2,22%	2.104
Hidráulica	16,20%	11,38%	-4,82%	1.618
Solar	13,00%	9,86%	-3,14%	1.747
Resto renovables	1,00%	2,06%	1,06%	4.745
TOTAL RENOVABLES	**55,80%**	**46,68%**	**-9,12%**	

Figura 13. Fuentes de generación de energía eléctrica y cobertura de la demanda en España, año 2021.

- La Centrales que suministran la energía eléctrica de Base (horas valle y llanas), tienen que cubrir la demanda mínima diaria, incluso la nocturna, de forma segura, permanente, continua, fiable, sin interrupciones y por largos periodos de tiempo:
  - o Nucleares.
  - o Cogeneración.
  - o Ciclo Combinado.
  - o Hidráulica (Renovable).
  - o Resto no renovables.
- Centrales Punta y en llano, entran en funcionamiento cuando aparecen picos de consumo de energía eléctrica (horas punta) y pueden entrar en funcionamiento en un corto periodo de tiempo:
  - o Térmicas con turbina de gas.
  - o Energía Solar y Eólica.

En España y a pesar del continuado incremento de la instalación de centrales de energías renovables, la producción libre de emisiones de CO2 equivalente por la producción de energía eléctrica, está estabilizada en el 68,1% del total de generación, equivalente a 36 millones de tCO2 equivalente/año.

El crecimiento del parque de vehículos eléctricos obligará a incrementar la producción de energía eléctrica en horas valle y/o llanas, pues su recarga se realizará, preferentemente, en horario nocturno con el objeto de tener el vehículo operativo al inicio de la jornada laboral. Esta nueva y creciente demanda de energía eléctrica disparará las horas de funcionamiento de las Centrales de ciclo Combinado y de Cogeneración. Centrales que consumen "Gas Natural" como combustible y oxígeno atmosférico como comburente, desprendiendo en

su combustión, como mínimo, un 11% de CO2, gas de "Efecto Invernadero". Este efecto que muchos consideran perverso para el medio ambiente, solo se puede paliar incrementando el número de Centrales Nucleares.

Figura 14. Mix energético del Mundo.

Si analizamos el "mix energético" del Mundo, Figura 14, aún tendríamos que ser más pesimistas, pues el 86% de la energía eléctrica generada en el Mundo, es mediante el consumo de combustibles fósiles.

Situación imposible de revertir en los 8 años y 28 años que nos separan, respectivamente, de los "mágicos y quiméricos" años 2030 y 2050, plazos asumidos por los políticos occidentales para la descarbonización del planeta Tierra, teniendo en cuenta que:

- El sol y el viento son combustibles intermitentes, poco fiables e inestables y siempre necesitan el apoyo de una fuente de energía fiable.
- La mayoría de los políticos occidentales tienen proscrita, por ideología, las Centrales Nucleares que, no emiten CO2 y pueden producir energía segura, fiable, barata y abundante.
- Los combustibles fósiles, hasta la fecha, son los únicos que han sido capaces de proporcionar energía fiable, barata y abundante a los miles de millones de personas cuya vida depende de ellos y por su uso se ha incrementado la esperanza de vida en el planeta Tierra y la población que en él moramos.

Figura 15. Esperanza de vida, población mundial y emisión de CO2.

Con el uso de combustibles fósiles, no todo ha sido y es negativo para la población, más bien todo lo contrario, pues han contribuido de un modo espectacular a mejorar su prosperidad, bienestar y riqueza. En la Figura 15, puede apreciarse que, junto con el incremento de la emisión de CO2 en el Mundo, también lo ha hecho la esperanza de vida y la población. Entre los años 1750 y 2022 estos incrementos han sido.

- Emisión de CO2, en miles de millones tonelada año de 1 a 37.
- Esperanza de vida, de 28,8 a 73 años.
- La población mundial, de 791 millones de habitantes a 7.980 millones.

Para eliminar las emisiones de CO2 en el contexto del mundo, al ser producida el 86% de la energía eléctrica usando combustibles fósiles, hay que cerrar el 86% de los interruptores, si hacemos caso a los apóstoles del "Cambio Climático":

- ¿Es posible?
- ¿Cuáles apagamos?, por ejemplo, los de los países africanos y que vuelvan al Paleolítico porque los países ricos les exigimos que utilicen "energías verdes".

El tiempo ha demostrado que hay que ser más optimista pues, todos los modelos numéricos para la predicción del incremento de la temperatura en el planeta Tierras por aumento de las emisiones de CO2, incluido el del científico Hansen, gran Gurú del "Cambio Climático", eran catastrofistas. En la Figura 16 se ve que la predicción realizada en 1988 era totalmente errónea, pues preveía para el año 2013 un incremento de temperatura con relación a 1960, en el límite inferior de la troposfera, de 1,6 C y en la corregida posteriormente predijo que sería de 1 C. La realidad ha demostrado que fue de 0,6 C. También, se ve en la Figura 16 que, ha habido periodos de calentamiento y enfriamiento moderados y en este momento es de estancamiento. La realidad ha demostrado que, todos los modelos numéricos, no solo el de Hansen, son erróneos.

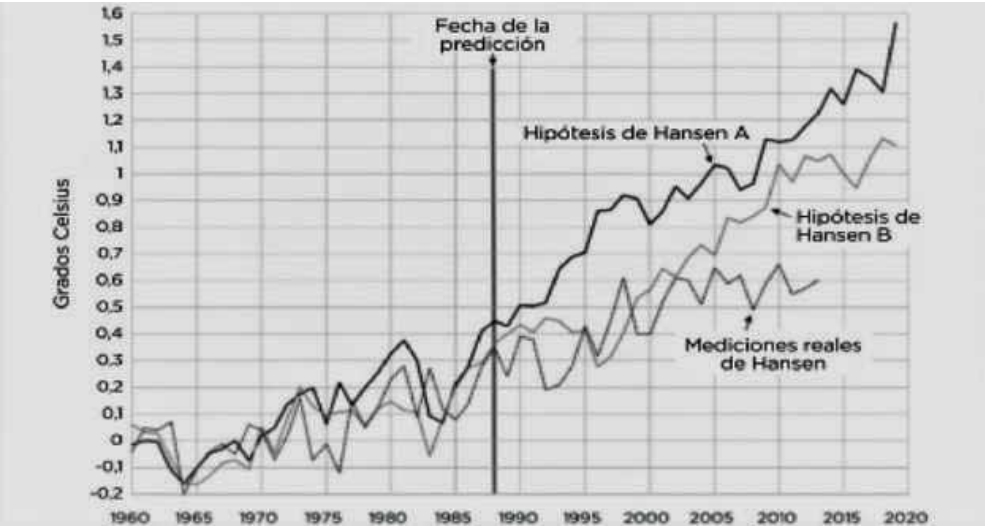


Figura 16. Las predicciones del modelo NASA/Hansen frente a la realidad: (1988); RSS; serie de datos Met Officce.
(La cuestión moral de los combustibles de Alex Epstein, versión española de Alexandre Casanovas).

5.3. En la fabricación del vehículo eléctrico

Hay diferentes estudios y opiniones exponiendo que, la contaminación por el montaje de un coche eléctrico es superior en un 60%, al de uno de combustión interna, debido al proceso de fabricación y transporte de la batería.

Volvo lo corrobora en uno de sus informes, al manifestar que producir un "C40 Recharge" eléctrico genera un 70% más de emisiones contaminantes que, la fabricación de un "XC40" con motor de combustión interna, a pesar de que ambos modelos comparten muchas de sus piezas. Solo en términos de componentes y materiales, las versiones con batería requieren de un proceso de producción más contaminante y concluye que la huella de carbono (CO2) de fabricar el "C40 Recharge" no se compensa hasta los 110.000 Km con la del "XC40" de combustión interna, suponiendo que la energía eléctrica que se utiliza en la recarga de la batería sea de origen "renovable" o "nuclear".

Figura 17. Volvo C40 Recharge y Volvo XC 40.

5.4. Reciclaje de las baterías

Las baterías usadas en automoción están compuestas por metales tóxicos, materiales plásticos y también por ácidos, un poco de todo. Materiales recuperables, pero también peligrosos y contaminantes. En la actualidad existen dos métodos de reciclaje:

- Pirometalurgia, primero las celdas se trituran mecánicamente, posteriormente se queman y por último se extraen los metales.
- Hidrometalurgia, se sumergen los materiales de la batería en baños de ácido, produciendo una sopa cargada de metal.

A veces, se combinan los dos métodos para obtener mejores resultados y ambos procesos producen una gran cantidad de desechos y de gases de "Efecto Invernadero".

5.5. En la construcción operación y reciclaje de elementos constitutivos de las instalaciones Renovables

5.5.1. Solares:

- Materiales:
  - o Poli silicio que se obtiene partir de silicio de grado metalúrgico mediante un proceso de purificación química, proceso Siemens. Se realiza en hornos gigantes, que consumen gran cantidad de electricidad, con emisiones de CO2, S y 4 t de tetracloruro de silicio/ t de poli silicio obtenido. Gran impacto ambiental.

  - Plata.
  - Cadmio o plomo (tóxicos).
- Fabricación y transporte: más del 50% de los paneles se construyen en China, Corea, Japón y USA, y en el conjunto de estos países para la generación de energía eléctrica se utiliza, entre otras fuentes, carbón y gas. Además, se genera huella de carbono en su transporte en barco.
- Los macro parques:
  - Expulsan del territorio rural a los agricultores y ganaderos.
  - Provocan un tremendo impacto ambiental y a la biodiversidad.
  - Afecta a la calidad de vida de los vecinos y al turismo rural.
  - Se sacrifica al medio rural para disminuir la contaminación en las conurbaciones.

Figura 18. vista del Parque Núñez de Balboa en Usagre (Badajoz).

El Parque Núñez de Balboa en Usagre (Badajoz) Figura 18, es el mayor de Europa con 500 megavatios, que ocupa 1.000 ha, una extensión equivalente a unos 1.500 campos de fútbol.

5.5.2. Eólicas:

- Palas de longitud 80 m/100 m. Impacto en su fabricación, pues están constituidas con plástico, fibra de vidrio y unos 150 m3 de madera de balsa, cosida con resina epoxi o poliéster.
- Muerte de insectos y aves por colisión, tanto las que moran en el ecosistema, como las aves migratorias. Un parque eólico puede causar hasta 8 millones de muertes de aves y murciélagos por año, en sus primeros años, por colisiones, según la Sociedad Española de Ornitología (SEO/BirdLife, 2011).
- Alteran la fauna y la flora local.
- Impacto al medio hídrico.
- Impacto al paisaje.
- Contaminación sonora, más de 90 DB/ por aerogenerador.

5.6. Transporte de la energía eléctrica para instalar Puntos de Recarga de Vehículos (PR)

El Gobierno de España dice que, destinará 525 M€ con el objeto de incrementar la red de recarga pública para los vehículos eléctricos y la Cámara de Comercio de España ha manifestado que, para el año 2023 se prevén 100.000 Puntos de Recarga (PR) y para el "famoso" año 2030, 3.300.000 (PR), de los cuales 289.130 (PR) serán públicos, "el papel lo aguanta todo". Son previsiones "idílicas" que, orillan el gran problema del transporte y distribución de la energía eléctrica, necesaria para la recarga de este tipo de vehículos, desde las Centrales de Generación de energía o Subestaciones hasta los (PR), al estar las actuales redes de transporte y distribución prácticamente saturadas y que el construir nuevas líneas, además de un coste económico elevado, producirá nuevos impactos ambientales como vemos a continuación:

- Electrolineras interurbanas, a pie de carretera, con una gran inversión, unida a una problemática tramitación, por los siguientes motivos:
  - Puntos de Recarga (PR) de más de 150 KW, para poder recargar la batería de un vehículo, en un periodo de tiempo comprendido entre 10 y 30 minutos.
  - Cinco (PR) por cada electrolinera, necesita una potencia total de 1.000 MVA y, además:
    - Una Estación Transformadora 25.000/380 V.
    - Una línea de alimentación a 25.000 V, que la una con una Subestación de Transformación o Transformador, puede estar entre 5 Km y 50 Km.
    - Permisos de las diversas Administraciones y negociar servidumbres de paso con los propietarios afectados.
    - Impacto medioambiental.
- Puntos de recarga rápidos urbanos, los actuales (PR) rápidos, tanto públicos como privados, están quedando obsoletos por la lentitud del proceso de recarga. En un periodo máximo de 4 años la potencia unitaria mínima exigida por los usuarios será de 150 KW, con el problema de saturación que tenemos en las actuales estaciones de transformación, en las redes de distribución y de alimentación.
- Puntos de recarga lentos urbanos, con una potencia unitaria, mínima, de 3,5 KW, instalados principalmente en los garajes de las Comunidades de Propietarios, necesitan unas 8 horas para recargar la batería de un vehículo. Problemas:
  - Difícil de compartir un (PR) por varios inquilinos, al realizarse la mayoría de las recargas en horario nocturno, por la necesidad de disponer del vehículo en horario diurno y por la economía de la recarga (horas valle).
  - Para un bloque de 32 viviendas y 38 plazas de aparcamiento, se hace una previsión de potencia eléctrica de 90 KW, sin tener en cuenta los (PR). Si el 50% de los vehículos que ocupan las citadas plazas lo quieren recargar en horario nocturno, la previsión de potencia para tal fin será de 66 KW, con lo que quedarán libres para los servicios comunes del edificio únicamente 23 KW. Situación que obligará a la Comunidad de Propietarios a contratar, como mínimo, 50 KW adicionales para disponer de 1,5 KW por vivienda, en horario nocturno, si lo permite la potencia libre del transformador que alimenta el edificio o grupo de edificios y las líneas que transportan la energía eléctrica hasta dicho transformador.

5.7. Episodio de incendio de un vehículo eléctrico en un túnel

Un vehículo eléctrico puede incendiarse, en el interior de un túnel, después de un impacto contra un elemento de la infraestructura del túnel o con otro u otros vehículos, principalmente por dos circunstancias:

- Sobrecalentamiento debido a un cortocircuito en el paquete de baterías.
- Rotura o perforación de una o varias celdas del paquete de baterías.

En ambos casos, los separadores entre el ánodo y el cátodo se rompen o derriten, originando una reacción química en el litio, liberándose por tal circunstancia:

- O2.
- CO2.
- CoO.
- NiO.
- MnO2.
- Metales pesados.
- Calor.

Este calor liberado inicialmente, se va incrementando de modo acelerado en un proceso llamado "thermal runaway" (embalamiento térmico), por la propia temperatura que genera, entrando en un bucle que origina el incendio. Dicho fenómeno es debido a la reacción química, al ocupar los gases que se van liberando cada vez más espacio y generando más calor, finalizando con el agrietamiento o rotura del paquete de baterías y con la liberación de todos los gases con el resto de los componentes, como Litio, a temperatura de unos 600°C que, fácilmente, pueden llegan a 2.000°C.

Todos estos elementos liberados en el proceso de un incendio son agresivos para el medio ambiente y directamente para los seres vivos produciendo reacciones alérgicas y cierta afección a las vías respiratorias.

Otro problema que, obligará a rehacer los protocolos para la resolución de un episodio de incendio en un túnel, para establecer como se aborda y soluciona esta situación, contemplando las siguientes recomendaciones:

- Tener la ficha de rescate de los fabricantes de los vehículos eléctricos.
- En primer lugar, hay que identificar si el vehículo incendiado es de combustión interna o eléctrico, tarea no siempre fácil, si el incendio está muy avanzado:
    - Si no tiene tubo de escape, ni depósito de carburante es eléctrico.
    - La antigüedad de la matrícula puede dar una orientación.
    - El etiquetado medioambiental.
    - Visualización cable de color naranja o enchufe de recarga.
    - Un vehículo híbrido es difícil de identificar.
- Si el vehículo es eléctrico o híbrido, identificar la ubicación de la batería, suele estar:
    - Camiones, en los laterales, en sustitución de los depósitos de carburante.
    - Autobuses, techo y raramente junto al motor.
    - Coches, maletero, bajo el asiento trasero y bajo el suelo (todos de difícil acceso).

- Determinar si el incendio está afectando al compartimento del paquete de baterías.
- Asegurar la zona y resto de actuaciones preventivas con personas y estructura, como en el caso de incendio de un vehículo de combustión interna.
- Proceder a la evacuación y rescate de las personas.
- Atacar el fuego:
    - Hay que prever un caudal de unos 10.000 l de agua, en uno de combustión interna entre 500 l y 2.000 l. Se tardará entre 2h y 4h en su extinción y puede reiniciarse.
    - Paralelamente retirar o mover los vehículos atrapados en el interior del túnel, con el objeto de dejar un paso franco que permita la extracción del vehículo hasta el exterior del túnel. Esta complicada operación es recomendable combinarlo con una refrigeración del vehículo.
- Dejar el coche extraído, en un área confinada en el exterior del túnel, durante 48h hasta que se enfríe o dejarlo arder de forma controlada, en el caso de reinicio del incendio.
- Tratamiento de las aguas vertidas, al pavimento, hastiales y clave del túnel, durante el proceso de extinción del incendio, para eliminar las partículas del hollín y acido fluorhídrico, que además de tóxico y corrosivo, contamina las aguas, superando en 100 veces los límites máximos permitidos.

6. CONCLUSIONES, EL VEHÍCULO ELÉCTRICO TAMBIÉN CONTAMINA

Los vehículos con motores de combustión interna, cuyo combustible es de origen fósil, emiten a la atmosfera del planeta Tierra CO2 y otros gases de "Efecto Invernadero", por los túneles y vías a lo largo de las cuales circulan, lo cual es evidente y nadie lo quiere negar.

Si aceptamos que, la emisión a la atmósfera de CO2 y de otros gases de "Efecto Invernadero" colaboran en gran manera al "Calentamiento Global" y al "Cambio Climático", a la vista de lo expuesto tendremos que admitir que EL VEHÍCULO ELÉCTRICO TAMBIÉN CONTAMINA, al igual que los que utilizan combustibles fósiles, al trasladar la emisión de CO2 y de los gases de "Efecto Invernadero" desde su entorno de circulación a otros lugares y países más o menos remotos, y como estos gases no son localista y no entiende de Ciudades, Autonomías, Estados y otras divisiones político-territoriales, acaban llegando a la atmósfera del planeta Tierra, tal y como se ha expuesto, anteriormente, en esta ponencia y que resumo a continuación, como recordatorio:

- En el proceso de fabricación del paquete de baterías y en su posterior reciclaje.
- En la construcción, operación y reciclaje de los elementos constitutivos de las instalaciones de generación de electricidad con "Centrales de Energías Renovables".
- Al transportar por vía marítima las baterías, los paneles para los "Huertos Solares" y partes de los molinos de los aerogeneradores, desde el lugar de fabricación hasta el lugar de montaje. Los barcos utilizan combustibles fósiles.
- En el incendio de un vehículo eléctrico en el interior de un túnel.
- En España, la generación de energía eléctrica mediante "Centrales de Energías no Renovables" emite, más de 36 millones de tCO2, equivalente/año. La excepción son las Nucleares que no emiten CO2.
- En el Mundo, el 86% de la generación de energía eléctrica es mediante el consumo de combustibles fósiles.

Si queremos adquirir un vehículo eléctrico por exigencia de la normativa de alguna Administración o porque nos apetece probar esta tecnología, hagámoslo, pero no pensemos, ni digamos, al circular a bordo de un vehículo eléctrico, que "nuestro vehículo no contamina que verdes somos", pues no es cierto.

Con el Vehículo eléctrico practicamos un juego muy progre y occidental, el de esconder la suciedad debajo de la alfombra u "ojos que no ven corazón que no siente".

Los Gobiernos occidentales, especialmente los de la vieja Europa, no tienen argumentos para "convencer al ciudadano" de lo estupendo que es adquirir vehículos eléctricos, pues la tecnología no está aún, suficientemente madura y el precio es elevado. Sin ser exhaustivo, se limitan a:

- Cobrar a los ciudadanos una nueva tasa por la "Huella de Carbono", diferente en cada país.
- Vender a los ciudadanos los falsos mensajes de los profetas del "Cambio Climático": estamos matando el planeta Tierra.
- Imponer prohibiciones y limitaciones al uso del vehículo de combustión interna, un ejemplo son las "ZBE".
- Gravar los combustibles fósiles con impuestos en cascada, actualmente el 200% de su coste real, luego gravará la electricidad para la automoción con igual voracidad.
- Omitir que, es posible utilizar las "Tecnologías de Emisiones Negativas" para eliminar el CO2 que está retenido en la atmósfera, en muy baja concentración, menos de 400 ppm:
    - Reforestación de bosques quemadas y tierras baldías, totalmente natural. Se podría retirar el 50% del CO2, retenido en la atmosfera.
    - Captura directa del aire (DAC), para capturar y tratar el aire con el objeto de separar el CO2 de otros gases y utilizarlo para la producción de urea, polímeros, etc.
- Obviar que, en el "Cambio Climático" poca participación tienen los vehículos de combustión interna, al ser este cíclico y recurrente, debido a la variación en la inclinación del eje de la tierra y la actividad solar.

Solo son verdes los coches pintados de verde.

Agradecimientos, quiero agradecer la colaboración activa o pasiva a las siguientes instituciones o empresas: RACC, Libertad Digital, en las personas de Domingo Soriano y Manuel, VOLVO, SEAT y. Applus+ TST (Centro Experimental – San Pedro de Ánes).

INSTALACIÓN DE PUNTOS DE CARGA ELÉCTRICA EN TÚNELES DE CARRETERA

Alberto Cuadrado Madrona
IDOM

En el contexto del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia del Gobierno de España se ha fijado como objetivo para 2023 alcanzar en nuestro país al menos 100.000 puntos de recarga y 250.000 vehículos eléctricos. La dotación actual de puntos para recarga eléctrica es ligeramente superior a 11.500, por lo que lograr el objetivo mencionado requerirá de un esfuerzo notable tanto desde el ámbito público como el privado.

Adicionalmente, dichos puntos de recarga se concentran de manera mayoritaria en los grandes núcleos urbanos, lo que dificulta la movilidad interurbana del vehículo eléctrico, teniendo en cuenta la autonomía actual del mismo y el tiempo requerido para su recarga.

En ese sentido, en el marco de los actuales planes de recuperación para Europa, en el presente artículo se realiza un análisis de factibilidad para la implantación de puntos de recarga eléctrica en túneles de carretera con la finalidad de aprovechar la infraestructura eléctrica ya disponibles a lo largo de la red viaria española. Este enfoque, persigue los siguientes objetivos.

1. Mejora de la red de puntos de recarga en la red vial, impulsando así la movilidad eléctrica interurbana.
2. Utilización de la infraestructura eléctrica desarrollada en torno a los túneles de carretera, usualmente situadas en zonas orográficamente complejas.
3. Aprovechamiento de la alta potencia eléctrica contratada para la operación en emergencia de los túneles, utilizada íntegramente de manera poco habitual.
4. Impulso de la vertebración del territorio

En el presente artículo se describen los conceptos básicos relacionados con los puntos de recarga de vehículo eléctrico, se analiza la problemática en lo referente a su instalación en los túneles de carretera y se analizan algunas experiencias previas ya desarrolladas.

INSTALLATION OF ELECTRIC CHARGING POINTS IN ROAD TUNNELS

In the context of the Spanish Government's Recovery, Transformation and Resilience Plan, a target has been set for 2023 to reach at least 100.000 recharging points and 250.000 electric vehicles in Spain. The current number of electric recharging points is slightly more than 11.500, so achieving the aforementioned objective will require a considerable effort from both the public and private sectors.

In addition, these charging points are mostly concentrated in large urban centres, which makes interurban mobility of electric vehicles difficult, bearing in mind their current range and the time required to recharge them.

In this sense, within the framework of the current recovery plans for Europe, this article carries out a feasibility analysis for the implementation of electric charging points in road tunnels in order to take advantage of the electric infrastructure already available along the Spanish road network. This approach pursues the following objectives.

1. Improvement of the network of recharging points on the road network, thus promoting interurban electric mobility.
2. Utilisation of the electrical infrastructure developed around road tunnels, usually located in orographically complex areas.
3. Use of the high electrical power contracted for the emergency operation of tunnels, which is rarely used in its entirety.
4. Promotion of the structuring of the territory.

This article describes the basic concepts related to electric vehicle charging points, analyses the problems related to their installation in road tunnels and analyses some previous experiences already developed.

INSTALLATION DE BORNES DE RECHARGE ÉLECTRIQUE DANS LES TUNNELS ROUTIERS

Dans le cadre du plan de relance, de transformation et de résilience du gouvernement espagnol, un objectif a été fixé pour 2023: atteindre au moins 100.000 points de recharge et 250.000 véhicules électriques en Espagne. Le nombre actuel de points de recharge électrique étant légèrement supérieur à 11.500, la réalisation de l'objectif susmentionné nécessitera un effort considérable de la part des secteurs public et privé.

En outre, ces points de recharge sont principalement concentrés dans les grands centres urbains, ce qui rend difficile la mobilité interurbaine des véhicules électriques, compte tenu de leur autonomie actuelle et du temps nécessaire pour les recharger.

En ce sens, dans le cadre des plans de relance actuels pour l'Europe, cet article réalise une analyse de faisabilité pour l'implantation de bornes de recharge électrique dans les tunnels routiers afin de profiter de l'infrastructure électrique déjà disponible le long du réseau routier espagnol. Cette approche poursuit les objectifs suivants.

1. Amélioration du réseau de points de recharge sur le réseau routier, favorisant ainsi la mobilité électrique interurbaine.
2. Utilisation de l'infrastructure électrique développée autour des tunnels routiers, généralement situés dans des zones orographiques complexes.
3. Utilisation de la puissance électrique élevée contractée pour l'exploitation d'urgence des tunnels, qui est rarement utilisée dans sa totalité.
4. Promotion de la structuration du territoire.

Cet article décrit les concepts de base liés aux bornes de recharge pour véhicules électriques, analyse les problèmes liés à leur installation dans les tunnels routiers et analyse certaines expériences déjà développées.

1. ANTECEDENTES

En el contexto del Plan de Recuperación Transformación y Resiliencia del Gobierno de España, se ha fijado como objetivo para 2023 que el país disponga de 100.000 puntos de recarga y un parque móvil de 250.000 vehículos eléctricos.

Actualmente, se estima que en España existen aproximadamente 11.500 puntos de recarga de acceso público para vehículo eléctrico (www.electromaps.com), por lo que se considera que el crecimiento en la instalación de este tipo de infraestructuras ha de ser exponencial en los próximos años, requiriendo para ello un esfuerzo notable tanto desde el ámbito público como el desde el ámbito privado.

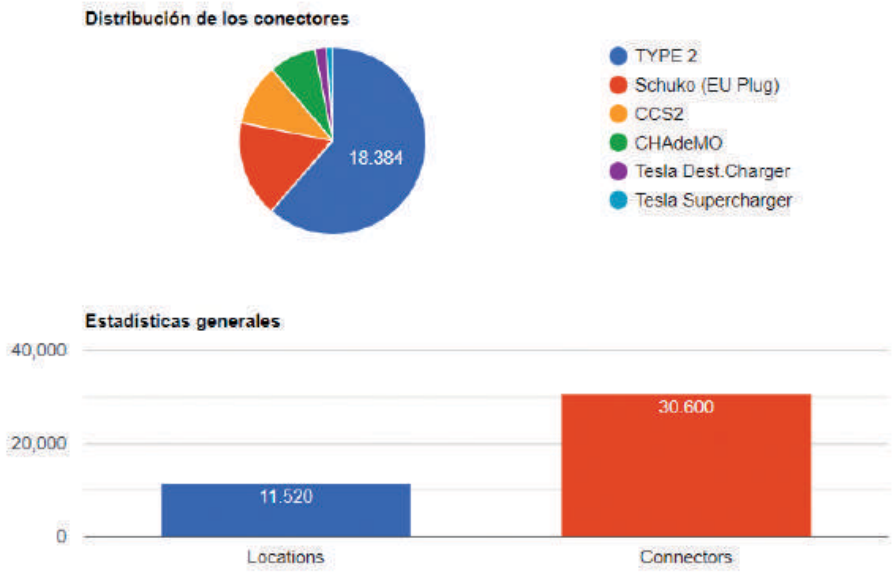


Figura 1: Estadística ELECTROMAPS (11/08/2022)

Por otra parte, una de las mayores preocupaciones por parte de los potenciales usuarios de vehículo eléctrico es la actual concentración de estos puntos de recarga en torno a los grandes núcleos urbanos, lo que implica dificultades para el desarrollo de la movilidad interurbana a la luz de la autonomía actual de este tipo de vehículos, así como al tiempo medio requerido para su recarga en la mayor parte de los cargadores actualmente disponibles.

A este respecto, parece que la solución a este problema pasa por impulsar la instalación de puntos de recarga rápida o ultrarrápida en las vías interurbanas de manera que se ofrezcan garantías a los usuarios del vehículo eléctrico a la hora de afrontar viajes de manera cómoda, independientemente de que estos sean largos o atraviesen zonas alejadas de los núcleos urbanos.

Sin embargo, este tipo de puntos de recarga rápida requieren una potencia considerable (superior a 50 kW por punto de suministro), por lo que su instalación en el ámbito interurbano supone costes importantes, dada la necesidad de distribuir potencia a lo largo de las carreteras, acometer procesos de solicitud de condiciones de suministro a la compañía eléctrica, desarrollar proyectos, reforzar las líneas de transporte asociadas, etc. Por este motivo, dado el objetivo establecido y el plazo disponible, una de las líneas de trabajo más razonables puede ser la utilización de infraestructuras ya existentes y electrificadas, de manera que se pueda aprovechar su excedente de potencia para ubicar nuevos puntos de recarga.

En ese sentido, se ha identificado que los túneles de carretera pueden ser una buena alternativa para la instalación de puntos de recarga, particularmente en el caso de aquellos de cierta longitud (en general de más de 500 m), debido a que son infraestructuras que ya cuentan con un suministro eléctrico de potencia significativa debido a que están dimensionados para soportar las demandas eléctricas de su sistema de ventilación en situación de emergencia.

En este sentido, es importante apuntar que esta idea presenta varios aspectos positivos que lo sitúan como una línea de trabajo interesante:

- Las nuevas tecnologías conducentes a la reducción del consumo eléctrico habitual en los túneles (como la iluminación basada en LED o la propia reducción de ventilación sanitaria debido a la reducción de contaminantes emitidos por los nuevos vehículos eléctricos o híbridos eléctricos), van a incrementar el margen de potencia disponible en túneles inicialmente concebidos para un consumo eléctrico habitual mayor.
- El consumo energético habitual de los túneles interurbanos es notablemente inferior al de los túneles urbanos debido a que registran niveles de tráfico menores, por lo que el margen de potencia disponible es mayor.
- Una parte de los túneles en servicio se encuentran en un proceso de actualización para adaptarse a la Directiva Europea 54/2004/CE sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la Red Transeuropea de Carreteras y al Real Decreto 635/2006 subsiguiente que traspuso dicha Directiva. Algunas de esas obras de actualización de túneles han comenzado ya y otras muchas se han licitado recientemente o se licitarán en un corto plazo, lo que va a suponer que durante los próximos años una buena parte de los túneles afectados por dicha Directiva se encuentren en obras. Esta circunstancia puede aprovecharse para agilizar y promover la incorporación de puntos de recarga en los túneles en rehabilitación.
- La instalación de puntos de recarga en las zonas donde se encuentran algunos túneles interurbanos puede contribuir a dinamizar el ámbito rural, contribuyendo así a fijar la población.
- Los túneles cuentan con una estructura de gestión, explotación y mantenimiento ya implantada susceptible de adaptarse con cierta facilidad para gestionar los puntos de recarga. Adicionalmente, la flota de vehículos necesaria para dichas labores de explotación y mantenimiento, podrían beneficiarse de la implantación de este tipo de instalaciones.

2. OBJETO

El objeto del presente artículo es realizar una aproximación a la posibilidad de aprovechar el excedente de potencia eléctrica disponible en los túneles de carretera para la implantación de estaciones de recarga de vehículos eléctricos, apoyando así la mejora de la infraestructura de recarga eléctrica en las vías interurbanas.

3. NORMATIVA

La instalación de puntos de recarga en las inmediaciones de un túnel de carretera, como cualquier punto público de recarga para vehículos eléctricos, deberá cumplir con el Reglamento Eléctrico de Baja Tensión (REBT), que es el reglamento de obligado cumplimiento que prescribe las condiciones de montaje, explotación y mantenimiento de instalaciones de baja tensión.

De manera adicional, dada la naturaleza de este tipo de obra, esta instalación debería cumplir con la Instrucción Técnica Complementaria ITC BT-52 sobre Infraestructura para la recarga de vehículos eléctricos.

Por su parte, al tratarse de instalaciones relacionadas con un túnel de carretera y conectarse de su red de alimentación, debería respetarse lo establecido en el Real Decreto 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado, especialmente en lo concerniente a las capacidades del túnel en situación de emergencia y la redundancia en términos de alimentación eléctrica.

4. POTENCIAL DE APLICACIÓN

Como ya se ha comentado, la idea de instalar puntos de recarga para vehículos eléctricos en los túneles de carretera tiene como objeto la utilización de las capacidades eléctricas de que disponen muchos túneles (especialmente aquellos con importantes dotaciones de ventilación) y que no se utilizan durante la operación normal de los mismos.

En este sentido es importante apuntar que la mayoría de los túneles de más 500 m presentan sistemas de ventilación mecánica cuyo valor de potencia total suele situarse entre 200 y 500 kW según las condiciones concretas de cada túnel, lo que permitiría la instalación de uno o dos puntos de carga rápida.

Este valor de potencia instalada, puede ascender hasta valores cercanos a 5000 kW en túneles de gran longitud, como pueden ser los casos de Guadarrama, Somport o Juan Carlos I, donde el número máximo de puntos de recarga puede multiplicarse, siendo seguramente otros aspectos como el espacio disponible el factor limitante para su implementación.

Adicionalmente, hay que tener en cuenta que existen otras circunstancias que van aumentar la diferencia entre potencia instalada y potencia utilizada en los túneles de carretera, como pueda ser la sustitución de las luminarias de vapor de sodio por luminarias LED. Como se sabe, esta mejora puede reducir en un 50% por ciento el valor de potencia utilizada por la iluminación, por lo que es de esperar que el futuro próximo el valor de potencia eléctrica aprovechable en los túneles de carretera aumente todavía más.

5. CONCEPTOS BÁSICOS

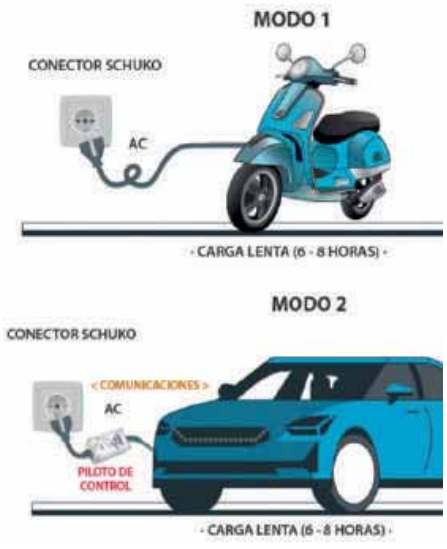
A continuación, se presentan algunos conceptos básicos sobre recarga de vehículos eléctricos con objeto de conocer las implicaciones y necesidades de la implementación de puntos de recarga en túneles de carretera.

5.1. Modos de recarga

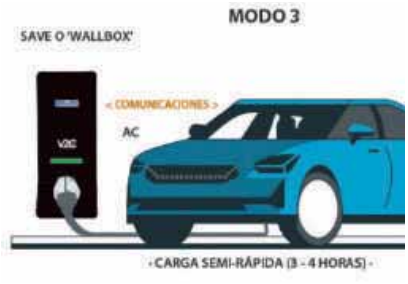
Actualmente, existen diferentes modalidades de recarga del vehículo eléctrico:

Modo 1. Consiste en aquella carga que se realiza desde una toma no exclusiva para ello, mediante la utilización de una toma de fuerza clásica doméstica (tipo Schuko a 230V). Este tipo de carga se aconseja sólo para pequeñas motos, bicicletas o patinetes eléctricos, y no está indicada para vehículos o motos de mayor potencia, ya que no dispone de ningún tipo de elemento de seguridad.

Modo 2. Se trata de un tipo de carga lenta en corriente alterna, destinada al uso doméstico, que se realiza mediante una toma tipo Schuko a 230V y con un máximo de potencia de 3,7kW. El vehículo, se conecta a la red eléctrica mediante su conector/adaptador, lo que le confiere mayor seguridad a la recarga.



Modo 3. Se trata de un modo de recarga destinado exclusivamente a recargar vehículos eléctricos. Este tipo de carga permite tanto recarga monofásica como trifásica en corriente alterna de hasta 22kW. En este caso, se cuenta con un dispositivo tipo wallbox que incorpora varios sistemas de protección necesarios para la seguridad de la instalación eléctrica y del propio vehículo. La conexión del vehículo eléctrico a la red de corriente alterna se realiza mediante un conector específico, que será Tipo 1 (SAE J1772 o Yazaki) o Tipo 2 (IEC 62196-2 o Menekes) dependiendo de las características del vehículo.



Modo 4: Este tipo de recarga es la más rápida, y se realiza en una estación fuera de cualquier vivienda o garaje, permitiendo recargar, como mínimo, un 70% de la batería en menos de 30 minutos en corriente continua. El modo 4 es considerado como tal a partir de 50 kWh y se distingue entre:

- Carga rápida
- Carga super rápida
- Carga ultra rápida

En viajes interurbanos o para uso intensivo, el servicio demandado será recarga ultrarrápida. Este tipo de carga es la existente habitualmente en estaciones de uso público exterior (tipo electrolinera) ya que es la que permite realizar la recarga de un vehículo en un menor espacio de tiempo.

5.2. Tipos de conectores

Actualmente existen los siguientes tipos de conectores empleados en la recarga de vehículos eléctricos:

Tipo 1 (SAE J1772). Normalmente denominada Yazaki, cuenta con cinco bornes: dos de corriente, dos complementarios (comunicación con el vehículo) y un último de tierra. En este caso cuenta con dos niveles de recarga. Por un lado, permite realizar una carga lenta de hasta 16 amperios y, por otro, se pueden alcanzar 80 amperios de la recarga rápida (hasta 19,2 kW).

Tipo 2 (IEC 62196-2): normalmente denominado Mennekes, cuenta con siete bornes: tres destinados a fase (permitiendo carga trifásica), uno al neutro, uno a toma de tierra y uno adicional para comunicaciones con el vehículo. Es posible alcanzar 16 amperios en carga monofásica, llegando hasta los 63 amperios en carga trifásica (hasta 43 kW).

Tipo 3: normalmente denominado Scame, está prácticamente en desuso en la actualidad. Este conector cuenta con dos variantes. Por una parte la 3A con cuatro bornes (fase, neutro, tierra y comunicaciones) que soporta cargas monofásicas de hasta 16 amperios, y por otra parte la 3C con siete bornes (como el Mennekes) que permite cargas monofásicas o trifásicas de hasta 32 amperios (con un máximo de 22 kW).

Conector CHAdeMO: cuenta con 10 bornes y está concebido para las cargas rápidas en corriente continua, pudiendo alcanzar hasta 200 amperios (hasta 62,5 kW). Si bien el conector CHAdeMO ha sido el más utilizado en los últimos años, la evolución de la tecnología lo está dejando obsoleto para las grandes potencias a las que está tendiendo el mercado.

Conector combinado CSS (IEC 62196-3), normalmente denominado Combo 1 o Combo 2. Se trata básicamente de la combinación de un conector de corriente alterna con una parte inferior de dos bornes para corriente continua. Permite la carga en los modos 2, 3 y 4 utilizando una sola toma. En corriente alterna se podría llegar hasta los 63 amperios (43 kW) como en el caso del Mennekes, mientras que en corriente continua podría alcanzar una recarga rápida, super rápida o ultra rápida.

Los conectores son diferentes según su localización: Estados Unidos o Europa:

- CCS1 (Estados Unidos). El conector, al que se la han unido los dos pines de continua, es un conector Yazaki o Tipo 1.
- CCS2 (Europa). Es un conector Mennekes o Tipo 2, unido a dos grandes pines de corriente continua que le permiten transferir grandes potencias.

5.3. Distribución de carga

Las estaciones de carga para vehículos eléctricos pueden presentar distintos esquemas para la distribución de la carga disponible.

Sistema 1: todas las etapas de potencia en una sola cabina.

En este sistema, la totalidad de la potencia se encuentra en la cabina principal, donde se localizan asimismo todas las etapas de potencia. Adicionalmente, existen dispensadores para la recarga, que pueden encontrarse alejados de dicha cabina de potencia. Por ejemplo, si la cabina es de 200kW, repartirá en los pequeños cargadores la potencia que los vehículos demanden, haciendo el balance de potencias necesario en la propia cabina.

Sistema 2: etapas de potencia en cargadores individuales, y dispensadores.

En este sistema, similar al anterior, el cargador principal hace también la función de cabina principal de potencia, disponiendo asimismo de todas las etapas de potencia. Conectados a él, se encuentran el resto de dispensadores para la recarga. Es importante comentar que, en este caso, la potencia máxima de este cargador principal será menor que en las cabinas del sistema 1, y por tanto también el número de dispensadores que puedan depender de él.

Sistema 3: cargadores individuales

En este sistema, cada cargador dispone de la potencia necesaria para el suministro con las etapas de potencia localizadas en cada uno de ellos.

Los primeros dos métodos o sistemas (1 y 2) solamente se conocen en un solo fabricante, por lo que inicialmente se recomienda el sistema 3.

5.4. Potencia de carga

La mayoría de los fabricantes de cargadores ya disponen de equipos que permiten realizar la carga con potencias que oscilan entre 50 kW y 360 kW.

Cabe destacar que los cargadores de más de 240kW, además de tener un precio notablemente más elevado, necesitan de mayor refrigeración, puesto que el factor más limitante en la potencia de carga es la temperatura generada. En este sentido, este tipo de cargadores presentan mangueras mucho más gruesas, ya a que a partir de 260kW la carga deja de realizarse a 400V para realizarse a 800V, con un amperaje aproximado de entre 400 y 500 A.

Por otra parte, es importante comentar que la potencia a la que se realiza la carga depende también de las limitaciones y la tecnología del vehículo.

Actualmente, los vehículos utilitarios (menos orientados a las cargas rápidas en el ámbito interurbano), permiten cargas máximas de entre 50 y 100 kW. Por su parte los compactos, presentan cargas máximas de entre 125 y 250 kW y las grandes berlinas, llegan en la actualidad a valores de carga máxima a 270kW.

5.5. Balanceo de potencias

Las estaciones de carga eléctrica deben gestionar el flujo de energía entre los diferentes puntos de carga en base al número de vehículos estacionados o a la potencia que admita cada uno durante el proceso de carga. En este sentido, es necesario controlar la energía que se suministra a través de estos cargadores, para que por una parte, no se exceda de la potencia contratada, y por otra, para que en situaciones de emergencia pueda disponerse de energía para aquellos servicios que así lo requieran.

Para realizar todo este proceso de control, ha de llevarse a cabo un balance de potencias que según su naturaleza puede ser de tipo estático o de tipo dinámico.

- Balance estático. En este caso se define una potencia o amperaje máximo por cargador mediante software, siendo este valor siempre fijo e inamovible independientemente de la energía disponible en el resto de la instalación.
- Balance dinámico. En este caso el balance se realiza mediante un Gestor de Carga Dinámico (DLM por sus siglas en inglés) que realiza un control continuo de la cantidad de energía empleada por los diferentes consumidores de la instalación y modifica consecuentemente el nivel de potencia máxima a asignar a cada uno de los puntos de carga en cada momento.

Si bien es cierto que el balanceo dinámico requiere de un DLM, y por tanto implica un coste añadido, este sistema permite un aprovechamiento total de la capacidad de carga de la instalación en su conjunto, disponiendo de toda energía excedente en todo momento en función de la demanda, y siendo por tanto energéticamente más rentable.

6. ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA

6.1. Arquitectura

Para la implementación de estaciones de recarga para vehículos eléctricos en un túnel, se podría plantear una configuración multipunto formada principalmente por los siguientes equipamientos o sistemas:

- Instalación eléctrica con centro de transformación
- Puntos de recarga
- Red de comunicaciones
- Centro de mando y control

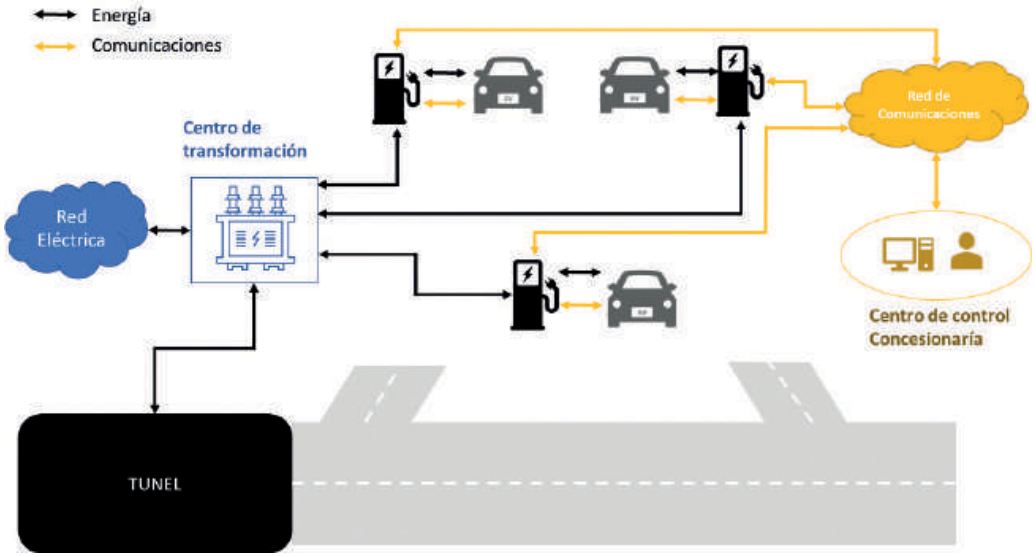


Figura 2: Esquema arquitectura de instalación de carga en túneles

Como se puede apreciar en el esquema anterior, se parte de un túnel cuyo sistema eléctrico está pensado para soportar el caso desfavorable de un incendio durante el cual toda la iluminación y gran parte (incluso toda) la ventilación esté funcionando al 100% de su capacidad. Esta circunstancia hace que el diseño del sistema de alimentación eléctrica este previsiblemente sobredimensionado respecto a las necesidades habituales en el túnel.

En este sentido, el concepto planteado se basa en el aprovechamiento de esta infraestructura eléctrica para la alimentación de estaciones de recarga para vehículo eléctrico, las cuales se conectarían directamente a los Centros de Transformación del túnel. A este respecto, el número de puntos de recarga a implantar estaría directamente relacionado con la disponibilidad de energía contratada y el dimensionado del sistema eléctrico del túnel.

La arquitectura de la instalación se completaría con una red de comunicaciones entre los puntos de recarga y el sistema de control, que permitiera su monitorización, el aporte de información al usuario y la gestión integral del servicio de recarga con la regla fundamental de que las necesidades operativas del túnel tengan siempre prioridad en la asignación de potencia eléctrica.

6.2. Requerimientos de espacio y localización

En muchas ocasiones, los túneles interurbanos se encuentran localizados en zonas de orografía complicada, por lo que los requerimientos de espacio físico para la maniobra, estacionamiento y carga de vehículos se presentan como aspectos especialmente críticos para la implantación de este tipo de instalaciones. A continuación, se analizan algunos de estos condicionantes.

6.2.1. Localización de los Centros de Transformación

La localización del Centro de Transformación (CT) del túnel condiciona las posibilidades de implantación de este tipo de estaciones de carga, ya que éstas han de ir conectadas directamente a los mencionados CT.

En este sentido, los puntos de carga deberían localizarse en las proximidades de la boca en la que se encuentre el CT, con objeto de minimizar los costes por instalación de cable eléctrico.

6.2.2. Superficie mínima de terreno

Se estima que la superficie mínima para la implantación de una estación de carga de vehículos eléctricos de este tipo es de 200 m2 para la localización de equipamiento y movilidad de los propios vehículos.

Esta circunstancia, supone que la implantación de este tipo de instalaciones quedaría restringida a aquellos túneles que dispongan de espacios amplios de parada de vehículos en las proximidades de la boca del túnel en el que se encuentra el CT, o allí donde resulte sencilla la generación de este tipo de superficies.

6.2.3. Accesos de entrada y salida

De manera adicional al requerimiento de espacio mínimo para la implantación de los puntos de recarga, debe considerarse la factibilidad de ejecución de accesos de entrada/salida seguros para la estación de recarga eléctrica.

En términos generales, deberán respetarse las disposiciones de la Norma 3.1-IC de Trazado publicada por el Ministerio de Fomento (Orden FOM/273/2016).

Así, deberá estudiarse la factibilidad de implementación de los accesos o salidas a los puntos de recarga, si bien debe apuntarse que los requerimientos de la citada normativa son menos restrictivos en caso de uso exclusivo por parte de los servicios de explotación que para los casos de uso público. En este sentido la implantación de puntos de carga para los vehículos de los servicios de explotación puede resultar más factible y sencilla.

6.3. Requerimientos técnicos

La implantación de una estación de recarga en las inmediaciones de un túnel conectada al sistema de alimentación eléctrica del mismo comporta una serie de condicionantes técnicos que sería importante considerar a la hora de acometer un proyecto de este tipo.

A continuación, se describen y comentan algunos de ellos.

6.3.1. Disponibilidad de potencia

Una de las razones principales en las que se asienta la idea de la disposición de puntos de recarga eléctrica en túneles de carretera es el aprovechamiento de potencia eléctrica disponible en zonas alejadas del entorno urbano.

En este sentido, el número de puntos de recarga que se podrán implantar estará limitado por el nivel de la potencia eléctrica disponible en el túnel. Normalmente, este aspecto estará relacionado con la dimensión del sistema de ventilación instalado en el túnel, por lo que es previsible que los túneles más largos, con mayores pendientes o con paso de mercancías peligrosas tengan una disponibilidad de potencia mayor y por tanto mayor capacidad de suministro a puntos de recarga.

6.3.2. Tipo de puntos de recarga

La naturaleza pública de estos puntos de recarga reduce las posibilidades en cuanto al modo de recarga al modo 4 de recarga rápida.

Adicionalmente, dado que no se estima que estas zonas de recarga dispongan de facilidades o servicios para usuarios como en el caso de las estaciones de servicio al uso, las cargas deberían poder realizarse en un tiempo máximo de 30 minutos, lo que orienta la elección de los cargadores a cargadores de tipo rápi-

dos (tanto super rápidos como ultra rápidos) y por lo tanto con una alta potencia disponible.

Por otra parte, la tendencia actual en cuanto a potencia máxima de carga de los vehículos eléctricos medios está en torno a 100kW, por lo que sería recomendable que la potencia mínima de los cargadores a instalar sea al menos de 100 kW, si bien sería recomendable alguno de ellos llegara a los 200 o 300 kW en previsión del aumento progresivo de capacidad de carga de los vehículos (especialmente de alta gama), en función siempre de la potencia disponible del túnel y el número de cargadores que se quieran instalar en el mismo.

Por su parte, es recomendable que los conectores disponibles sean del tipo Combo 2 (Configuración FF) según UNE-EN 62196-3.

6.3.3. Balanceo de potencias

Para instalaciones con disposición de energía fluctuante, como es el caso de los túneles, se recomienda la implementación de un sistema dinámico de balanceo de potencias mediante el uso de un DLM que permita el aprovechamiento de la totalidad de la energía disponible en todo momento.

Este enfoque debe permitir también cumplir con uno de los principales condicionantes de la implantación de este tipo de instalaciones en un túnel, la garantía de que las demandas de potencia por parte del túnel tendrán siempre prioridad sobre las demandas de los puntos de recarga, garantizando la seguridad de los usuarios del mismo.

6.3.4. Comunicaciones

Para el correcto desarrollo de la operación de los puntos de recarga sería necesario disponer de fibra óptica para la conexión de los mismos entre ellos y con el centro de control.

La conexión entre cargadores y con el sistema DLM puede realizarse mediante una topología en estrella o en anillo. Tras la consulta con fabricantes se recomendaría realizarlo mediante conexión en anillo, de tal manera que si falla un cargador o por alguna razón, no existe conexión por un extremo, la comunicación pueda desarrollarse por el extremo contrario.

En este sentido, se propondría comunicar el primer y último cargador con el DLM. Todos los cargadores pueden tener la función de maestro o de esclavo, pero en primera instancia, se definiría quién es el maestro inicial. En caso de fallo del cargador maestro inicial, que será uno de los ubicados en el extremo de la red de interconexión, el otro cargador situado en el otro extremo pasaría a tomar las funciones de maestro para gobernar todos los cargadores excepto el que ha perdido comunicación, el cual funcionaría en modo isla.

Por otra parte, debería gestionarse la comunicación de las estaciones de carga con el SCADA del centro de control del túnel con objeto de realizar la gestión del sistema (balance de potencia disponible), como el monitoreo de los datos e información de los cargadores de manera remota (número de recargas diarias, disponibilidad de cargadores, número de coches en carga, etc.).

Tras las consultas realizadas a los distintos fabricantes, se considera que esta comunicación entre el SCADA del túnel y el sistema de control de los cargadores eléctricos se podría realzar a través de una API.

Finalmente, sería recomendable que la zona en la que se sitúen los puntos de carga tuviera disponibilidad de conexión 4G para poder organizar su operación e interfaz con el usuario mediante una APP de teléfono móvil.

6.4. Requerimientos operacionales

6.4.1. Gestión de la potencia

Como ya se ha comentado, uno de los requisitos más importantes para la viabilidad de este tipo de instalación es la priorización de la disponibilidad de potencia eléctrica en el túnel en caso de emergencia. Esta gestión se realizará mediante la implementación de un Sistema de Gestión Dinámica de potencia (DLM). Adicionalmente, en una caso de emergencia de este tipo, el sistema de control pasaría el sistema de recarga a modo latente con un mínimo de funcionamiento. No se considera adecuado dejar sin ningún suministro los vehículos que están en modo de carga ya que el sistema de carga del vehículo detectaría una pérdida de carga y posteriormente no sería posible reiniciar la misma.

6.4.2. Gestión de la instalación

Por otra parte se debe realizar una gestión adecuada de usuario, implantando una plataforma de gestión (independiente al DLM), para que el propietario de la instalación (Concesionaria) pueda monitorizar a tiempo real desde sus servidores el estado, datos y señales de los cargadores.

El sistema contemplaría la inclusión o adhesión a un servicio de gestión de cuentas de vehículo eléctrico ya existente, de tal manera que los usuarios del vehículo eléctrico que hagan uso de la infraestructura viaria concesionada se puedan dar de alta o baja para acceder al servicio de recarga, observar consumos, disponibilidad y reserva de plazas, tiempos de recarga, experiencias de otros usuarios, etc. siendo el Concesionario quien gestione la zona de puntos de recarga.

Dado que se considera que esta zona de recarga no estaría atendida presencialmente por personas, se debería instalar un sistema de videovigilancia mediante CCTV sobre el aparcamiento, así como un sistema de comunicaciones con un servicio de atención al usuario (en caso de que los cargadores sean de uso público), y un sistema de telecomunicaciones para la gestión de todo lo anterior.

6.4.3. Aparcamiento y control de accesos

El sistema contemplaría la gestión de espacio de aparcamiento y de recarga, es decir, el usuario en todo momento ha de conocer el número y los vehículos que se encuentran dentro del punto de recarga. Para ello incluirían en la instalación dispositivos de control de accesos mediante tecnología ALPR (Automatic License Plate Recognition), detección de vehículos mediante video y elementos que permitan controlar el acceso al punto de recarga, tipo barreras automáticas.

Así, el usuario podría estar dado de alta previamente al sistema de cuentas mediante la matricula. Al llegar a la entrada del punto de recarga el sistema ALPR detectaría y autorizaría la entrada a la zona de recarga mediante la apertura de la barrera de entrada. Una vez el vehículo estuviera recargado, el sistema ALPR reconoce la intención de salir del vehículo y se le permite la salida a través de la barrera de salida.

Este proceso requiere que el sistema de control de accesos incluya CCTV, ALPR y barreras de acceso y salida.

6.5. Requerimientos comerciales

Se debería establecer una estrategia comercial y de precios de manera que se eviten aglomeraciones en torno a los puntos de carga de usuarios atraídos por un precio excesivamente bajo, si bien al mismo las tarifas deberían ser lo suficientemente asequibles como para que un usuario que lo necesite no dude en realizar una carga rápida en este tipo de puntos.

6.5.1. Tarifas y formas de pago

Sería necesario analizar las estrategias de uso y pago a implantar en función del objeto último de la instalación (público, para vehículos de los servicios de explotación, etc.).

Como ya se ha comentado, se estima que este servicio debería poder operar 24h al día sin supervisión humana, por lo que sería necesario implementar un sistema de pago automático. Entre las diferentes formas de pago disponibles en los puntos de carga existen las siguientes:

- Aplicación: la misma aplicación que permite realizar una gestión de recargas, reserva de plazas y posterior gestión de los datos realizados será la que pueda posibilitar el pago a través de una aplicación, actuando de intermediario entre el usuario y, la propiedad o explotador.
- TPV: la tendencia actual es que a medio plazo los cargadores dispongan de un lector de tarjetas incorporado, comunicado vía 4G, para permitir un pago directo y sin intermediarios de aplicaciones.
- Tarjetas monedero: se podría implementar la lectura de tarjetas monedero con lectores NFC.
- Gratuito: se puede implementar la gratuidad de la energía.

6.5.2. Servicios de Información al Usuario

Estás infraestructuras de recarga o entornos controlados, deberían estar debidamente señalizadas mediante Paneles de Mensaje Variable (PMV) a lo largo de las vías próximas al punto de recarga ofreciendo también información al usuario sobre el siguiente punto de recarga.

Por otra parte, la información sobre la existencia de esta instalación de carga debe ofrecerse por otros métodos como las aplicaciones móviles, en las que se ofrezca también información sobre su disponibilidad para la recarga en espacio y en tiempos de recarga, así como la posibilidad de gestionar la reserva de estos puntos de recarga.

En las inmediaciones de las instalaciones, cerca del punto de entrada, se señalizará su existencia con señales, así como en las propias las plazas destinadas a la recarga, tanto con señales verticales como horizontales.

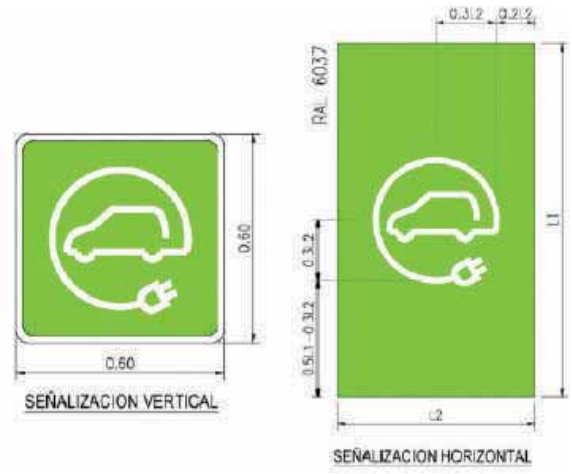


Figura 3. Señalización

7. EXPERIENCIAS PREVIAS

7.1. Montblanc

El túnel de Mont-Blanc une Francia con Italia atravesando los Alpes en una de las principales rutas de transporte transalpino. Se trata de un túnel de 11.6 Km de longitud por el que transcurren casi 2 millones de vehículos cada año. Desde el año 2017, este túnel dispone de estaciones de carga para vehículos eléctricos o híbridos enchufables tanto en su boca francesa como en su boca italiana. Así mismo, parte de los vehículos de motor de combustión utilizados para el mantenimiento del túnel han sido sustituidos por vehículos eléctricos.

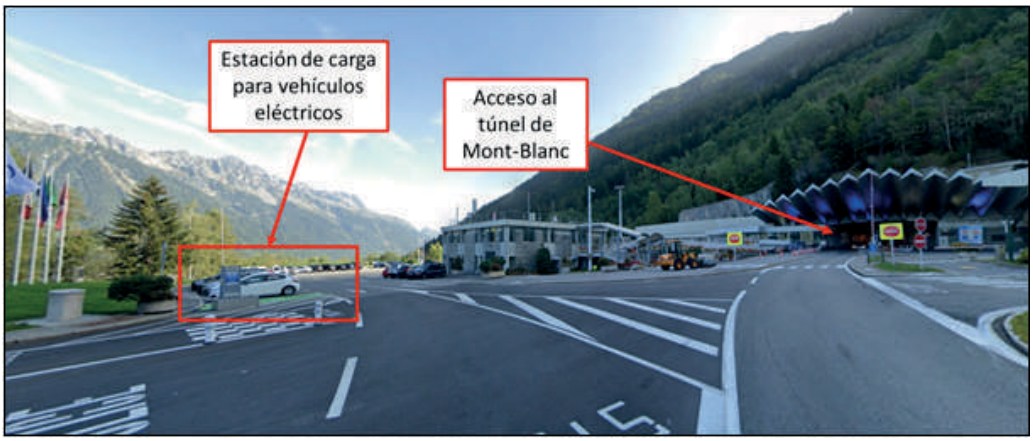


Figura 4. Estaciones de carga en el túnel de Montblanc

7.2. Eurotúnel

El Eurotúnel o Túnel del Canal de la Mancha es un túnel ferroviario submarino que une Francia con el Reino Unido. Los usuarios pueden embarcar su vehículo en un tren lanzadera o hacer uso del tren Eurostar como pasajeros. El Eurotúnel presenta una longitud de 50.5 Km, siendo el tercer túnel más largo del mundo y lo utilizan más de 10 millones de viajeros anualmente. Del mismo modo que sucedía en el túnel de Mont-Blanc, el Eurotúnel dispone de puntos de carga para vehículos eléctricos en los desembarques de ambas bocas del túnel.

7.3. Gran San Bernardo

El túnel de Gran San Bernardo une Italia con Suiza a través de los Alpes, formando parte de la ruta europea E27. Se trata de un túnel de 5.800 metros de longitud que es utilizado anualmente por 750.000 conductores. Cabe indicar que este túnel dispone en sus inmediaciones de una estación hidroeléctrica aprovechando un salto de agua próximo, que utiliza para generar parte de la electricidad que el propio túnel consume. Desde el año 2016 el túnel dispone de un puesto de carga de vehículos eléctricos en su lado suizo.

8. CONCLUSIONES

Las políticas actuales de la Unión Europea enfocadas a la descarbonización de sus actividades presentan el cambio hacia la movilidad eléctrica como uno de sus ejes principales.

Uno de los puntos más importantes para el desarrollo de este objetivo es la instalación masiva de puntos de recarga (que actualmente no superan los 11.500 puntos en toda España según la aplicación Electromaps.com) con especial hincapié en sus instalación en vías interurbanas, con objeto de equiparar las capacidades de los vehículos eléctricos a los de motor de combustión a la luz de la autonomía actual de este tipo de vehículos, así como al tiempo medio requerido para su recarga en la mayor parte de los cargadores actualmente disponibles.

En este sentido, con la motivación adicional de optimizar los esfuerzos en este proceso de cambio, se detecta que los túneles presentan un gran potencial para la instalación de este tipo de puntos de carga, ya que muchos de ellos se encuentran en zonas alejadas de núcleos urbanos y disponen ya de instalaciones eléctricas dimensionadas para su operación en emergencia, si bien durante la operación normal de los mismos sólo se requiere un bajo porcentaje de esa potencia. Así mismo, procesos de mejora de la eficiencia energética como la sustitución de las luminarias de vapor de sodio por luminarias LED, están aumentando la diferencia entre las capacidades de los sistemas de alimentación eléctrica y los consumos habituales de los túneles.

En relación a todo ello, se ha desarrollado un análisis del estado del arte de los puntos de recarga para vehículos eléctricos, observando los requerimientos concretos que presenta su implementación en las inmediaciones de un túnel de carretera.

En relación a todo ello se observa que la implementación de este tipo de cargadores es perfectamente factible desde el punto de vista técnico, operativo y comercial, si bien se observan varios puntos críticos a tener en cuenta:

- Los puntos de recarga deben situarse en las inmediaciones de la boca en la que se encuentre el Centro de Transformación, disponiendo al menos de un espacio de 200m2 para la instalación de estos cargadores.
- Son críticos los requerimientos normativos de trazado, en cuanto a carriles de entrada y salida a las instalaciones, si bien estos son mucho más laxos en el caso de que estas instalaciones se destinaran exclusivamente a carga de vehículos del servicio de explotación.
- Se debe disponer de sistemas de gestión dinámica de potencia (DLM) para la gestión de los cargadores, así como para asegurar la disponibilidad de potencia eléctrica en el túnel en todo momento, especialmente en casos de emergencia.
- Se debe disponer de fibra óptica para las estaciones de carga. La comunicación entre el SCADA del túnel y el sistema de control de los cargadores eléctricos se podría realzar a través de una API.
- En caso de que la instalación no esté atendida por personas, se ha de disponer de tecnología ALPR (Automatic License Plate Recognition) para el acceso de los usuarios, así como sistemas de pago automático.

Este tipo de aprovechamiento de potencia eléctrica, ya existe actualmente en túneles de gran envergadura como Montblanc, Eurotúnel o Gran San Bernardo, por lo que parece un enfoque muy interesante para su aplicación en túneles en España.

HYTUNNEL-CS PROJECT: SAFETY STRATEGIES FOR HYDROGEN VEHICLES IN TUNNELS AND UNDERGROUND INFRASTRUCTURE

Jesús Sancho
IDOM
Dmitriy Makarov
Ulster University
Sara Martinez
Foundation Hydrogen Aragon

This article outlines major results of the project "Pre-normative research for safety of hydrogen driven vehicles and transport through tunnels and similar confined spaces" ("HyTunnel-CS"), funded by Clean Hydrogen Partnership, with the support from several founding programmes of the European Union's. Its objective is to close knowledge gaps and to tackle safety challenges associated with hydrogen fuelled vehicles entering underground infrastructure.

The paper briefly introduces the hydrogen fuelled electrical vehicles' technology and safety challenges posed by the new technology. To overcome the challenges the project employed integrated approach treating hydrogen vehicle and underground traffic structure as a single system creating a wider range of safety solutions. The developed in the project safety strategy is presented and illustrated through examples of unignited and ignited accident scenario examples.

Results show how a proper safety design of fuel cell electrical vehicles allows for acceptable safety levels considering the current regulations, codes and standards applicable to underground structures. This makes vehicles' design of paramount importance for allowing the inherently safer use of hydrogen transport in existing tunnels and underground parking.

PROYECTO HYTUNNEL-CS: ESTRATEGIAS DE SEGURIDAD PARA VEHÍCULOS DE HIDRÓGENO EN TÚNELES E INFRAESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS

El presente artículo expone los principales resultados del proyecto "HyTunnel-CS" —financiado por Clean Hydrogen Partnership, que recibe, a su vez, fondos de varios programas de la Unión Europea. Su objetivo ha sido profundizar en el entendimiento y cuantificación de algunos aspectos de seguridad asociados a los vehículos impulsados por hidrógeno y proponer soluciones a los retos que el uso de estos vehículos puede conllevar en las infraestructuras subterráneas.

El documento presenta brevemente la tecnología de los vehículos eléctricos alimentados con hidrógeno y los retos de seguridad que plantea la nueva tecnología. Para afrontar estos retos, el proyecto ha empleado un enfoque integral que trata el vehículo de hidrógeno y la estructura de tráfico subterráneo como un único sistema, estudiando y proponiendo soluciones de seguridad de distinta índole. Este estudio se presenta e ilustra a través de diferentes escenarios de accidentes, tanto sin ignición y como con ignición de hidrógeno.

Los resultados muestran como un diseño de seguridad adecuado de los vehículos eléctricos de pila de combustible permite disponer de niveles de seguridad aceptables considerando lo establecido actualmente por los reglamentos, códigos y normas aplicables a infraestructuras subterráneas. Esto hace que el diseño de los vehículos sea de suma importancia para permitir el uso intrínsecamente seguro de vehículos de hidrógeno en los túneles y aparcamientos subterráneos existentes.

PROJET HYTUNNEL-CS : STRATÉGIES DE SÉCURITÉ POUR LES VÉHICULES À HYDROGÈNE DANS LES TUNNELS ET LES INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES

Cet article présente les principaux résultats du projet "HyTunnel-CS", financé par le Clean Hydrogen Partnership, qui reçoit à son tour des fonds de divers programmes de l'UE. Son objectif était d'approfondir la compréhension et la quantification de certains aspects de la sécurité associés aux véhicules à hydrogène et de proposer des solutions aux défis que l'utilisation de véhicules à hydrogène peut poser aux infrastructures souterraines.

Ce document présente brièvement la technologie des véhicules électriques à hydrogène et les défis de sécurité posés par cette nouvelle technologie. Pour relever ces défis, le projet a adopté une approche intégrée qui traite le véhicule à hydrogène et la structure de circulation souterraine comme un système complet, en étudiant et en proposant différentes solutions de sécurité. Cette étude est présentée et illustrée par différents scénarios d'accident, à la fois sans inflammation et avec inflammation de l'hydrogène.

Les résultats montrent comment une conception adéquate de la sécurité des véhicules électriques à pile à combustible permet d'atteindre des niveaux de sécurité acceptables compte tenu des réglementations, codes et normes actuels applicables aux structures souterraines. La conception des véhicules revêt donc une importance pour permettre l'utilisation intrinsèquement sûre des véhicules à hydrogène dans les tunnels et les parkings souterrains existants.

1 INTRODUCTION TO THE HYTUNNEL-CS PROJECT

The project "Pre-normative research for safety of hydrogen driven vehicles and transport through tunnels and similar confined spaces" (abbreviated "HyTunnel-CS") [1] was funded through public private Clean Hydrogen Partnership, which supports research and innovation activities in hydrogen technologies in Europe [2]. The project main ambition was to allow hydrogen fuel cell electric vehicles (FCEV) to enter underground traffic infrastructure. The project run from September 2019 to July 2022 with totally 13 partner organisations involved:

- Ulster University (UU), UK (project coordinator);
- Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany;
- Denmark Technical University (DTU), Denmark;
- Health and Safety Executive (HSE), UK;
- National Centre for Scientific Research Demokritos (NCSRD), Greece;
- University of South-Eastern Norway (USN), Norway;
- Aragon Hydrogen Foundation (FHa), Spain;
- International Fire Academy (IFA), Switzerland
- Sapienza University of Rome (URS), Italy;
- Koninklijk Nederlands Normalisatie-Instituut (NEN), Netherlands;
- Federal Public Service Interior (SPFI), Belgium;
- French Alternative Energies and Atomic Energy (CEA), France;
- PRO-SCIENCE GmbH (PS), Germany.

The project is intended to serve as a basis for the future development of regulations on the safety of hydrogen vehicles and hydrogen transport in tunnels and other confined spaces.

The project structure is presented in Figure 1 and included 6 main work packages (WP):

- WP1 The state-of-the-art in safety provisions for underground transportation systems and accident scenarios prioritisation;
- WP2 Effect of mitigation systems on hydrogen release and dispersion in confined spaces;
- WP3 Thermal and pressure effects of hydrogen jet fires and structure integrity;
- WP4 Explosion prevention and mitigation;
- WP5 First responders' intervention strategies and tactics for hydrogen accidents in underground transportation systems and risk assessment;
- WP6 Synthesis, outreach and dissemination;
- WP7 Management;
- WP8 Ethics requirements.

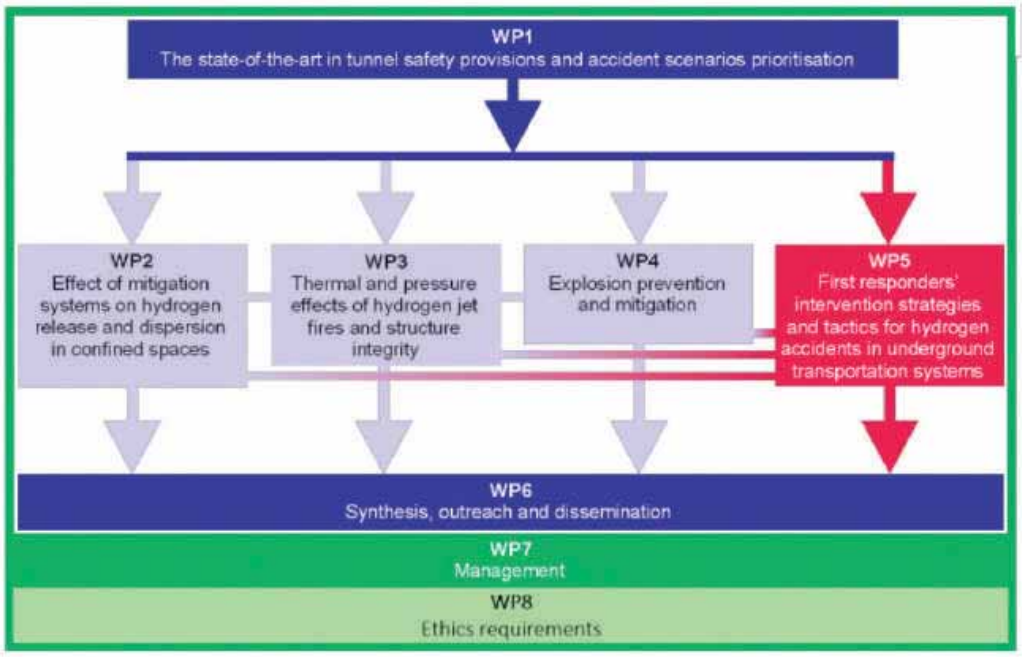


Figure 1.HyTunnel-CS project structure.

Critical literature review was conducted in WP1, where the partners identified relevant regulations, codes and standards (RCS) in the field, formulated credible incident scenarios and analysed safety measures and mitigation systems available in modern underground structures. Following the literature review the research work concentrated in work packages WP2, WP3, WP4 and WP5.

WP2 dealt with development of analytical, numerical and experimental studies on hydrogen releases incidents where ignition did not occur. The dispersion of the hydrogen following range of incident scenarios were studied varying gas release orifice and direction; effect of mitigation systems such as mechanical or natural ventilation; nature of underground infrastructure (tunnel, parking, etc.).

WP3 developed research on jet fires that occur when hydrogen is released from onboard storage system through a thermally activated pressure release device (TPRD) and ignition occurs. In particular the studies included:

- Assessment of pressure hazards from the pressure-peaking phenomenon in enclosed spaces (such as car-parks or garages), which is phenomenon of transient, high overpressure occurring when hydrogen is released in an enclosure with limited ventilation;
- Assessment of thermal hazards from hydrogen jet fires originating from TPRD;
- Interaction of hydrogen jet fires with mitigation systems, e.g., mechanical ventilation in underground parking;
- Interaction of hydrogen jet fires with tunnel concrete structures and road surface materials;

Subject of WP4 was prevention and mitigation of explosions. Those can originate from:

- Ruptures of high-pressure hydrogen tanks, followed by blast wave and fireball propagation;
- Combustion of hydrogen-air mixtures created as a results of hydrogen leaks or hydrogen releases; combustion may be in the form of deflagration or deflagration-to-detonation transition (DDT).

Experimental work was performed demonstrating interaction of blast waves with underground mitigation systems. WP4 also addressed development of modelling tools to predict deflagration hazards and potential for DDT transition. Particular attention was paid to further development and experimental validation of TPRD-less tank technology. The technology prevents high-pressure tank rupture by allowing hydrogen release even with failed TPRD, excluding blast wave and fireball hazards.

WP5 compiled and reviewed strategies, tactics and procedures for first responders' intervention in hydrogen incidents. The work package also carried out quantitative risk assessment (QRA) studies on risk of hydrogen vehicles in underground road tunnels, rail tunnels and underground car park.

The project produced a number of public deliverables available at the project website (https://hytunnel.net/?page_id=71). The major project outcomes are summarised in three public documents:

- Deliverable D6.9 "Recommendations for inherently safer use of hydrogen vehicles in underground traffic systems" [3].
- Deliverable D6.10 "Recommendations for RCS" [4].
- Deliverable D5.4 "Harmonised recommendations on response to hydrogen accidents" [5].

2 HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER

Hydrogen is the lightest element in the periodic table and the most abundant in the universe. It is found on earth in many compounds, the main one being water (H2O), due to its abundance and availability.

Hydrogen as a gas (H2) is 14 times lighter than air. It is non-toxic, non-polluting and the substance that stores the most energy by weight. It cannot be considered as a source of energy since obtaining it from the compounds in which it is present requires more energy than can be obtained later. However, it allows energy to be stored and transported very efficiently making it one of the "energy vectors" in developing carbon-free economy. It is expected that wider hydrogen use in transport applications will also imply hydrogen generation using electrolysers (devices that separate water molecules into hydrogen and oxygen gas) and end-use of hydrogen in fuel cells (vice versa - devices that directly transform chemical energy of hydrogen gas into electrical energy). Both electrolysers and fuel cells allow efficiencies typically between 60-80 %, which is larger than the efficiency of internal combustion engines using hydrocarbon fuels.

Safety concerns about use of hydrogen applications in public domain are typically associated with high chemical reactivity of hydrogen —its extremely wide flammability limits between 4% and 75% vol., low minimum ignition energy 17 mJ (order of magnitude less than fuels like propane or methane), high maximum burning velocity - about 2.45 m/s (about order of magnitude higher than that for conventional hydrocarbon fuels) [6]; hydrogen-air mixture combustion being prone to turbulisation, burning velocity acceleration and DDT.

3 HYDROGEN-POWERED VEHICLES

Fuel cell electric vehicles (FCEV) fuelled by compressed gaseous hydrogen have been available on the international market for more than 6 years, and two of these models are even available in Spain (Hyundai Nexo and Toyota Mirai), although with anecdotal sale figures. The vehicles using this technology are also known as "fuel cell hydrogen vehicle", "hydrogen fuel cell vehicle", "hydrogen powered vehicle", etc.

Figure 2 below illustrates layout of key components and major systems of a typical FCEV, which are as follows [7]:

- Hydrogen fuelling system, storage tank(s) and hydrogen delivery system;
- Fuel cell system;
- Electric propulsion and power management system including batteries.

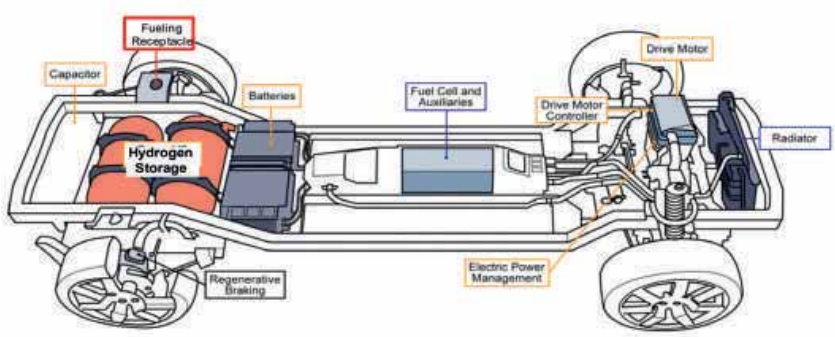


Figure 2. Layout of key components and major systems of a typical FCEV [7].

The combination of oxygen from the air and hydrogen takes place in the fuel cell, which generates electrical energy and water in the form of steam. The electricity is stored in a battery, which in turn supplies power to the engine.

Current technology allows a range of around 700 km and refuelling would take place at filling stations similar to current ones (commonly referred to as hydrogen refuelling stations, HRS), with refuelling times of between 3 and 5 minutes.

4 HYDROGEN TANKS

From a safety point of view, the most significant risk in use of FCEVs is associated with the onboard high-pressure hydrogen storage tanks. Modern hydrogen storage tanks often have operating pressure 700 bar and hydrogen capacity of a light duty vehicle is about 5-7 kg. To reduce tank mass it is typically manufactured using carbon-fibre reinforced plastic with metal liner (Type 3 tanks) or plastic liner (Type 4 tanks) to prevent hydrogen permeation. Major risks for passengers, public and first responders presented by a sudden tank rupture (e.g., as a result of FCEV fire) followed by blast wave and a fireball. The risks may be significantly higher if the incident develops in confined areas such as a road tunnel, underground car park or maintenance workshop. In order to prevent tank rupture, the modern RCSs (e.g., Global Technical Regulation No. 13 [9] or overriding it Regulation No. 134 [10]) require mandatory installation of non-reclosing thermally activated pressure relief device (TPRD), which, in the event of fire, would open releasing the gas and preventing the tank from rupturing. Figure 3 shows the schematic view of a typical compressed hydrogen storage system with installed TPRD.

The usual size of the TPRD outlet diameter is of the order 2.0 mm for light vehicles, rising to about 6 mm for heavy vehicles and trains. TPRD is the only safety barrier enforced at this moment by RCS [9, 10]. However, its activation in a fire can create a powerful hydrogen reacting jet, leading to significant thermal hazards to public and fire and rescue team. Typical fire resistance rating of Type 3 and Type 4 hydrogen storage tanks is about 6-9 minutes, meaning that in case of TPRD failure to activate the hydrogen tank will rupture generating a powerful blast wave and fireball, which will also present pressure and thermal hazards.

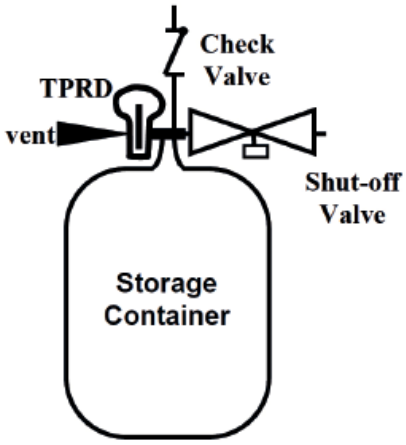


Figure 3. Typical compressed hydrogen storage system with a TPRD device [9].

5 HYTUNNEL-CS PROJECT CONCLUSIONS AND SAFETY STRATEGIES FOR FCEV

Research performed in the project lead to conclusion that the most of currently available RCS dealing with safety of traffic in tunnels and underground infrastructure can be fulfilled by following safety strategy in FCEV design:

- Design release system to exclude formation of flammable cloud that can deflagrate and transit to detonation (DDT) in an underground structure. Hazard distances for hydrogen releases may be determined using similarity law for hydrogen concentration decay along the jet axis. Hazard distances for jet fires may be determined using the dimensionless flame correlation. Both tools are applicable at atmospheric and cryogenic temperatures;
- Design TPRD to exclude formation of flammable cloud and hot products reaching temperature $T>300^0C$ under the ceiling (as per current underground park regulation) to allow underground FCEV parking;
- Define TPRD diameter to exclude the pressure peaking phenomenon to park FCEV in garages and to place tanks in storage enclosures onboard of trains, ships, planes;
- Design tank-TPRD system to exclude tank rupture in fire of any intensity, including specific heat release rate (HRR) in excess of $HRR/A=1\ MW/m^2$ characteristic for spill fires of hydrocarbon fuels, and different TPRD response time.

Engineering tools used for the safety design are freely available in online e-Laboratory of Hydrogen Safety [11].

The following sections detail the above safety strategies based on analytical, numerical and experimental research performed within HyTunnel-CS project and presented in the deliverable D6.9 "Recommendations for inherently safer use of hydrogen vehicles in underground traffic systems" [3].

5.1 Safety strategy for design of TPRD diameter and direction of discharge

In the event of hydrogen release through TPRD, the areas where the highest hydrogen concentrations are expected to occur are the vicinity of the vehicle and the upper part of the tunnel section. The HyTunnel-CS project has studied the variation of these high concentration zones for different TPRD diameters and release directions, different tunnel slopes and different intensity of mechanical ventilation.

The diameter of the TPRD and its direction of discharge should be designed reducing risk by minimising:

- Size of flammable cloud close to the vehicle;
- Size of flammable cloud in the upper area of the tunnel;
- Flame length (in case of fire);

Experimental campaign, among others, was conducted by CEA conducted a series of unignited release experiments in the Morier tunnel (with a height of 5.2 metres) using 50 and 78-litre helium tanks at pressures 200, 600 and 700 bar. The tests were conducted using helium to exclude the risk of unintentional fire or deflagration. Parametric simulation studies were performed by Ulster University (UK), National Centre for Scientific Research "Demokritos" (Greece) and Karlsruhe Institute of Technology (Germany) for different release directions and orifice diameters.

Experiments and simulations showed that directing the discharge downwards at an inclination of 45° was sufficient to avoid the formation of both flammable clouds if the diameter of the TPRD is sufficiently small. This is especially relevant for TPRD discharges directed towards the lower area of the vehicle, which, although generally safer for users/pedestrians in the event of a jet fire, carry a higher risk of generating a flammable cloud under the vehicle. In particular, it was found that diameters larger than 2.0 mm increase the chances of clouds with a concentration of more than 4% vol. forming in the upper part of the tunnel (a situation that worsens when the project considered underground car parks). In contrast, a diameter of 1.0 mm would prevent the formation of these high concentration clouds both under the vehicle and in the upper part of the tunnel. The flammable zone would appear exclusively in the released jet itself.

Figure 4 below illustrates the difference in a hydrogen-air flammable cloud size for hydrogen release directed 45^0 downward between TPRD diameters 0.5 mm and 2.0 mm for a car in underground parking (car park height 3.0 m and distance to the car park wall is 12.0 m).

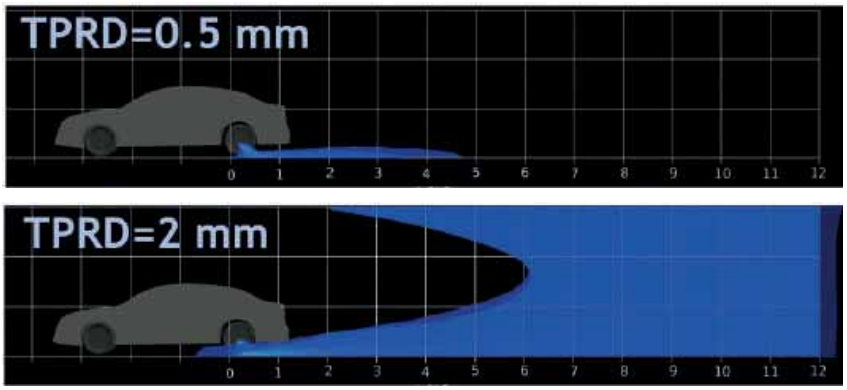


Figure 4. Maximum size and shape of flammable hydrogen-air cloud: TPRD diameter 0.5 mm (top) and TPRD diameter 2.0 mm (bottom). Storage pressure 700 bar, storage volume 62.4 l, release direction 45^0 downward, car park height is 3.0 m.

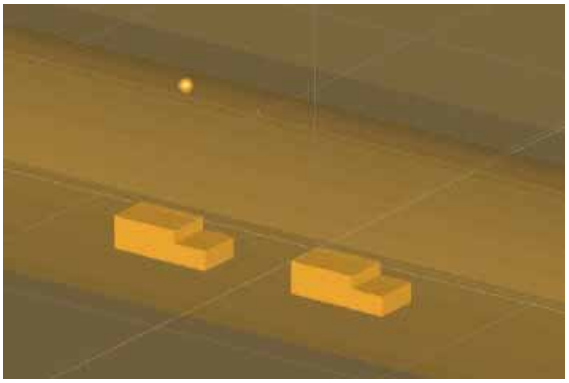
5.2 Tunnel slope and forced ventilation

The effect of tunnel slope and mechanical ventilation velocity and direction on the size of flammable hydrogen-air cloud formed by hydrogen release was studied. It is worth mentioning that hydrogen buoyancy has many similarities with smoke buoyancy in case of fire, sharing different physical effects such as the chimney effect in tunnels with a slope or its destratification with high velocity air flows. The main difference is that the danger of hydrogen suddenly disappears if its concentration drops below low flammability limit 4% vol. hydrogen.

CFD simulations demonstrated that, in general, the slope has a small influence on the hydrogen concentration around the vehicle, almost negligible in the first moments of the incident. In the long term, however, the slope reduces the dilution time of the hydrogen in the tunnel by generating a natural flow, but this would be a minor effect in the first few minutes, which are generally the most relevant for safety. Figure 6 (a) shows calculation domain for CFD simulation of 2 vehicles in a tunnel performed by NCSRD. Figure 6 (b) demonstrates that the simulated hydrogen volume fraction at the monitored location does not have appreciable difference between the slopes 0%, 2.5% and 5.0%, meaning the tunnel slope does not play significant role in hydrogen distribution.

It should be noted that occasionally the flammable "pockets" of hydrogen-air mixture still may dynamically develop during (and after the end of) the tank discharge duration. For example, in some cases, it has been observed that the upper area has low concentrations during the discharge, but when the discharge stops, hydrogen trapped at mid-height rises to form a dangerous cloud at the top.

a)



b)

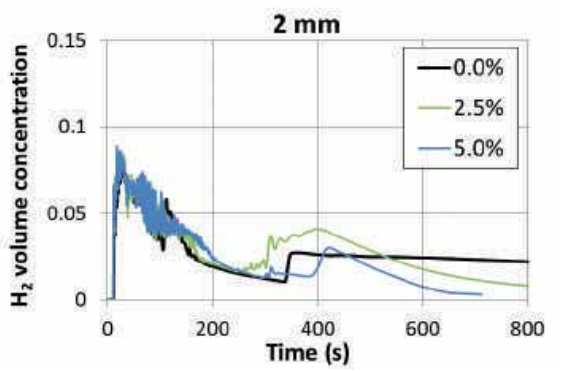


Figure 5.(a) CFD model of a tunnel with 2 vehicles and the monitored location; (b) dynamics of hydrogen volume fraction for 0%, 2.5% and 5% tunnel slope, TPRD diameter 2.0 mm.

The experimental campaign and CFD modelling demonstrated that use of mechanical ventilation, either longitudinal or transverse, reduces length of the flammable hydrogen-air composition (area where hydrogen fraction is between 4% and 75% vol.). This reduction ranges from 30% to 50% in the cases studied. The simulations also indicate that, in the case of longitudinal ventilation, the turbulence generated by the fans themselves increases the dispersion of hydrogen in the air.

Figure 7 shows experimentally measured length of the flammable cloud for 5 g/s hydrogen release from a 1.0 mm diameter orifice in quiescent atmosphere in comparison with co- and counter-flow ventilation conditions. Both co- and counterflow ventilation decreased the length of flammable cloud, being the later more effective at equivalent speeds.

In any case, in relation to ventilation, it is recommended to continue this study with future experiments that allow a more precise quantification.

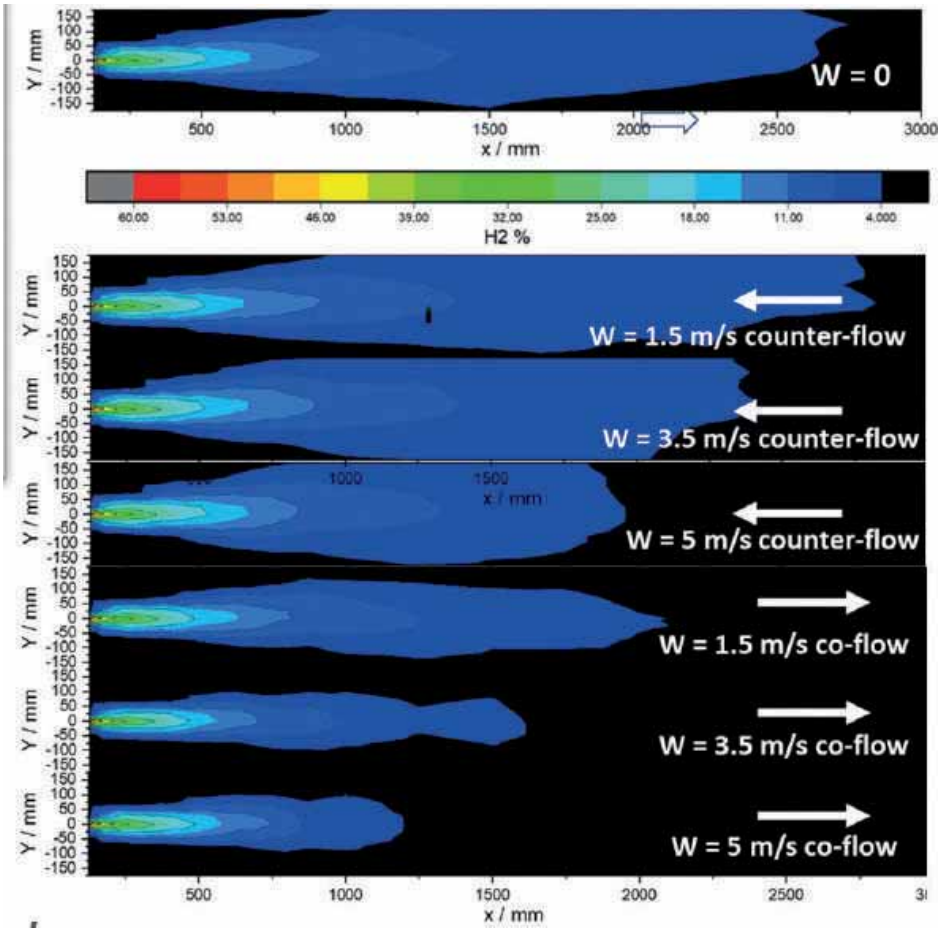


Figure 6. Effect of different co- and counter-flow ventilation velocity on the size of flammable hydrogen-air cloud for release rate 5 g/s and nozzle diameter 1.0 mm.

5.3 Contribution of hydrogen to car fire heat release rate

Contribution of hydrogen release to a vehicle fire is highly dependent on the diameter of TPRD. Figure 8 below shows comparison of HRR from a typical light-duty vehicle [12] with HRR of hydrogen jet fire for storage pressure 700 bar and TPRD diameters 2.0, 1.0 and 0.5 mm. For TPRD diameter 2.0 mm the HRR of hydrogen jet fire reaches for a short time 13 MW, which is significantly larger than the 4 MW fire HRR recommended for design of car park fire mitigation system. For 1.0 mm TPRD orifice the hydrogen fire HRR shortly reaches value 4.6 MW (+13% compared to the reference car fire), but after that it does not have significant contribution to the vehicle fire. For TPRD orifice 0.5 mm the hydrogen fire HRR, though reaching momentarily maximum value 4.1 MW (+2.5% compared to the reference car fire), has practically negligible contribution to the vehicle fire during the most of fire duration.

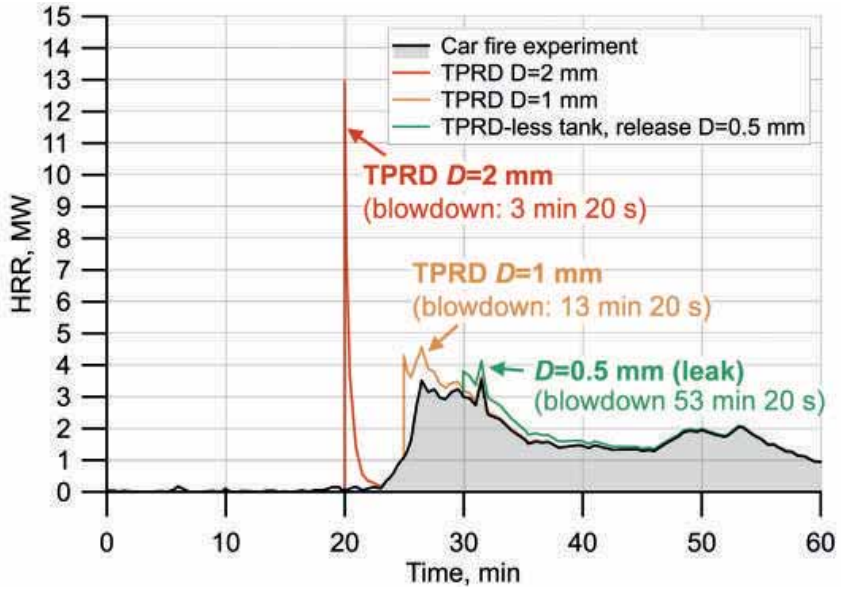


Figure 7. Contribution of hydrogen release to vehicle fire: heat release rate for TPRD diameters 0.5, 1.0 and 2.0 mm. Storage pressure 700 bar, storage volume 62.4 l.

5.4 Fire mitigation using fixed extinguishing systems.

The numerical studies and actual tests conducted at HyTunnel-CS show that fixed extinguishing systems (including traditional sprinklers and water mist) are not able to completely extinguish or control these fires. However, they do have some positive consequences:

- Extinguishing systems allow the temperature of the area to be reduced, with an overall positive effect in the vicinity of the fire;
- The reduction of ambient temperature and available oxygen, in turn, reduces the jet flame length (by 34-64%) and jet flame temperature (by 140-240°C, from 1220°C to 980-1080°C);

The temperature reduction effect is more pronounced for the smaller droplet diameter and finer water mist.

The results obtained within HyTunnel-CS project are in line with field tests carried out previously by French Fire Brigade during the HyResponse project [13] led by ENSOSP: the test demonstrated that it is almost impossible to extinguish a hydrogen jet fire with water, even for high water flow rate being injected on the hydrogen nozzle.

5.5 Hydrogen jet fire hazards

Flame length

Experimental studies conducted in a real tunnel by CEA confirmed the safety strategy adopted in the project – the smaller release diameter, the lesser thermal fire hazards. Thus, a release from hydrogen storage at 700 bar vertically upward through TPRD diameter 4.0 mm resulted in a jet fire hitting the tunnel ceiling at about 5.0 m height, while discharge from the same storage through TPRD diameter 2.0 mm resulted in a jet fire barely reaching the tunnel ceiling. In the case of discharge downward at an angle of 45° (the same TPRD diameter 2.0 mm and storage pressure 700 bar) a horizontal flame at ground level of 3.5 m in length was observed. Further decrease of TPRD discharge diameter will decrease flame length and jet fire hazards further.

Radiative flux

The generated radiative fluxes are not a danger to people more than 2 m from the source, considering a storage pressure up to 700 bar and TPRD diameters up to 2.0 mm, i.e. the radiative heat fluxes are less than 2 kW/m^2.

Temperature

The temperature can reach 1000°C in the area of the flame tip. Parametric CFD simulation performed at Ulster University demonstrated that for the considered car parking with minimal height 2.1 – 3.0 m to comply with the requirement of mechanical ventilation standard BS 7345 [14] (i.e. avoiding combustion products temperature above 300^{0}C to reach intake of ventilation system) the TPRD diameter should be below 1.0 mm, please see Figure 8 below.

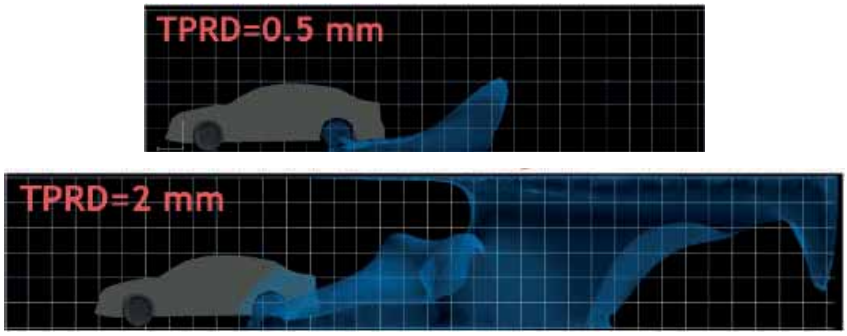


Figure 8. Maximum size and shape of combustion products cloud with temperature T>300^{0}C in an underground car park: hydrogen release from TPRD diameter 0.5 mm (top) and from TPRD diameter 2.0 mm (bottom). Storage pressure 700 bar, storage volume 62.4 l, release direction 45^0 downward, car park height is 3.0 m.

5.6 Effects of a jet fire on concrete structures

Experimental studies and coupled CFD-FEM simulations were carried out on the effect of a jet fire on different types of concrete, looking for the most unfavourable scenarios.

In general, the results showed that the relatively short duration of the flames means that no significant structural damage occurs. However, the results of the simulations indicated that the lower part of the slab reaches high temperatures suggesting a spalling effect or explosive detachment of the outermost concrete (up to a depth of 1.5 cm). Actual experiments at DTU confirmed this risk and, in turn, demonstrated that it may be mitigated by the introduction of polypropylene fibres in concrete.

It was also underlined that the structural strength depends mainly on the effect of the steel reinforcement, which is recommended to be placed at a minimum depth of 5 cm in order to limit the heating of the reinforcement in case of spalling.

Results of experimental programme at HSE are anticipated to be published in the project deliverable D4.4 [15].

5.7 Explosion prevention and mitigation

In tunnels pressure and blast waves originating from hydrogen explosions and high-pressure tank ruptures propagate in one-dimensional way, which makes pressure decay very slow and drastically increases hazard distance compared to pressure and blast waves propagation from the same sources in open atmosphere. As a result, the safety strategy recommends to prevent hydrogen explosions and tank ruptures at all.

Explosions due to combustion of flammable gases are of two types:

(1) deflagration (subsonic flame propagation velocity);

(2) detonation (supersonic flame propagation velocity).

Both can occur in the event of an incident with a hydrogen vehicle: the first one is associated with the combustion of areas with hydrogen concentrations above 4% and the second in the event of a deflagration-to-detonation transition (DDT) or direct initiation of detonation (typically associated with a powerful ignition source). The detonability limits for hydrogen are narrower than flammability limits and the recommended conservative range is between 11%-70% vol. [6].

Third type of "physical" explosion may be associated with high-pressure hydrogen tank rupture (e.g. in a fire). High pressure tank contains significant amount of mechanical compression energy, which, being released on tank rupture, generates powerful blast wave amplified by hydrogen combustion behind the blast wave.

5.7.1 Deflagration due to delayed ignition of a hydrogen jet

The delayed ignition of a highly turbulent under-expanded hydrogen jet from a high-pressure vessel causes a deflagration which in turn generates a shock wave capable of causing significant damage to both people and property in the vicinity.

Analysis performed within HyTunnel-CS project demonstrated that a discharge from a 2.0 mm diameter TPRD represents a potential danger to anyone within 10.5 m. However, by reducing the TPRD diameter to 0.5mm, this distance is reduced to 2.6 m. This is a safety distance comparable to the size of the vehicle itself.

5.7.2 Deflagration of a stratified hydrogen cloud

Hydrogen distribution and its subsequent deflagration strongly depends on release and ventilation scenario. CFD simulations of deflagration were performed within HyTunnel-CS project for hydrogen release from TPRD diameter 2.0 mm from 700 bar storage with 125 l volume in a tunnel with a cross-section of W × H=9.6 m × 6.6 m, with and without longitudinal ventilation 3 m/s by KIT (Germany). Simulations demonstrated that hydrogen concentration in vicinity of TPRD orifice were not affected by ventilation. As a result, peak overpressure values for deflagration ignited 5.2 s after initiation of release reached values just above 1 bar for both scenarios – with and without ventilation. Hydrogen concentrations further from the nozzle, where velocities are smaller, tended to be lower in case of longitudinal ventilation. Thus, peak deflagration overpressure under the ceiling for deflagration scenarios without ventilation was about 4.5 kPa, while deflagration in scenario with ventilation – about 3.5 kPa (relative change -22%).

Similarly, the use of water mist also has a reducing effect on the pressure and temperature generated by these deflagrations.

5.7.3 Blast wave and fireball after hydrogen tank rupture in a fire

The risk of storage tank rupture in a fire stems mainly from the possibility of failure of the TPRD device, which, although unlikely, would in principle not be ruled out. Tank rupture is the worst case scenario for hydrogen vehicles even in an open environment. Hazards of tank rupture in a tunnel are expected to be larger due to the mentioned above one-dimensional character of the pressure wave propagation and slower blast wave decay.

In the event of a rupture of one of the tanks of a light duty vehicle the pressures generated in the vehicle vicinity would reach values in excess of 100 kPa. Any mitigation measures are insufficient for this type of explosion, so the main objective should be aimed at its prevention.

Figure 9 shows comparison of universal non-dimensional correlation (best fit and conservative fit) developed by Ulster University (UK) using pre-test simulations for the blast wave overpressure in a tunnel following high-pressure tank rupture [16] and real tunnel experimental results obtained by CEA. The best fit correlation gives accurate from engineering perspective representation of tank rupture overpressure along the tunnel and may be used as an engineering tool for safety design in tunnels.

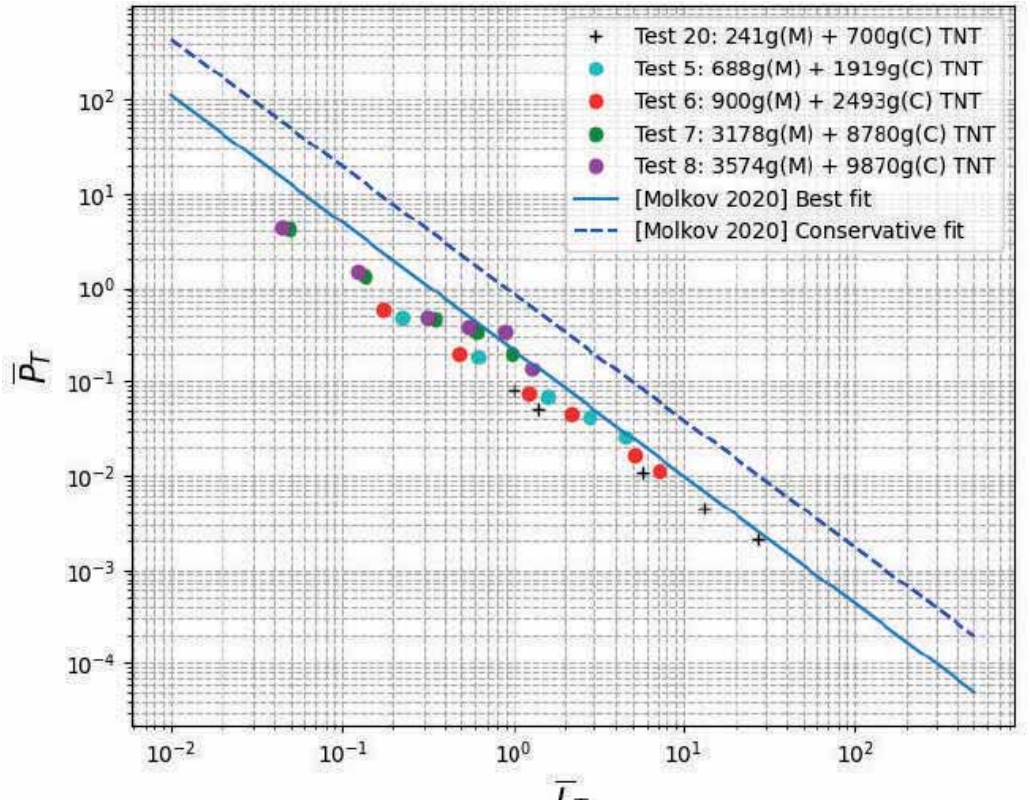


Figure 9. Comparison of universal correlation for blast wave decay after a hydrogen tank rupture in a tunnel [16] against real tunnel tank rupture experiments by CEA.

5.8 Safety strategy for design of tank-TPRD system

The safety strategy adopted within HyTunnel-CS project relies on decrease of TPRD diameter to minimise hydrogen release and combustion hazards, which leads to longer tank blowdown duration and longer exposure of pressure-loaded tank to a fire.

One of the techniques, which may be adopted to guarantee longer tank survival times in a fire, is a design strategy for tank-TPRD system [17]. The strategy considers performance of Type 4 tank and TPRD together to decrease TPRD orifice diameter and, at the same time, to exclude tank rupture.

Figure 10 gives example of such tank-TPRD system performance for a tank with volume 244 l in a fire with three different TPRD diameters – 0.5, 0.75 and 1.0 mm. The considered fire has characteristic for gasoline specific HRR 1.0 MW/m2. The figure demonstrates that for TPRD activation time 180 s the tank wall degradation is counteracted by decreasing load-bearing thickness in a such way that even TPRD diameters 0.75 mm, resulting in blowdown time 1349 s (nearly 22.5 minutes), does not lead to the tank rupture. The strategy ensures that, with timely activation of TPRD, the tank liner will melt, and hydrogen will leave through the composite wall (transparent to hydrogen in absence of the liner) before the tank wall degrades completely and the tank bursts.

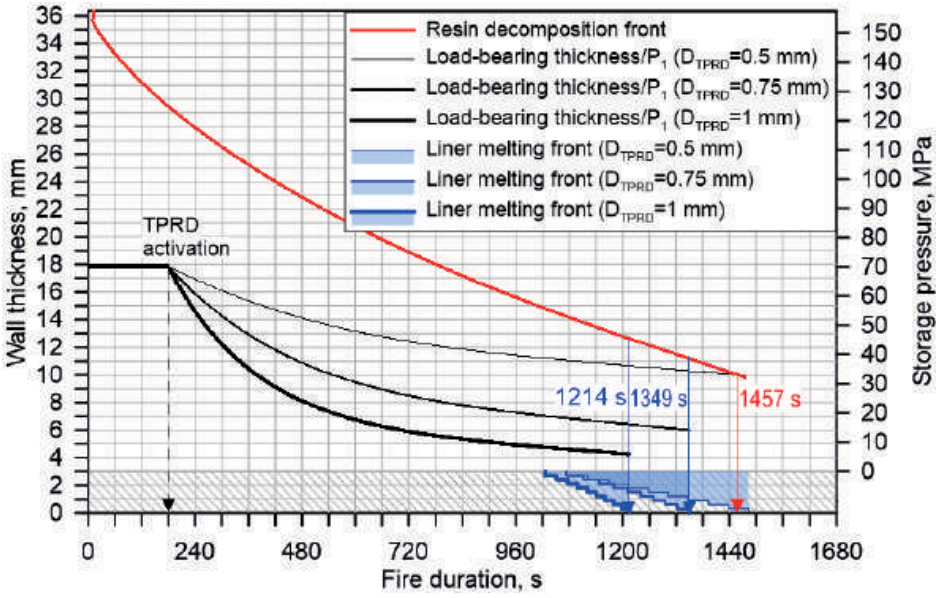


Figure 10. Tank-TPRD system performance demonstration: dynamics of tank wall degradation (red curve) and load-bearing tank wall thickness (black curves) for TPRD diameters 1 mm, 0.75 mm and 0.5 mm.

5.9 Leak-no-burst (LNB), technology

The leak-no-burst (or TPRD-less tank) technology is another way to avoid the risk of tank rupture caused by TPRD failure to activate. The technology is the background intellectual property of Ulster University [18] continued to be tested and validated within the project.

Figure 11 presents LNB technology in comparison with Type 4 tank of traditional design. LNB technology essence is in combination of different composite tank wall materials in a way that allows liner melting and safe tank blowdown before reaching loss of tank wall load bearing ability in a fire. Typically, one of the materials plays role of a thermal protection layer (TPL) yet sharing load bearing ability. The technology does not require TPRD for tank blowdown at all, though applicable to Type 4 tanks only. Additional benefit of the technology is that hydrogen is not released in form of a jet, but rather "strained" through a large portion of the tank wall at low velocity resulting in no visible increase of fire intensity. Though the technology is still being tested, so far, its performance is in line with design expectations.

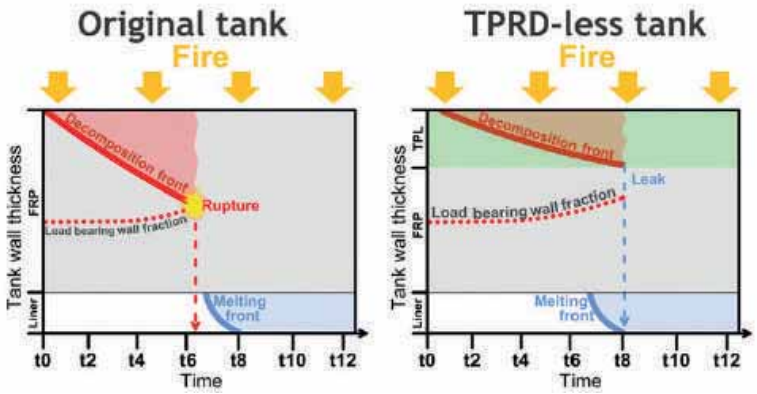


Figure 11. Dynamics of tank wall decomposition and load-bearing wall thickness: traditional Type 4 tank design (left); TPRD-less Type 4 tank technology with additional thermal protection layer (TPL) (right).

6 INTERVENTION STRATEGIES FOR EMERGENCY SERVICES

Led on this point by the International Fire Academy (IFA) in Switzerland, HyTunnel-CS has identified several aspects relevant to emergency services in the event of an incident involving a hydrogen vehicle and presented below.

6.1 Vehicle Identification Number (VIN)

One of the first problems faced by the emergency services when dealing with an incident in a tunnel is the identification that a hydrogen vehicle is involved in the incident. While these vehicles are often clearly marked as such, it cannot be guaranteed that these markings will be distinguishable in all circumstances. From an intervention planning point of view, it is optimal to know whether hydrogen vehicles are present inside the tunnel before entering it.

A unique identification code per vehicle that can be transmitted to the tunnel control systems could solve this problem. Such a system should be globally used and standardised, and tunnels should be equipped with corresponding information capture devices. However, the necessary technology exists today (Vehicle Identification Number, VIN) and would facilitate the work of the emergency services in any scenario, be it with hydrogen vehicles or vehicles powered by any other technology.

6.2 Let the vehicle burn tactic

In a hydrogen vehicle fire, two different types of fires could be distinguished: that of the vehicle materials (excluding tanks) and the combustion of the hydrogen itself. However, in the case of hydrogen, letting the hydrogen burn out may be the best option because (a) extinguishing is not easy, and (b) hydrogen accumulation in a confined space may lead to formation of a flammable hydrogen-air mixture and its explosion.

Faced with this problem, the dominant vision of the project was to extinguish the fire in the vehicle materials and protect the surroundings, but without attempting to extinguish the hydrogen fire itself. Reducing the temperature around the tanks is always favourable to avoid tank rupture.

6.3 Forced ventilation

Venting the smoke in the direction opposite to the direction of evacuation and from which the fire attack develops is standard procedure in tunnels. In the case of hydrogen incidents, there is the added condition of not activating nearby fans in “suction” action (to prevent hydrogen-enriched gas passing through fan electric components) as this could lead to ignition of flammable hydrogen-air mixture “pockets”.

CONCLUSIONS

HyTunnel-CS project (https://hytunnel.net) aimed at conducting pre-normative research towards closing knowledge gaps and technological bottlenecks in the provision of safety and acceptable level of risk in the use of hydrogen fuel cell vehicles and hydrogen delivery transport in general in underground transportation systems.

To allow hydrogen fuel cell electrical vehicles enter underground traffic infrastructure the project exercised single system approach considering the hydrogen vehicle

and underground structure as an integrated system. It was demonstrated that the proper design of hydrogen vehicles can eliminate hazards or bring them to the acceptable level, so that requirements of the currently

existing regulations, codes and standards may be satisfied without retrofitting the entire safety system in the considered infrastructure.

It was demonstrated that decrease of opening diameter of the thermally activated pressure relieve device allows to tackle the most of hazards associated with use of hydrogen – hydrogen explosion blast waves, projectiles, fireballs, jet fires, flammable mixture formation, etc. In the same time, smaller release diameter can lead to longer exposure of pressure-loaded hydrogen tanks to fire conditions. That could be counteracted using described in the paper tank-TPRD system design approach and leak-no-burst (TPRD-less) tank technology.

Helpful for safety design engineering tools and correlations, both pre-existing and developed within the project, are freely available at the e-Laboratory of Hydrogen Safety for interested stakeholders.

ACKNOWLEDGEMENTS

HyTunnel-CS project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (now Clean Hydrogen Partnership) under Grant Agreement No 826193. This Joint Undertaking receives support from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation program, Hydrogen Europe and Hydrogen Europe Research.

REFERENCES

1. https://hytunnel.net/ (accessed 11 June 2022)
2. https://www.clean-hydrogen.europa.eu/index_en (accessed 11 June 2022)
3. HyTunnel-CS. Deliverable D6.9, Recommendations for inherently safer use of hydrogen vehicles in underground traffic systems, 2022. https://hytunnel.net/?page_id=71. (to be available August 2022).
4. HyTunnel-CS. Deliverable D6.10, Recommendations for RCS, 2022. https://hytunnel.net/?page_id=71 (to be available August 2022).
5. HyTunnel-CS. Deliverable D5.4, Harmonised recommendations on response to hydrogen accidents, 2022. https://hytunnel.net/?page_id=71 (to be available August 2022).
6. Molkov V., Fundamentals of hydrogen safety engineering, Bookboon, 2012, https://bookboon.com/en/fundamentals-of-hydrogen-safety-engineering-i-ebook (accessed 11 June 2021).
7. Tretsiakova-McNally S. Lecture "Introduction to hydrogen and FC applications and hydrogen safety", HyResponse project, 2016. http://hyresponse.eu/files/Lectures/Introduction_to_FCH_applications_and_hydrogen_safety_notes.pdf (accessed 11 June 2022).
8. https://www.h2stations.org/stations-map (accessed 11 June 2022).
9. United Nations Economic Commission for Europe, 2013. Global Registry. Addendum 13: Global technical regulation No. 13. Global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicles. UNECE.
10. Regulation No 134 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE), 2019. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/GA/TXT/?uri=CELEX:42019X0795 (accessed 11 June 2022).
11. E-Laboratory of Hydrogen Safety, 2022. https://hyresponder.eu/e-platform/e-laboratory (accessed 11 June 2022).

12. Okamoto, K., Otake, T., Miyamoto, H., Honma, M., Watanabe, N., Burning behavior of minivan passenger cars, Fire Safety Journal, 62, 2013, pp.272–280.

13. https://hyresponse.eu (accessed 11 June 2022).

14. BS 7345-7:2013. The British Standards Institution, Components for smoke and heat control systems Part 7: Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks, 2013.

15. HyTunnel-CS. Deliverable D4.4, Results of the deferred experimental programme and associated activities. 2022. https://hytunnel.net/?page_id=71 (to be available August 2022).

16. Molkov, V., Dery, W., The blast wave decay correlation for hydrogen tank rupture in a tunnel fire, Int. J. Hydrogen Energy, 45, 2020, pp.31289-31302.

17. Molkov, V., Dadashzadeh, M., Kashkarov, S. and Makarov, D., Performance of hydrogen storage tank with TPRD in an engulfing fire, Int. J. Hydrogen Energy, V.46(73), pp. 36581-36597, 2021.

18. EP3583346A1 "Composite pressure vessel for hydrogen storage" patent publication, 25 December 2019 (https://data.epo.org/gpi/EP3583346A1, accessed 25 April 2021).

E-TUNEL, O SMART–TUNEL. UNA ADAPTACION A LAS NUEVAS REALIDADES

Manuel Alberto Abella Suárez
SEOPRIN SL

Los avances en la sociedad plantean cambios importantes en nuestra movilidad. Por una parte, la descarbonización, como medio de mitigar el cambio climático aboca a un abandono obligado de los combustibles fósiles en un plazo relativamente breve de tiempo.

Por otro lado, la implantación de los vehículos autónomos, e interconectados, es una realidad corto plazo de tiempo.

Ambos hechos, que los avances técnicos hacen que cada día se vean más cercanos, conllevan un cambio de los paradigmas sobre los que se asienta la seguridad de los túneles carreteros.

En este sentido sistemas que hasta ahora se vienen considerando críticos, pasarán a desempeñar un nuevo rol dentro de la seguridad tunelera.

E-TUNNEL, OR SMART-TUNNEL. AN ADAPTATION TO NEW REALITIES

Developments in society are bringing about major changes in our mobility. On the one hand, decarbonisation, as a means of mitigating climate change, leads to a forced shift away from fossil fuels in a relatively short period of time.

On the other hand, the implementation of autonomous and interconnected vehicles is a reality in the near future.

Both facts, which technical progress is bringing closer and closer every day, entail a change in the paradigms on which the safety of road tunnels is based.

In this sense, systems that have hitherto been considered critical will play a new role in tunnel safety.

E-TUNNEL, OU SMART-TUNNEL. UNE ADAPTATION AUX NOUVELLES RÉALITÉS

Les évolutions de la société entraînent des changements majeurs dans notre mobilité. D'une part, la décarbonisation, en tant que moyen d'atténuer le changement climatique, entraîne un abandon forcé des combustibles fossiles dans un laps de temps relativement court.

D'autre part, la mise en œuvre de véhicules autonomes et interconnectés est une réalité dans un avenir proche.

Ces deux faits, dont le progrès technique se rapproche chaque jour un peu plus, impliquent un changement des paradigmes sur lesquels repose la sécurité des tunnels routiers.

En ce sens, des systèmes qui étaient jusqu'à présent considérés comme critiques vont jouer un nouveau rôle dans la sécurité des tunnels.

SITUACIÓN DE PARTIDA.

Hasta la fecha, la operativa de los túneles carreteros estaba dirigida a la seguridad en el paso de los vehículos a su través, introduciendo elementos o sistemas tendentes a reforzarla.

El primer sistema adoptado ha sido el alumbrado.

A esta ha seguido de la ventilación, tanto en modo sanitario, que ha sido en esencia el origen de su necesidad, a medida que los túneles se hacían más largos, y con mayor número de vehículos a su través. Posteriormente se demostró su eficacia en el tratamiento del desarrollo de los incendios, y la gestión de los humos derivados de ellos.

De este modo, la ventilación pasó a ser un sistema imprescindible en túneles mayores de una determinada longitud, en función de su tipología –urbano, de montaña- y tráfico soportado. Su dimensionamiento por normativa, se debe adaptar a esas características particulares del tráfico, y además se debe prever las características de un futuro a la hora de su diseño.

Ambos sistemas, el alumbrado y la ventilación, llevan aparejado una necesidad de energía, de la cual se hacen grandes consumidores, lo que obliga a ser cuidadoso en su diseño, en aras de mantener una cierta eficiencia energética.

La mejora constante en sistemas electrónicos e informáticos unido a la complejidad de la operativa en los túneles, han derivado en el uso de sistemas ITS, que permitan asegurar el correcto funcionamiento, y la automatización del conjunto de la instalación. De este modo la señalización cada vez se hace más dinámica, y los sistemas de inter comunicación entre usuario y gestor –Centro de Control- son cada vez más usuales, a la par que las herramientas de las que se van dotando a los túneles para asegurar, en lo posible, una alerta temprana de las incidencias.

Los avances en materia de seguridad, han venido, en los últimos 30 años, de la mano de tres elementos fundamentales:

- La mayor capacidad de gestionar incidentes en tiempo real,
- La disponibilidad, cada vez mayor de sistemas y elementos capaces de dar una información a las Salas de Control.
- La formación, cada día más completa, de los operadores de sala, y de los equipos de mantenimiento.

La base de este desarrollo, está en la cada vez mayor capacidad tecnológica y de integración de cada sensor y aparato instalado dentro del túnel, y la interacción entre ellos.

Pese a todo, hay sistemas básicos que mantienen su esencia, con los lógicos aumentos de rendimiento y performances: El alumbrado y la ventilación.

La tecnología LED ha irrumpido de forma imparable en el alumbrado, especialmente en el de los túneles.

Sus ventajas, en cuanto al rendimiento cromático, bajo consumo, y facilidad de control, hacen que, actualmente, su implantación no sea discutible.

Las necesidades energéticas, imprescindibles para el funcionamiento de estos, y otros sistemas que conlleva la seguridad del túnel –todos son demandantes de energía en unos tiempos en los que se valora mucho-, también deben ser objeto de consideración.

Hace unos años, junto con mis compañeros Ignacio García Arango, y Fernando Hacar, propusimos, en el simposio de Zaragoza en 2015, el uso de placas fotovoltaicas como elemento de generación, tema que está ahora de actualidad.

En resumen, lo que se proponía, consistía en rebajar la luminancia de entrada al túnel, mediante una estructura de lamas de placas fotovoltaicas, que además, podían atender las necesidades energéticas del alumbrado, al menos durante las horas de mayor coste energético: las centrales del día, que coincidían con las de mayor capacidad de generación solar.

Actualmente, para el alumbrado, las potencias eléctricas necesarias, están en el orden de la mitad, aproximadamente de las exigidas en el caso de utilizar VSAP. La ventilación, por el contrario exige mucha más potencia, y dimensionar una instalación de abastecimiento como la propuesta es más complejo, y requiere un estudio particularizado para cada túnel, amén de establecer un sistema de almacenamiento de energía.

La ventilación es, además, el otro pilar de la seguridad, en cualquiera de las distintas modalidades de implantación en los túneles, en función de las características singulares de cada uno de ellos.

Las realidades cambiantes del tráfico, hace que deba adaptarse a las nuevas tipologías de los sistemas de propulsión. Esto obliga a cambios importantes en la concepción e implantación de los sistemas de ventilación.

¿Cuáles van a ser los cambios más significativos en cuanto a la ventilación?

La Comunidad Europea, plantea, si avatares futuros no lo remedian, la prohibición de vender vehículos térmicos nuevos en el 2.034.

Aunque aún queden vehículos con motor térmico en funcionamiento en ese año, y alguno posterior, la tendencia será que el parque se moverá con electricidad o hidrógeno. Esta tendencia se supone que se verá favorecida por precios muy altos de los combustibles fósiles, de forma que vía bolsillo, se nos convencerá de lo ineludible del cambio. Se supone que los avances tecnológicos abaratarán los precios de los vehículos, y los problemas de autonomía y recarga de los vehículos estarán, igualmente, resueltos.

Las emisiones de gases –CO, CO2 NOx, y hollines- estarán, por tanto, prácticamente eliminadas, o muy dismimuidas.

Se debe repensar, entonces, el modelo de ventilación de confort, del mismo modo que actualizar el concepto de mercancía peligrosa, las cargas de fuego y potencias de incendio.

En este sentido, ya se está empezando a pensar en las baterías que se transporten como una mercancía peligrosa. Se deberá pensar, igualmente, en que categoría entrarían los vehículos pesados movidos por baterías, toda vez que, para cumplir con la potencia y autonomía necesarias, sus baterías deberán ser grandes.

Cabe reflexionar, por tanto, sobre la necesidad de una ventilación en un entorno en el que ya no se generan contaminantes, o al menos su concentración no debe suponer valores mucho mayores que a cielo abierto. Esta reflexión podría llevar, a priori, a la eliminación de la ventilación en túneles más cortos, o con circunstan-

cias específicas, como podrían ser fuertes pendientes que otorguen al túnel de un tiro natural fuerte.

No parece, en nuestra opinión, que sea esta una buena medida. A lo largo de todos estos años, se ha ido demostrando la importancia de la ventilación en las actuaciones en caso de incendio.

Pero los incendios de vehículos movidos por baterías tienen unas características muy diferentes de los movidos por motores térmicos.

Si se trata de vehículos movidos por hidrógeno, los riesgos inherentes a ese gas, también son manifiestos.

Si se compara la carga térmica de vehículos eléctricos y de combustión, o incluso de hidrógeno, se encuentran elementos comunes: plásticos –en mayor medida en los eléctricos- telas, en igual cantidad en ambos, aceites –mayor en los térmicos- combustible en los térmicos, y elementos "novedosos", como litio y otros metales presentes en las baterías de los eléctricos.

Como es natural, el procedimiento de actuación con la ventilación en caso de incendio, o incluso en caso de incidencia, también se debe repensar.

Ya se ha comentado que la ventilación de confort pierde casi todo su sentido, salvo circunstancias muy especiales y casi se podría decir que excepcionales, como podrían ser, por ejemplo mantener una temperatura soportable dentro del túnel.

La ventilación en caso de incendio, sin embargo, mantiene su importancia; no obstante, las especiales circunstancias, y el novedoso comportamiento de los fuegos en las baterías de los actuales vehículos eléctricos, hacen obligado redefinir el modo de actuación, e incluso el sistema de ventilación que es necesario instalar en un túnel, para dotarlo de unas condiciones mínimas de seguridad frente a incendios de esta índole .

SINGULARIDAD DE LOS INCENDIOS DE LAS ACTUALES BATERIAS DE VEHÍCULOS

Aunque no hay reportados muchos incendios de vehículos eléctricos dentro de túneles, si se han realizado ensayos en los que están implicados este tipo de vehículos.

A cielo abierto, se pueden citar la explosión de las baterías de un autobús eléctrico en París, con el incendio posterior, o la explosión de un Tesla- vehículo casi icónico en el mundo de los cochas eléctricos- en una estación de recarga.

En cuanto a los ensayos, mencionar el gran trabajo que hacen desde TST, el túnel de ensayos de Asturias, y en los que se pone de manifiesto la gran dificultad para extinguir los fuegos en vehículos de esta naturaleza. De hecho, parece que el método más efectivo resulta ser aislar el vehículo dentro de una "caja", para su posterior inmersión en agua, e impedir, así, que se propaguen los materiales resultantes del fuego.

Los métodos de extinción habituales, como son el agua y los espumógenos, no parece que resulten muy eficaces.

De hecho, los incendios de las baterías de los vehículos eléctricos, suelen ir acompañados de proyección de elementos de sus componentes, en un a modo de fuegos artificiales.

Obviamente, estas proyecciones o fuegos artificiales pueden ser muy vistosos, pero resultan tremendamente peligrosos: la mayor parte son metales que subliman formando nubes de alta toxicidad. Tambien se han detectado concentraciones de ácido fluorhidrico (HF), altamente tóxico, y agresivo: ataca al vidrio.

A tenor de estos hechos, se puede deducir que la actuación con la ventilación tal como está actualmente concebida, puede resultar, no solamente ineficaz, sino más bien peligrosa.

Por tanto, a nuestro juicio se deben intensificar los ensayos, que deben ser realizados tomando muestras de los gases y materiales generados que son arrastrados por la corriente de aire dentro del túnel, es decir medir y evaluar las condiciones reales dentro de un túnel.

Este objetivo, no choca con aquellos encaminados a buscar la forma de extinción de esos fuegos, que también son de suma importancia. Pero no se debe olvidar que la fase de extinción en un túnel, es la última; acontece, en general, bastantes minutos después de producirse el incidente, y, entre tanto, hay que gestionar lo mejor que se pueda la seguridad dentro del túnel, especialmente los gases tóxicos, mucho más que nuestros conocidos CO, CO2, etc.

Si, como se ha visto en incendios de esta naturaleza, estos materiales, que se expanden en forma de fuegos de artificio, camparán a lo largo del túnel arrastrados por la corriente de aire, al ser tan nocivos, se podría pensar en sacarlos a través de un conducto libre de personas: La vieja ventilación semi transversal extractiva puede ser una buena solución para ello.

Es evidente que, la eliminación de contaminantes en el trascurrir cotidiano del túnel, no debe eliminar a la ventilación de los elementos de seguridad que se deban instalar.

Siguiendo con los elementos de seguridad que se han ido implementando, figuran los sistemas de extinción: Los tradicionales de extintores portátiles, las BIE, e incluso, los sistemas de agua nebulizada, en sus distintas versiones de presión.

Cualquiera de ellos, parece que no presenta una gran tasa de éxitos, en cuanto a la extinción. Por tanto, habrá que ir repensando que sistema es el adecuado, y modernizar los túneles con él.

Si la inmersión en recipientes específicos es una buena solución, habrá que pensar la conveniencia de disponer de alguno en las cercanías o en las bocas del túnel, así como que los equipos de intervención dispongan de medios para su transporte, y utilización., sin que se excluya adecuar los avances en elementos de extinción y disponer de los mismos en los túneles igual que actualmente se dispone de extintores y BIEs.

CONECTIVIDAD Y AUTONOMÍA

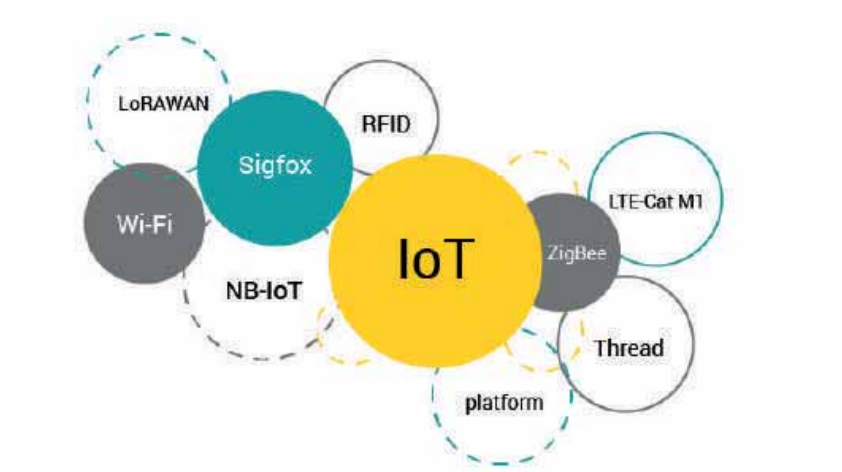
La tendencia, cada vez más, es a tener el vehículo conectado: Con otros vehículos, con una red general sea de una Smart City, o de otra índole.

El túnel no será una excepción. Ya hay ensayos piloto sobre la conectividad de los túneles.

Las ventajas que brinda a los explotadores del túnel, desde el punto de vista de la seguridad, son muchas, por ejemplo disponer de información y poder transmitirla a los usuarios, en tiempo real:

- Accidentes: detectados por el sistema de vídeo vigilancia o por el DAI.
- Tráfico lento: detectable por los sensores del túnel: cámaras que detectan situaciones de congestión del tráfico, sea visualmente o mediante alarma de umbral de velocidad.
- Condiciones meteorológicas adversas a la salida del túnel: detectables por cámaras o estaciones meteorológicas (niebla, nieve, precipitaciones fuertes).
- Tráfico pesado/excepcional yo de materias peligrosas por el interior del túnel.
- Vehículo parado.
- Obras en el túnel.
- Carril cortado.
- Túnel cerrado.
- Peatones o trabajos dentro del túnel.

Obviamente, también pueden/deben interactuar con los sistemas ITS tradicionales del túnel para facilitar el acceso a los vehículos de emergencia y/o intervención de forma que se reduzcan los tiempos de actuación y por tanto un aumento considerable de los niveles de seguridad e interoperabilidad del túnel.



No se debe olvidar que el vehículo conectado puede permitir la interacción con sistemas ITS del túnel, de forma que se pueda conocer el estado del vehículo, dirección, velocidad, y otros parámetros, por ejemplo de estado de fatiga del conductor, que sirvan como alerta temprana, ante la posibilidad de prever una avería o accidente.

SITUACIÓN TRANSITORIA.

En los próximos años, se verá, muy probablemente, la aparición de nuevos equipamientos en los túneles.

Así, durante unos años, deberán convivir vehículos con motor de explosión tradicional, con motorizaciones hibridas, y nuevas formas de tracción: eléctrica, hidrógeno.

La gestión de incidentes dependerá en gran medida de ello: No es lo mismo un incidente simple, como por ejemplo, parada por exceso de temperatura, en un vehículo de combustible derivado de petróleo, ya conocido y estudiado, que uno eléctrico. En este tipo de vehículos, sobrecalentamiento de las baterías pueden derivar en riesgos muy importantes.

La intervención ha de ser muy medida: La celda de baterías de un coche eléctrico, maneja tensiones del orden de 300 Voltios de corriente continua.

Por tanto, la actualización y formación del personal de intervención, los agentes de campo, o vigilantes de la carretera, y especialmente de los Operadores de Sala de Control del Túnel, se muestra como imprescindible y obligatoria. Formar y actualizar a los Jefes COEX, resulta, asimismo, de primordial necesidad.

La formación se debe aplicar, además al personal de la Sala de Control del Túnel

EL FUTURO CASI INMEDIATO

Actualmente, aprovechando el desarrollo de las smart city, se está desarrollando la conectividad de los vehículos, cuyo fin último serían los vehículos autónomos, en cuyo desarrollo también se están empleando numerosos recursos.

En el Proyecto INFRAMIX (2), financiado por la Unión Europea, se realizó una propuesta de clasificación de las carreteras para soportar la conducción autónoma que se reconoce con las siglas ISAD (Infrastructure Support for Automated Driving), en la que se establecen cinco niveles en función del nivel de digitalización de las vías.

La interconexión entre vehículos, la influencia entre ellos y los sistemas de seguridad propios del túnel, tienden a complementarse, de forma tal que se introducen nuevos elementos de seguridad, que, a su vez, conllevan nuevos elementos de riesgo: exceso de señales y saturación de los espectros de radio, choques entre protocolos de comunicaciones, ruido electrónico introducido por los equipos de los vehículos y los del propio túnel, etc.; todo ello hace necesario la adaptación y modificación de los sistemas existentes, adecuar la señalización actual, el establecimiento de regulaciones y la adaptación de las normativas vigentes.

Las dos tecnologías de partida, por un lado las de comunicaciones de corto alcance, para una interacción más "local", y por otro lado, las comunicaciones celulares que utilizan las tecnologías LTE, están convergiendo, según informa la 5GAA (5G Automotive Association), en lo que denomina la plataforma unificada de comunicación C-V2X.

En el Grupo de Trabajo de la ATC EL VEHÍCULO CONECTADO EN TÚNELES, se ha analizado el estado de la tecnología a fecha actual, siempre teniendo en cuenta el estado permanente de cambio y actualización que acontece en estos desarrollos técnicos y tecnológicos.

El objetivo último de esta tecnología es el incipiente vehículo autónomo, que está teniendo un especial interés por parte de muchos fabricantes.

Como es natural, estos avances tecnológicos, incluso una vez consolidados, no dejen de tener unos riesgos asociados importantes.

Se puede pensar en los riesgos de fallos de los sistemas, tanto los de abordo, como los del propio túnel.

Los fallos de los sistemas del túnel pueden resultar mucho más críticos, debido a que los vehículos y sus conductores, tenderán a mantener una confianza en el buen funcionamiento del conjunto. Sabemos que, lamentablemente, esto no es así.

Y surgirá, posiblemente, la solución aeronáutica: Redundancia. Es una solución perfectamente válida, si resulta económicamente aceptable, que así será, según las presiones de los agentes implicados.

No obstante, existe otro riesgo, muchas veces minimizado, sea a propósito, o para evitar alarmas, como es el riesgo de que externamente se tome el control de sistemas críticos. Lo que viene a ser ataque informático o hackeo de los sistemas.

Su objetivo puede ser dañino, directamente: crear el caos; en su versión más grave, tomar el control de elementos de vehículos, o simplemente, recopilar datos de usuarios con fines ajenos a los de ellos.

Es posible que este riesgo esté muy minimizado, pero, sin duda es, a nuestro juicio, uno de los más graves, y posiblemente de los más difíciles de eliminar: la propia filosofía de conexión favorece que desde un elemento, sea un vehículo, o un sensor, se pueda entrar en el conjunto.

Si se compara el nivel de automatización actual, y la formación específica de los operadores de sala, con las necesidades futuras, se puede vislumbrar una diferencia enorme.

Esta diferencia vendrá dada, no solamente por la complejidad de los sistemas instalados y la abrumadora cantidad de datos que se reciban en la sala de control, sino también por las nuevas definiciones del funcionamiento de los SCADA instaldos.

En este sentido, muchas operaciones, especialmente las comunicaciones vehículo túnel, y vehículo a vehículo, correrán en segundo plano, casi sin conocimiento del operador, pero si deberán generar alarmas, que éste debe interpretar adecuadamente.

Esta interpretación es más crítica en el caso de fallos de alguno de los sistemas, o de incongruencias entre datos que, por la razón que sea –por muchas situaciones que se pre establezcan, es imposible que se prevean todas- el sistema de por buenas.

La formación específica de los operadores se torna, entonces, en la garantía de buen funcionamiento, y seguridad en el túnel.

Los conocimientos previos del personal que ocupe estos puestos deberá ser mayor que el exigido, generalmente, en la actualidad.

La resistencia al stress, la colaboración entre personas, y la capacidad del trabajo en equipo, serán claves en la elección de este personal.

CONCLUSIÓN.

El imparable avance tecnológico hace que el túnel, y la carretera, sea cada vez más sofisticado y complejo, a la par que más seguro.

Este avance requerirá que todo el mundo actualice sus conocimientos, y se adapte a unos cambios, a veces de difícil asimilación.

Los avances conllevan, también sus riesgos, ante los cuales, en ocasiones la solución, y las respuestas rápidas e inmediatas son muy complejas.

Los túneles se deberán adecuar a una realidad de conectividad y retos tecnológicos, que redundarán en una mayor seguridad, aunque siendo conscientes de la permanencia del riesgo. Riesgos que en esa propia realidad conectada serán novedosos, o la evolución de alguno de los que ya actualmente se están produciendo: caídas de redes, ataques informáticos…

Esa realidad conectada, conlleva, asimismo, una obsolescencia mayor de los equipos instalados. Es posible que aun siendo plenamente funcionales, los avances obliguen a instalar nuevos equipos que se adapten a las nuevas implementaciones por parte de fabricantes de vehículos, y de las empresas tecnológicas y de telecomunicaciones.

Esa obsolescencia forzada, obliga a inversiones o gastos, por parte del propietario el túnel. Gastos que, siguiendo la actual lógica, se deberán trasladar al usuario, sea en forma de peajes, o vía impuestos.

En todo caso, esto debe llevar a un análisis profundo del asunto, dado que la seguridad de los usuarios no se discute en ningún momento, pero si existen entes claramente beneficiadas por esa seguridad -usuarios aparte, objetivo final de ella-,

Estos beneficiarios, a nuestro juicio, deben ser copartícipes de la inversión y no solo del beneficio (económico en este caso).

Existen tres beneficiarios claros de este avance, exceptuando el usuario, (objetivo final y excusa de los beneficios):

Los fabricantes de vehículos: Disponen gratuitamente de miles de datos de los usuarios a través de sus vehículos, y actualmente los datos son dinero.

Las compañías de telecomunicaciones: Cobran por sus servicios, sin los cuales muchas aplicaciones de seguridad no funcionarán, y reciben, además una gran cantidad de información.

Las aseguradoras: Sus beneficios aumentan en razón directa a la disminución de accidentes.

Estos tres principales beneficiarios, debería ser, a nuestro juicio, copartícipes de la inversión necesaria para el correcto funcionamiento de los sistemas de conectividad y nuevas seguridades en las carreteras, en general, y en los túneles especialmente.

Pensando globalmente, se suscita una reflexión: si los avances se producen, como realmente ocurre, en otros ámbitos de la movilidad, ¿serán necesarios, en un futuro no muy lejano, las carreteras, los puentes, y los túneles?

NEXT GENERATION AIR PURIFICATION SYSTEM FOR ROAD TUNNEL WITH SIGNIFICANT INCREASED EV COMPOSITION

Chi Kit Ma; Kevin Tong; Leo Chan
AECOM Asia Company Limited

Air Purification System (APS) has been applied to many road tunnel projects around the world. APS deal with the major environmental concern of residents around the tunnel portals and ventilation buildings.

The APS adopted in road tunnels involves 2 steps of air treatment. The first step of treatment utilises an electrostatic precipitator (ESP) to remove dust. In the second step, utilities activated carbon filter to remove Nitrogen Dioxide (NO2) or Nitrogen Oxides (NOx) and further improve visibility and air quality.

Because of the increasing popularity of EVs, it is expected that there will be a reduction in NOx /NO2 and tailpipe emissions. This paper reviewed the influence on Air Purification System design for road tunnels due to the significate growth in EV and recommended the design consideration for tunnel ventilation systems with air purification systems.

SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE AIRE DE NUEVA GENERACIÓN PARA TÚNELES DE CARRETERA CON UN AUMENTO SIGNIFICATIVO DE LA COMPOSICIÓN EV

El sistema de purificación del aire (APS) se ha aplicado a muchos proyectos de túneles de carretera en todo el mundo. Los APS abordan la principal preocupación medioambiental de los residentes en torno a los portales de los túneles y los edificios de ventilación.

El APS adoptado en los túneles de carretera implica dos etapas de tratamiento del aire. El primer paso del tratamiento utiliza un precipitador electrostático (ESP) para eliminar el polvo. En el segundo paso, los servicios públicos filtran el carbón activado para eliminar el dióxido de nitrógeno (NO2) o los óxidos de nitrógeno (NOx) y mejorar aún más la visibilidad y la calidad del aire.

Debido a la creciente popularidad de los vehículos eléctricos, se espera que se produzca una reducción de las emisiones de NOx/NO2 y del tubo de escape. Este documento revisa la influencia en el diseño del sistema de purificación de aire para túneles de carretera debido al significativo crecimiento de los vehículos eléctricos y recomienda la consideración de diseño para los sistemas de ventilación de túneles con sistemas de purificación de aire.

SYSTÈME DE PURIFICATION DE L'AIR DE NOUVELLE GÉNÉRATION POUR UN TUNNEL ROUTIER AVEC UNE COMPOSITION EV CONSIDÉRABLEMENT ACCRUE

Le système de purification de l'air (APS) a été appliqué à de nombreux projets de tunnels routiers dans le monde. L'APS répond à la préoccupation environnementale majeure des résidents autour des portails des tunnels et des bâtiments de ventilation.

L'APS adopté dans les tunnels routiers implique deux étapes de traitement de l'air. La première étape du traitement utilise un précipitateur électrostatique (ESP) pour éliminer la poussière. Dans la seconde étape, des filtres à charbon actif permettent d'éliminer le dioxyde d'azote (NO2) ou les oxydes d'azote (NOx) et d'améliorer encore la visibilité et la qualité de l'air.

En raison de la popularité croissante des VE, on s'attend à ce qu'il y ait une réduction des émissions de NOx / NO2 et des gaz d'échappement. Cet article examine l'influence de la croissance significative des véhicules électriques sur la conception des systèmes de purification de l'air dans les tunnels routiers et recommande de prendre en compte la conception des systèmes de ventilation des tunnels avec des systèmes de purification de l'air.

1. REVIEW OF ELECTRIC VEHICLES TREND

Due to technology enhancement and local government promotion, electric vehicles become more popular globally. According to the sales database, the EV market share has recorded more than 100% growth in 2021.

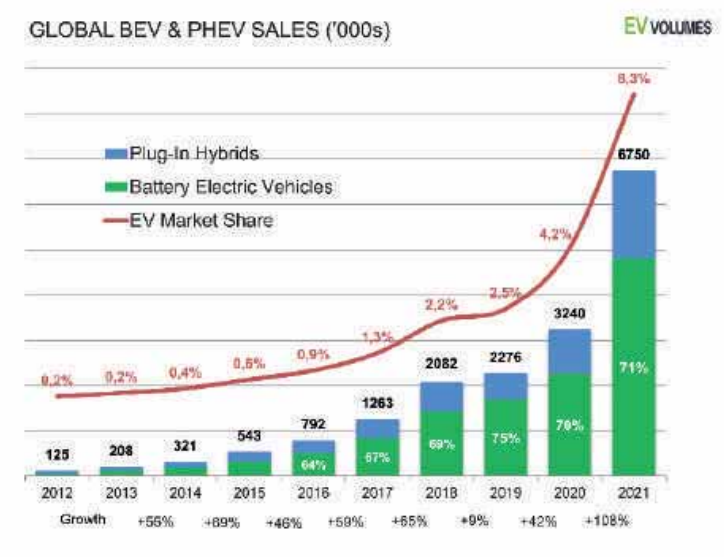


Figure 1 – Global BEV & PHEC Sales (Irle, 2021)

The main policy drivers of EV adopted include vehicle purchase and registration tax rebates, providing support for EV charging infrastructure, and phase-out of the internal combustion engine cars. For example, the Hong Kong government provides the first registration tax concession for EVs in 2017 and set out a roadmap for the popularisation of EVs in Hong Kong in the year 2021 that no new registration of fuel-propelled private cars in 2035. Globally, more than 20 countries have an electrification roadmap to phase ICE vehicles out within 10-30 years. Figures below from IEA show the ambitious target of various countries on transportation electrification.

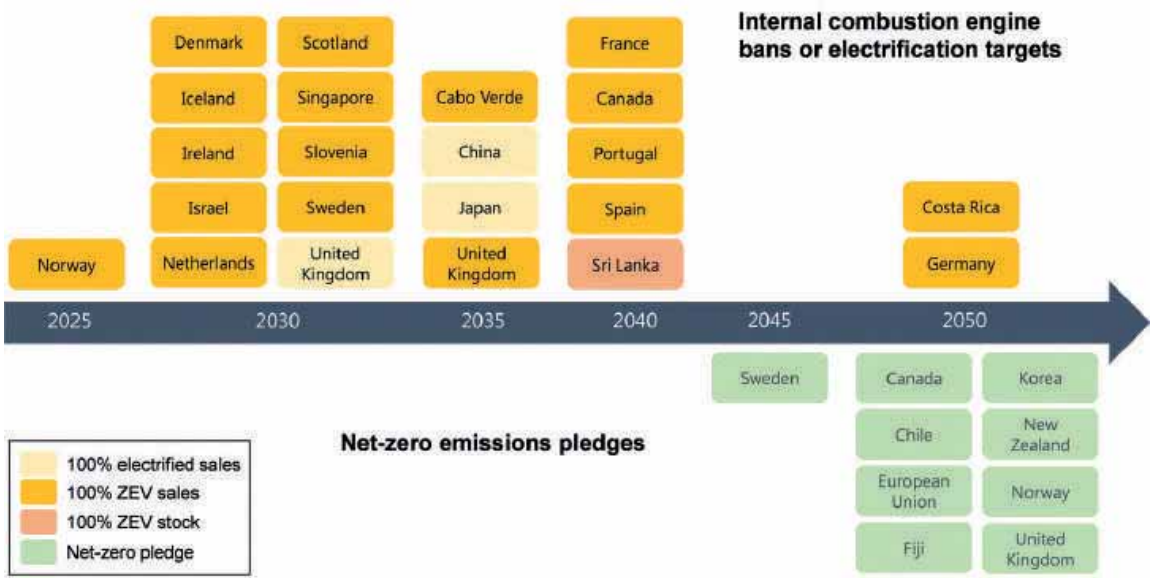


Figure 2 - Ambitious Target of Various Countries On Transportation Electrification (IEA, 2021)

Battery electric vehicles (EVs), plug-in hybrid electric vehicles, and fuel cell electric vehicles are the main types of New Energy Vehicles. Batteries in battery electric vehicles are charged by electricity from the power grid, which powers the electric motor(s). Plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) are equipped with both electric motors and fossil fuel-powered internal combustion engines. In contrast to a typical hybrid vehicle, PHEVs can recharge their batteries by plugging them into an external power source. PHEVs are an ideal solution for long-distance driving with their internal combustion engine and the zero-emission driving mode. Hydrogen is used to generate electricity and power electric motors in fuel cell electric vehicles. The fuel cell is more efficient than an internal combustion engine and does not emit any exhaust. The only emissions from a fuel cell are water vapour and clean air, which are not considered pollutants.

2. VEHICLE EMISSIONS

2.1. Pollutant emissions of EV

Electric vehicles use electricity to power their motors and do not have internal combustion engines, so they do not have tailpipe emissions (NO2, CO, etc.). Nevertheless, there are still non-exhaust PM emissions caused by tyre and brake wear, road surface abrasion, and re-suspended road dust. PM 2.5 and above are the main contributors to non-exhaust particulate emissions.

Simons (2016) presented updated datasets for the emissions of private cars. Non-exhaust PM emissions generated from tyre, brake and road wear are found dependent on vehicle weight and thereby independent of vehicle type. Studies suggested that there is a linear relationship between vehicle weight and non-exhaust PM emissions (Gillies et al., 2005).

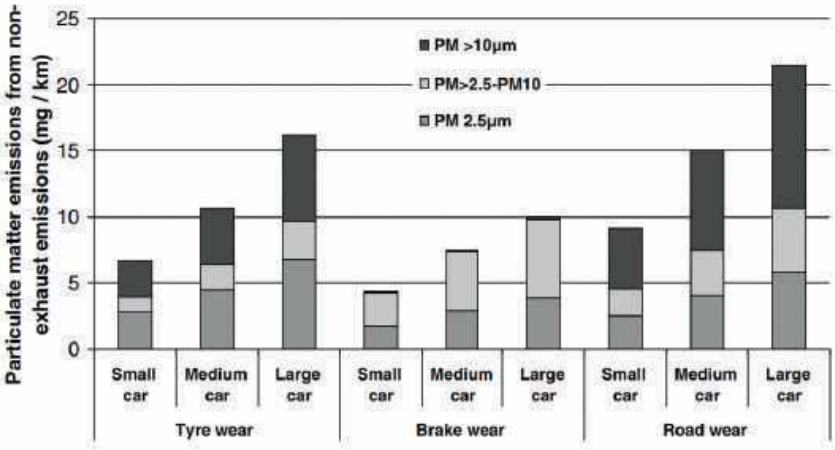


Figure 3 - Non-exhaust particulate matter (PM) emissions from private cars (Simons, 2016)

Timmers & Achten (2016) reviewed and compared the weight of electric and conventional cars. It shows that EVs are 24% heavier than their conventional counterparts and thus produce a similar amount of PM emissions compared to average conventional vehicles.

2.2. Review on roadside pollutant pattern of a sample tunnel

A study on a sample 3 km dual two lanes tunnel is conducted to study vehicle emissions at different travelling speeds under two scenarios. The first scenario, which is the baseline of the comparison, uses traditional fossil fuel vehicles for all vehicle types. Based on the EV sales trend and electrification roadmap of phasing out ICE

vehicles, it is expected that private cars with ICE will be the first type of vehicle to be completely phased out in the market. Therefore, private cars are assumed to be fully replaced by EVs while other types of vehicles remain unchanged in the second scenario. The vehicle emission rate, traffic density and travelling speed recommended by PIARC 1987 and PIARC 2019 for road tunnel ventilation design are used in estimating the pollutant emission along the tunnel. The traffic flow per lane for this urban tunnel is shown in Table 1 below.

Table 1: Recommended Design Traffic Flow for urban traffic by PIARC 1987 Report

Vehicle Speed (km/h)	**Traffic flow (PCU/hr/lane)**
	Uni-directional Traffic
0	165 PCU/km/lane
10	1000
20	1500
30	1850
40	2000
50	2000
60	2000
70	1500
80	1200

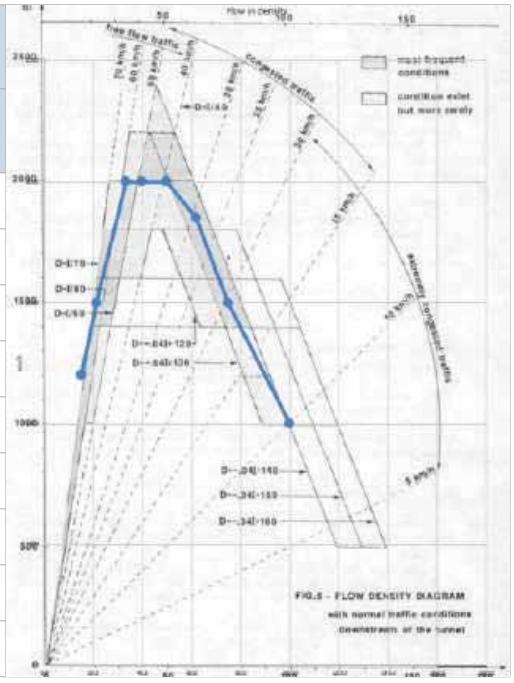


Table 2: Traffic Composition and Emission Standard

	Private Car	**Light Goods Vehicle**	**Heavy Goods Vehicle**	**Bus**	**Others**
Traffic Composition (%)	58	12	3	6	21
Vehicle Emission Standards					
Baseline	EURO-VI	EURO-VI	EURO-VI	EURO-VI	EURO-VI
EV case	EV	EURO-VI	EURO-VI	EURO-VI	EURO-VI

Table 2 summarises traffic compositions and emission standards for a project in an urban area. The emission standards for vehicles are assumed to be as per EURO-VI. Figures 4, 5 and 6 illustrate the results of calculating the concentration of pollutants along the tunnel.

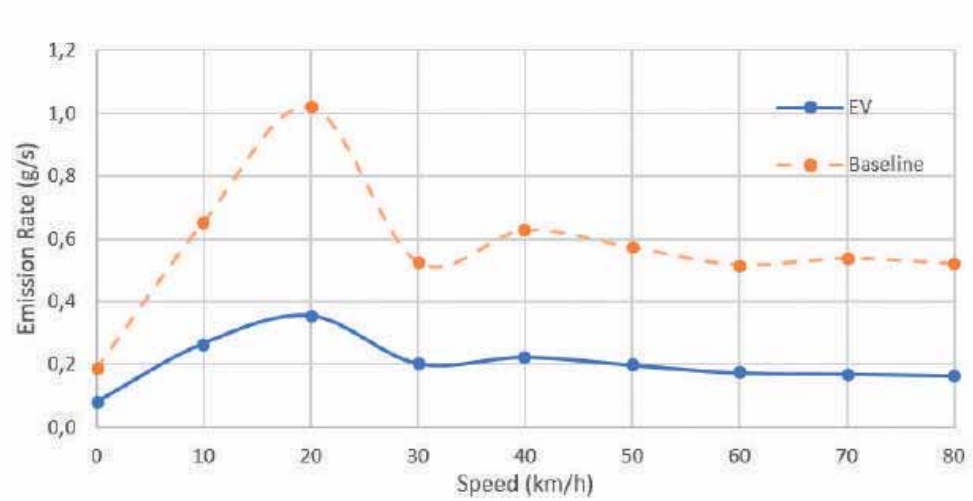


Figure 4 – CO Emissions along Tunnel

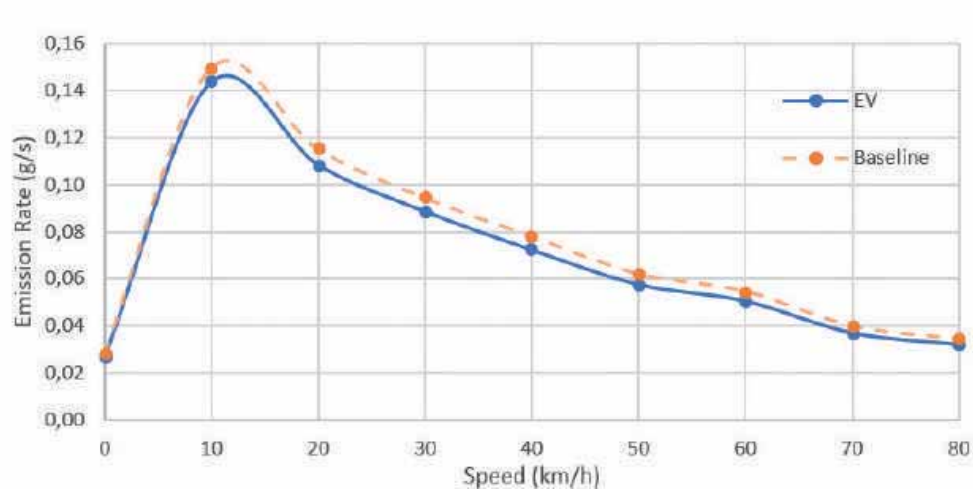


Figure 5 – NO2 Emissions along Tunnel

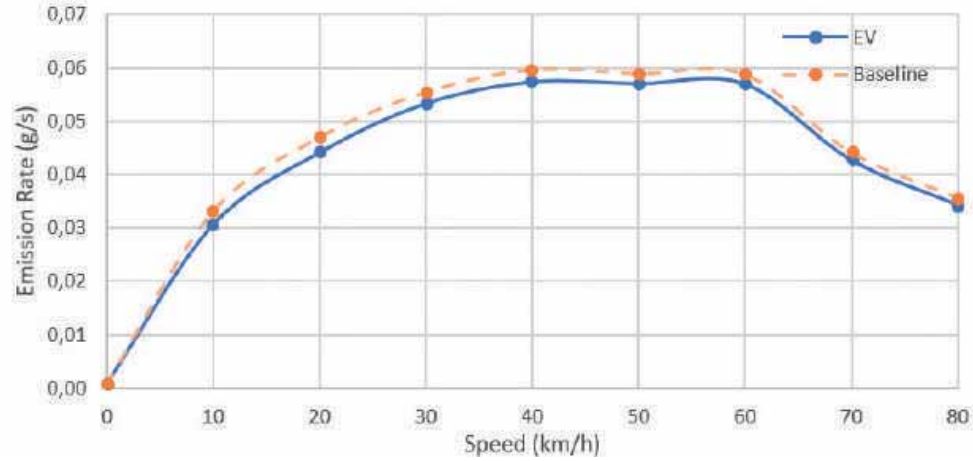


Figure 6 – PM Emissions Along Tunnel

The estimation results show a significant reduction in CO emissions along the tunnel due to the adoption of private passenger EVs. It is worth noting that the reduction in NO2 emissions are minor even with private cars contributing around 60% of the traffic mix since the majority of NO2 emissions are emitted from diesel engine instead of petrol engine which most private cars are using. PM emissions in both scenarios are comparable, which agrees with the result of Timmers & Achten (2016).

Vehicle emissions that affect air quality in road tunnels are mainly dominated by NO2 and Respiratory Suspended Particulates (RSP). In which NO2 emissions are generated from vehicle engines and RSP emissions are mainly generated from tyre, brake and road wear.

Although the estimation on a sample tunnel in the urban area above shows that NO2 reduction due to the electrification of private cars is not significate, with advancing EV technology, more goods vehicles that are equipped with diesel engines, the major contributors to NO2 emissions on the roadside, will be replaced by EVs or other types of new energy vehicles. A dramatic reduction in NO2 emissions can be expected and should be studied on a project-by-project basis. Nevertheless, the adoption of road tunnel air purification systems in urban tunnels is environmentally beneficial to the tunnel surroundings.

Also, Figure 5 shows that the highest NO2 emission rate occurs under low-speed traffic of around 10km/h. The equation below clearly illustrates that piston airflow is positively related to traffic speed. The phenomena indicate that the need for NO2 treatment occurs at low speeds and tunnel airflow is low. NO2 concentrations are low during high-speed traffic, but tunnel airflow is much higher. In other words, operating APS under free-flow traffic conditions is treating "fresh air" and is not efficient. Tunnel ventilation systems with air purification systems should take this phenomenon into account when designing and operating. One of the current road tunnel projects in Hong Kong designed the APS capacity according to tunnel airflow under low-speed congested traffic to avoid unnecessary APS operation under free-flow traffic.

$$\Delta P_{veh} = [\frac{ML}{V}] \frac{(c_w \mathrm{A})_{veh}}{\mathrm{A}_T} \frac{\rho}{2} (v \pm u)^2$$

Where:

ΔP_{veh}	Pressure difference created by vehicle, Pa
M	Traffic flow, vehicle/hr
L	Length of the tunnel, km
V_{veh}	Velocity of moving traffic, km/hr
c_w	Coefficient of resistance for a vehicle type
A_{veh}	Cross-sectional area for a vehicle type, m^2
A_T	Cross-sectional area of the tunnel, m^2
U	Air velocity in the tunnel, m/s

3. AIR PURIFICATION SYSTEM

3.1. Air purification system for road tunnel

Air purification system (APS) has been applied in road tunnel projects around the world to improve air quality inside tunnels or tunnel emissions from portals or vent shafts. For example, Laerdal Tunnel in Norway, the Túnel Sur M30 Tunnel in Spain, M5 East Tunnel in Australia, Aioi-cho Tunnel and Central Circular Route Shinjyuka Line Tunnel in Japan, etc. APS is also adopted in Hong Kong's road tunnel projects to reduce tunnel emissions and mitigate outdoor air quality issues. The APS adopted in Hong Kong involves 2 steps of air treatment. The first step of treatment utilises an electrostatic precipitator (ESP) to remove dust and fine particles. In the second step, activated carbon filters are utilized to remove Nitrogen Dioxide (NO2) and further improve visibility and air quality. The removal efficiency of a minimum of 80% for particulates and 80% of NO2 from the airflow stream is adopted in Hong Kong projects. This efficiency requirement is due considered the market availability, carbon replacement duration and other operation and maintenance concerns. The APSs are provided at the suction side of the tunnel ventilation fans. Tunnel exhaust will first pass through the ESP and De-NO2 modules of the APS, and then continues its path across the tunnel ventilation fans and discharge to the ambient.

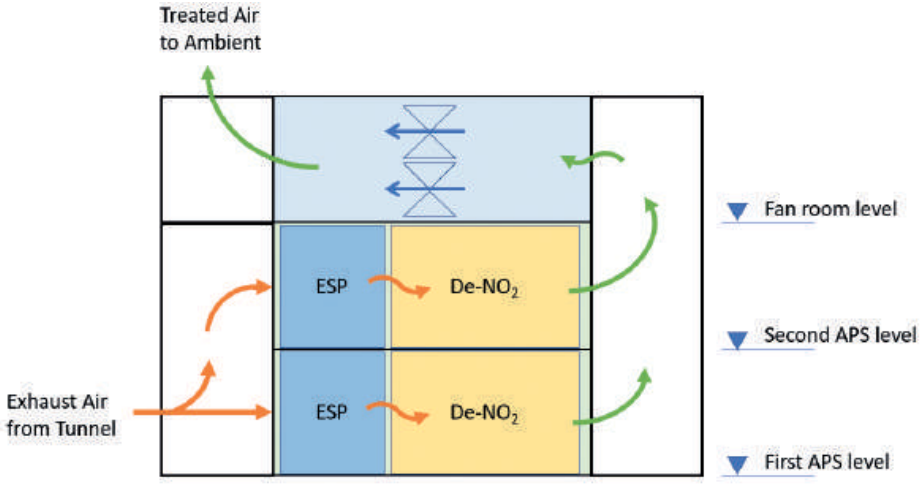


Figure 7 – Flow path of tunnel exhausted air

ESP is an electrical device that utilizes electrostatic principles to capture dust particles within the airstream. The ESP employs a two-stage structure that comprises ionizing and collecting sections. In the ionizing section, a high positive voltage is applied to discharge poles, and suspended particulates from the tunnel exhaust are electrostatically charged when passing through this area. A strong electric field is formed between a high voltage plate and the collection plates in the collecting section when a high positive voltage is applied between them. As a result, charged particulates are captured on the collection plates.

De-nitrification is a chemical adsorption/absorption process that uses activated carbon. The adsorbent/absorbent will adsorb/absorb the NO2 in the air. NO2 is removed from the air by activated carbons during operation. As the adsorption/absorption process is not only for NO2 but also for particulates, the air stream will first be treated by the ESP filter to prolong the lifetime of the activated carbon.

The above mentioned APS, which is used in Hong Kong road tunnel projects, is separated from the tunnel and installed in the ventilation building. After treatment, tunnel air is directly discharged to the atmosphere or redirected back to the tunnel to ventilate the tunnel. The advantage of this solution is that the air purifica-

tion equipment is centrally installed in the ventilation building and would be more convenient for maintenance and management.

Aside from installing them in ventilation buildings, APS arrangements could be designed based on the tunnel structures and air treatment goals. For example, APS can also be provided at the top of the tunnel or in a bypass layout. An APS will be installed at a bypass tunnel or duct on the side of the running tunnel in a tunnel bypass arrangement. Bypass tunnel air will be extracted from the tunnel and treated by an APS installed in the bypass tunnel, then returned to the tunnel to enhance the in-tunnel air quality. This arrangement would be beneficial for long tunnels and would eliminate the need for a mid-tunnel ventilation building.

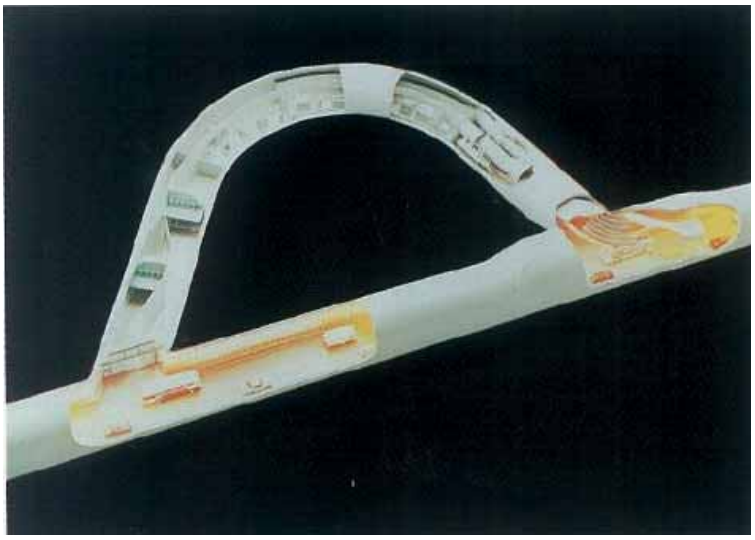


Figure 8 –Air purification System in Bypass Tunnel

3.2. Impact on APS design and renovation on APS

While the reduction in NO2 by replacing ICE private cars with EVs is not significant, applying APS in road tunnels is still worth considering in the short run. Nevertheless, the EVs trend is still an important factor in designing an APS for a road tunnel. As the NO2 from road traffic will be reduced when EV composition in other vehicle categories, notably LGV and HGV. Air treatment on NO2 in road tunnels APS may not be required. The topic of how TVS / APS should be evolved is crucial.

Electric vehicles, which are considered zero-emission vehicles, have no roadside emissions, except for PM emissions from tyres and breaking. As a result, there is no additional requirement for the APS, but there could be a reduction in the need for De-NO2 filtering. The filtering efficiency of existing systems could be reviewed with this relaxation of the De-NO2 filtering requirement. It may be possible to delay the replacement of carbon and fully utilize the remaining adsorption capacity of activated carbon and even remove the De-NO2 filter in a subsequent step. The APS increases the power consumption of the tunnel ventilation system because of its high air resistance. The pressure drop of the APS is primarily caused by the carbon filter, which is around 600Pa and 360kW power for a 600m3/s handling capacity APS. Thus, removing the De-NO2 filter can result in significant energy savings.

A tunnel ventilation system with APS should be controlled intelligently to avoid inefficient operation. The NO2 estimation as shown in Figure 5 above shows that low traffic speed operation results in higher NO2 emissions while the PM emissions are much higher under high-speed traffic. We should also note that under high-speed traffic conditions, the piston air induced by moving vehicles is also higher than in low-speed traffic conditions. As a result, a high handling capacity of APS is required, while the NO2 concentration is low.

Thus, APS may be operated only when pollutant concentration exceeds certain limits. In which, during the free-flow traffic, where the pollutant concentration is rather low, the APS could be bypassed. The beauty of by-passing APS is to avoid handling large around of low pollutant concentration airflow and inefficient operation of APS. This smart control of APS bypass operation could be achieved by using environmental sensors for active monitoring and TVS/APS and AI control using big data to achieve energy savings without compromising ambient air quality.

4. CONCLUSION

The electrification of traffic is a global trend. Fossil fuel vehicles will be replaced by electric vehicles and achieve the target of zero-emission traffic. As a result, the De-NO2 filter in APS may not be required in the further. However, given the electrification process and EV technology development, NO2 filtering is still required in the short run.

To ensure the efficient operation of APS, the EV trend and pollutant emission pattern should be considered in APS/TVS design. NO2 filtering is required during low-speed congested traffic conditions when airflow along the tunnel is much lower than during free-flow traffic conditions. A measure to avoid unnecessary APS operation would be to provide an APS to handle tunnel airflow under congested traffic and allow tunnel exhaust to bypass the APS under free-flow traffic.

REFERENCES

Gillies, J., Etyemezian, V., Kuhns, H., Nikolic, D., & Gillette, D. (2005). Effect of vehicle characteristics on unpaved road dust emissions. Atmospheric Environment 39, 2341–2347.

IEA. (2021). Global EV Outlook 2021. Paris: IEA. Retrieved from https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021

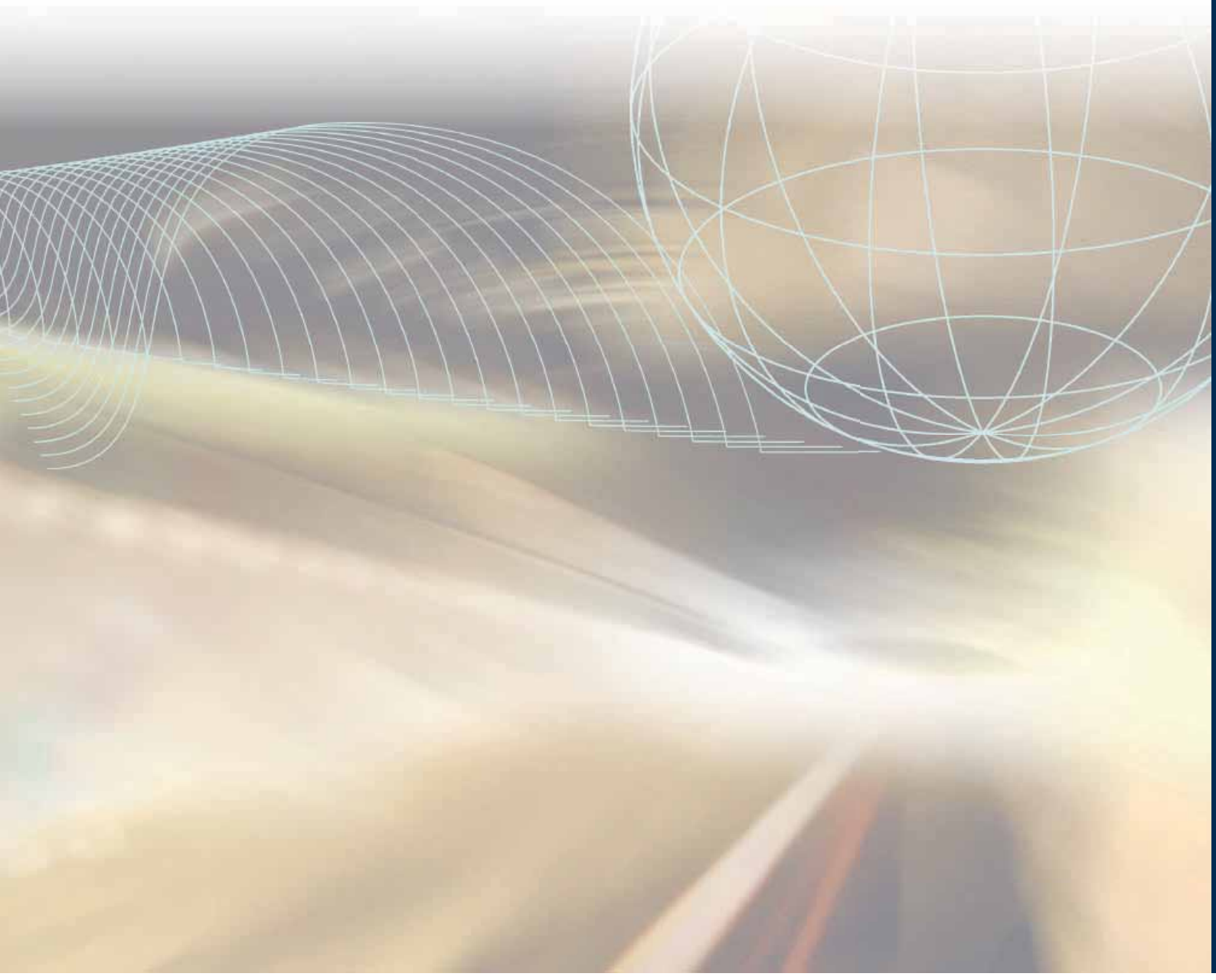
Irle, R. (2021). Global EV Sales for 2021. (EV-volumes.com) Retrieved from https://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/

PIARC. (1987). Road tunnels. Technical Committee 5 Report. Proceedings of XVIIIth World Road Congress. Brussels: PIARC.

PIARC. (2019). Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation. Paris: PIARC.

Simons, A. (2016). Road transport: new life cycle inventories for fossil-fuelled passenger cars and non-exhaust emissions in ecoinvent v3. Int J Life Cycle Assess 21, 1299–1313.

Timmers, V. R., & Achten, P. A. (2016). Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. Atmospheric Environment 134, 10-17.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE FOMENTO