

Seguridad vial y explotación



Coordinador: A. García Garay; J. P. Aguilar, R. López Guarga, R. Llamas, y A. Sánchez (DGC Ministerio de Fomento); E. Belda (DGT-Ministerio del Interior); J. Díez de Ulzurrun y A. Muñoz (Madrid Calle 30); J. M. Pardillo Mayora (Universidad Politécnica de Madrid); y O. Gutiérrez-Bolívar (Intevía, Grupo Elsamex).

Resumen

El Gobierno de España ha declarado como uno de sus objetivos prioritarios la mejora de la seguridad vial, asumiendo el compromiso de la UE de reducir a la mitad el número de víctimas mortales por accidentes de tráfico en el horizonte de 2010 con respecto a 2002 y a la cuarta parte en 2020. Para ello

resulta necesario actuar enérgicamente sobre todos los factores que influyen en la seguridad de la circulación, y en concreto sobre la infraestructura viaria. El presente informe recoge algunas de las iniciativas más novedosas y eficaces que han sido desarrolladas en España durante los tres últimos años para mejorar la Red nacional de carreteras. Fuertemente ligada con la mejora de la seguridad vial se encuentra la eficiencia en la explotación viaria, y en particular la explotación de túneles de gran longitud e intensidad de tráfico. Por dicha razón, se ha considerado interesante exponer los últimos avances en sistemas de ventilación y de extinción de incendios, presentes en los túneles de Madrid Calle 30, y de Monrepós, que permiten responder

rápidamente a una eventual emergencia que pueda declararse en el interior de estos grandes túneles.

1. Inversión en infraestructuras viarias para la mejora de la seguridad vial

La evolución de la siniestralidad en la Red de Carreteras del Estado española en los últimos años es positiva. En 1990 se inició una disminución del número de accidentes con víctimas, de forma que el riesgo de que se produzca un accidente con víctimas en las carreteras estatales ha ido descendiendo paulatinamente a partir de 1989, al bajar el índice de peligrosidad desde 40,3 aquel año, hasta 13,99 en el año 2004. El número

de víctimas mortales también ha disminuido progresivamente en los últimos años, bajando desde 2939 en 1991 a 1463 en el año 2004, lo que representa una disminución del 50,2% en términos absolutos, y del 72,1 % en cuanto a riesgo de mortalidad, ya que el índice de mortalidad (número de víctimas mortales por cada 100 millones de kilómetros recorridos) se ha reducido desde 4,3 hasta 1,1. Conviene recordar que en España se utilizan los índices de peligrosidad y mortalidad, que corresponden respectivamente al número de accidentes con víctimas y de víctimas mortales que se registran por cada 100 millones de kilómetros recorridos; midiendo, por tanto, el riesgo de sufrir un accidente o de resultar muerto, al circular por una red de carreteras. En los años 2004 y 2005, con la intensificación de la política de mejora de la seguridad vial en todas sus vertientes, se ha conseguido acentuar la tendencia descendente de los índices de peligrosidad y mortalidad en la Red de Carreteras del Estado (RCE) como muestran las *figuras 1 y 2*.

1.1. Una estrategia integral de inversiones en mejora de la seguridad de la Red de Carreteras española

La Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento español, asumiendo el compromiso del Gobierno de reducir a la mitad en el número de víctimas mortales de los accidentes de circulación en el horizonte de 2010 con respecto a 2002, y a la cuarta parte en 2020, y de acuerdo con el vigente Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT), tiene, como objetivo primordial de todas sus actuaciones, la mejora de la seguridad de la circulación en la Red que administra. Para contribuir a la consecución de este objetivo, se están adoptando una serie de procedimientos destinados a tener en cuenta la seguridad desde la concepción misma de una carretera, y a lo largo de toda su vida de servicio, abarcando las etapas de planificación, proyecto, construcción,

EVOLUCIÓN DE LOS ÍNDICES DE PELIGROSIDAD, MORTALIDAD Y GRAVEDAD EN LA RED CONVENCIONAL

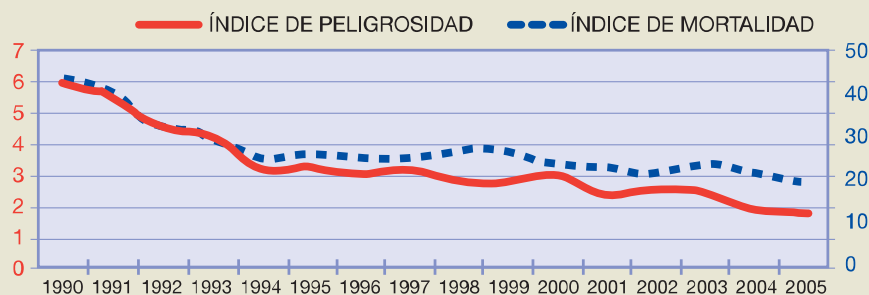


Figura 1. Evolución de los accidentes en las carreteras de dos carriles.

EVOLUCIÓN DE LOS ÍNDICES EN LA RED DE ALTA CAPACIDAD

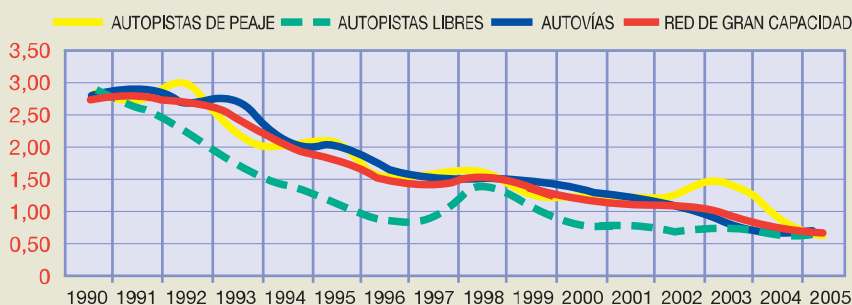


Figura 2. Evolución de los accidentes en las carreteras con 4 o más carriles.

puesta en servicio y conservación. Esta estrategia integral trata de responder a todos los condicionantes derivados del factor humano, planteando el diseño de la carretera de forma que las interacciones entre el entorno, la vía y el usuario se produzcan con el menor nivel de riesgo posible. En las fases de planificación y de proyecto se está implantando un sistema de auditorías de seguridad vial, que constituyen una parte diferenciada del proceso de diseño. En dicho sistema, un equipo independiente de expertos en ingeniería de carreteras y seguridad vial revisa la configuración de los elementos físicos de una carretera y sus interrelaciones, con el fin de detectar potenciales riesgos para la seguridad de los usuarios y formular recomendaciones al equipo de planificación o de proyecto sobre las medidas adecuadas para evitarlos, antes de llegar a la etapa de construcción. Además de ello, en las carreteras estatales en servicio, se está realizando un análisis del estado de la seguridad vial para garantizar que las características de seguridad de cada tramo son compatibles con la clasificación fun-

cional de la vía, y para detectar cualquier situación que con el tiempo pueda convertirse en un problema de seguridad. A tal fin, 9 equipos de expertos han revisado en 2006 la infraestructura viaria y su interrelación con el entorno, redactando las propuestas de mejora correspondientes.

Finalmente, en España siguen realizándose cada año los programas anuales de mejora de la seguridad en las carreteras en servicio que comenzaron el 1986. Estos programas incluyen un conjunto de actuaciones destinadas a resolver los tramos de concentración de accidentes (que más adelante se definen), y a mejorar preventivamente las condiciones de seguridad vial, subsanando las carencias funcionales detectadas para reducir el riesgo potencial de accidentes en el conjunto de la Red.

1.2. Actuaciones Preventivas y de Bajo Coste del Programa de Seguridad Vial

Los factores más relevantes en la reducción de los accidentes en la Red de Carreteras del Estado en los últimos 10 años han sido probablen-

te la entrada en servicio de las nuevas autovías y de variantes de población, así como la realización del citado programa anual de seguridad vial, cuyos objetivos son los siguientes:

1º Tratar los tramos de concentración de accidentes.

2º Reducir preventivamente las zonas de conflicto potencial, que se localizan principalmente en intersecciones y enlaces, en travesías, en zonas periurbanas y en otros tramos en que se producen cruces de animales, pasos a nivel, tramos de difícil adelantamiento, etc.

3º Realizar sistemáticamente el Análisis de Estado de la Seguridad Vial (AESV) del conjunto de la red, que sirve de base para la definición de las medidas preventivas de mejora de la seguridad.

El tratamiento de los tramos de concentración de accidentes contempla un conjunto de actuaciones de elevada eficacia, que afectan a un porcentaje de la red aproximado del 5%, en el que se producen un 20% de los accidentes con víctimas y un 15% de las víctimas mortales. Con carácter anual, el Ministerio de Fomento identifica los tramos de concentración de accidentes (TCA) teniendo en cuenta, además de la accidentalidad registrada durante un periodo de 5 años, otras variables como la Intensidad Media Diaria (IMD), el tipo de vía y el entorno (urbano, interurbano o semiurbano). Una vez identificados dichos tramos, se procede a su estudio detallado por ingenieros especializados en estudios de seguridad vial, que inspeccionan cada uno de ellos, realizando un análisis y diagnóstico de seguridad del que se derivan las actuaciones que hay que realizar para su tratamiento y mejora. No obstante la elevada eficacia de las actuaciones en los TCA, debe tenerse en cuenta que el otro 80% de los accidentes y el 85% de las víctimas mortales se producen en el resto de la red. Es en esos tramos donde se desarrollan las actuaciones preventivas, que están encaminadas a eliminar elementos de la infraes-



Figura 3. Ejemplo de actuación de bajo coste en mejora de balizamiento en Murcia.

tructura potencialmente peligrosos, y a homogeneizar las características de la red, mejorándola antes de que tengan lugar los accidentes. El estudio de la reducción de accidentes alcanzada tras la puesta en servicio 3800 obras desarrolladas dentro de los programas de seguridad vial permitió comprobar que la reducción media del riesgo de accidentes tras la actuación es del 38% y la de mortalidad del 34%.

Con estos efectos, el plazo medio de recuperación del coste de la inversión realizada a través de la reducción de los costes sociales de los accidentes es de 2,5 años, sin cuantificar otros aspectos, como las mejoras de capacidad, movilidad, ahorro de carburante, disminución del tiempo de recorrido, etc.

En estos estudios económicos, del periodo de retorno de la inversión, la valoración de los costes sociales de los accidentes fue de 150 000 € para la víctima mortal, 20 000 € para el herido grave y 360 € para el herido leve. Entre las obras de seguridad vial incluidas en el estudio citado, las mejoras de señalización resultaron las de mayor rentabilidad ya que reducen el riesgo de mortalidad en un 39% y se amortizan en menos de 2,5 meses (relación beneficio-coste= 6,5). Los tratamientos de márgenes reducen el riesgo de mortalidad un 84%. La iluminación, los tratamientos de

travesía, las mejoras locales de trazado y los tratamientos de seguridad vial del firme disminuyen el índice de peligrosidad y mortalidad más de un 50% y 62%, respectivamente. Por último, los tratamientos de cunetas han reducido el riesgo de mortalidad un 31%. En cambio, la sustitución de intersecciones por enlaces, en carreteras convencionales, a pesar de haber reducido la peligrosidad en un 41% (c95 = 99%) en general, no se justifican económicamente, si sólo se tiene en cuenta criterios de seguridad vial, ya que el elevado coste de estas actuaciones, aproximadamente 1200000 €, hace que su periodo de amortización sea mucho más dilatado.

Los Análisis de Estado de Seguridad Vial (AESV) se intensifican en las zonas de conflicto potencial, que, como se dijo anteriormente, se localizan en intersecciones y enlaces, travesías, estrechamientos, cruces de animales, pasos a nivel, tramos de difícil adelantamiento, etc. En dichas zonas se analizan las características del itinerario y se proponen las actuaciones necesarias.

El detalle de los aspectos que son estudiados en los AESV es el siguiente:

a) Trazado en planta y alzado: Adecuación de los parámetros de diseño a las características del tráfico y a las velocidades reales de circula-

ción, y de las distancias de visibilidad a las velocidades reales de circulación. Se estudia la consistencia del trazado: variaciones de velocidad específica entre elementos sucesivos. La suficiencia de las oportunidades de adelantamiento (en carreteras de dos carriles), y el tratamiento adecuado de las transiciones entre tramos contiguos.

b) Sección transversal: Comprende la adecuación a las características del tráfico y del entorno, la consideración de las variaciones a lo largo del tramo y la transición entre tramos contiguos.

c) Pavimento y drenaje: Adecuación a las características del tráfico del entorno y localización geográfica (climatología).

d) Equipamiento: Se considera la claridad, oportunidad y uniformidad de la señalización, la continuidad de la señalización de orientación; la adecuación del balizamiento de la vía y de los nudos, y la iluminación.

e) Tratamiento de los elementos singulares: Se consideran de forma especial los nudos, las travesías, los túneles y las obras de paso, teniendo en cuenta la legibilidad, visibilidad, ángulos de cruce y la canalización de los movimientos de todos los usuarios.

f) Prevención de los efectos de la fatiga: Mediante la consideración de elementos de alerta y zonas de descanso.

g) Localización y adecuación de los accesos.

h) Márgenes: Tratamiento de los obstáculos y de los sistemas de contención en las márgenes, incluyendo los correspondientes a elementos de la carretera: cunetas, obras de drenaje, apoyos de estructuras, soportes de señalización, postes de iluminación, taludes, etc.

i) Estudio de flujos: Peatones y ciclistas.

l) Seguridad de los vehículos pesados tanto en pendientes como en nudos.

m) Análisis de la formación de co-las en ramales de entrada y salida o en intersecciones, y adecuación de

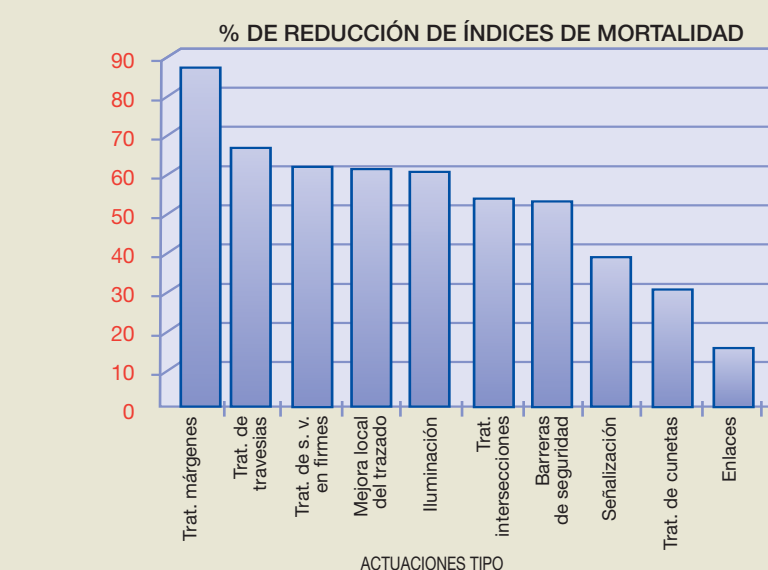


Figura 4. Eficacia de las actuaciones de seguridad.

las medidas dispuestas

n) Estacionamiento de vehículos: Localización y disposición de las paradas de vehículos de transporte público y accesos para vehículos de emergencia

1.3. Actuaciones específicas para la mejora de la seguridad vial de los motociclistas

La instalación de dispositivos de contención de vehículos se aplica en los lugares donde la gravedad del accidente contra el obstáculo que se protege sería mucho mayor que las consecuencias del choque contra la barrera. En España la normativa y disposiciones técnicas en materia de sistemas de contención para mejorar la seguridad de los vehículos se plasmó en la Orden Circular 321/95 T y P "Recomendaciones sobre sistemas de contención de vehículos". Según el estudio de los accidentes relacionados con estos sistemas, elaborado por la Dirección General de Carreteras, la gravedad de los accidentes es mayor en los tramos en los que no existe barrera de seguridad, llegando a ser aproximadamente el doble en el caso de autopistas y autovías. Y eso, a pesar de que estos sistemas de contención se instalan precisamente en lugares potencialmente más peligrosos. Igualmente, de los estudios de eficacia de

estos dispositivos se desprende que su instalación logra disminuir la gravedad de los accidentes (accidentes mortales por cada 100 accidentes con víctimas) en valores próximos al 30%. Sin embargo, mientras que las barreras se han mostrado capaces de reconducir en muchos casos las trayectorias de salida o invasión de los automóviles y encaminarlos de nuevo a la calzada, en el caso de los usuarios de los vehículos de dos ruedas se han mostrado especialmente agresivos.

De ahí que, paulatinamente, se haya tratado de mejorar el diseño de estos sistemas de contención, con objeto de minimizar el daño sobre los motociclistas. En el período 1999-2003, los accidentes con motos implicadas supusieron un 12% de los accidentes con víctimas que ocurrieron en la Red de Carreteras del Estado española, y los accidentes por salida de la vía de motocicletas supusieron el 2,4% del total de los accidentes con víctimas. La normativa española, ajustada a las directrices emanadas de la Comisión Europea de Normalización, establece la disposición de perfiles "C" en autovías y postes tubulares en carreteras convencionales, que evitan que, ante un eventual choque de un motociclista contra la barrera, se produzca heridas por corte, mejorándose así en relación con los anteriores perfiles en

Figura 5-
Protección
de caucho
reciclado
N-344. Nueva
valla de
protección.



“I” de las barreras. No obstante, aunque la colocación de nuevas barreras metálicas de seguridad, o la reparación de barreras dañadas en accidente se efectúa siempre con los nuevos postes “C” o tubulares, aún existe gran cantidad de barreras con los antiguos postes “I” que se están protegiendo con defensas especiales para amortiguar el posible impacto de un motociclista.

Sin embargo, el avance más importante en la mejora de las barreras de seguridad para proteger a los motoristas ha sido la implantación de un nuevo modelo, definido en la OC 18/2004, sobre “Criterios de empleo de sistemas para protección de motociclistas”, que, tras la realización de numerosos ensayos, entró en vigor el pasado 10 de enero de 2005; y consiste en la integración en las vallas metálicas convencionales de una segunda valla metálica en la parte inferior como se muestra en la siguiente figura 6.

De esta manera se impide que los motociclistas pasen por debajo de la valla y puedan golpearse con los postes, lo cual no perjudica al resto de vehículos en caso de que estos sufran accidentes.

Para la implantación de estas protecciones, el Ministerio de Fomento ha elaborado un Plan de Adecuación de las barreras que contempla un equipamiento continuo a lo largo de 1505 km en zonas de geometría ad-

versa de la Red de Carreteras del Estado, lo cual precisa una inversión de 43M € a desarrollar en 6 años.

1.4. ITS. Paneles de señalización variable

La Dirección General de Tráfico del Ministerio del Interior (DGT), abordó a principios de los años 80 la gestión y control de tráfico como una posibilidad de mejora del servicio a los usuarios de la carretera. Para ello procedió a la instalación de un conjunto de equipos de alta tecnología y gran poder de captación de la atención del conductor, que permiten que éste pueda estar puntualmente informado sobre incidencias del tráfico, tales como, accidentes, obras, causas de retención, incidencias meteorológicas, o recomendaciones de vías y alternativas. Esta información ha de ser realizada de forma precisa, continuada y en tiempo real, lo cual se consigue gracias a los Paneles de Mensaje Variable (en adelante PMV). En la actualidad, el número de PMV instalados en los 23 842 km de Vías de Gran Capacidad de la Red estatal supera las 1800 unidades, que se concentran en los accesos de las principales ciudades, donde los tráficos son significativamente más elevados. Dado que la intensidad de tráfico de las vías en que se instalan los PMV, normalmente supera los 50 000 veh/día, es posible afirmar que más de las tres cuartas partes de los conductores españoles reciben en sus des-

plazamientos diarios una información por medio de este tipo equipamiento. Basados en tecnología de *leds*, cuerpo emisor unitario y versátil de luz cromatizada, las características de los PMV han evolucionado notablemente, desde una estructura configurada con píxeles bicolor o multicolor hasta un control unitario de *led* monocolor, en función de las necesidades de prestaciones físicas y funcionales requeridas. A ello ha contribuido la DGT mediante la elaboración, redacción y elaboración de la normativa de definición nacional y con una activa participación a nivel europeo en la norma EN 12966, que, a partir de su aprobación en febrero de 2005, es el elemento base para la definición de las prestaciones del nuevo PMV. Las primeras tres unidades de este tipo de panel fueron instaladas a finales de 2005, en A Coruña; en la ronda de Murcia con motivo del desarrollo del II Congreso Nacional de Seguridad Vial, y en Málaga, coincidiendo con el V Congreso Nacional y I Iberoamericano de Sistemas Inteligentes de Transporte. Hay que resaltar que los PMV últimos instalados en España contienen singulares aspectos diferenciadores, entre los que cabe citar el concepto de integración, la posibilidad de prolongar la escritura alfanumérica en la zona gráfica, la autonomía del PMV ante fallos de la acometida eléctrica durante 1 hora a máxima carga y el control de las horas de funcionamiento de las placas visualizadas como medida del uso y envejecimiento del panel. En el año 2006, serán instaladas otras 110 unidades de PMV similares y desarrollados bajo la Norma Europea EN12966, en emplazamientos tales como los accesos a Palma de Mallorca, tramo de la A-62 Salamanca-Tordesillas, Auto-

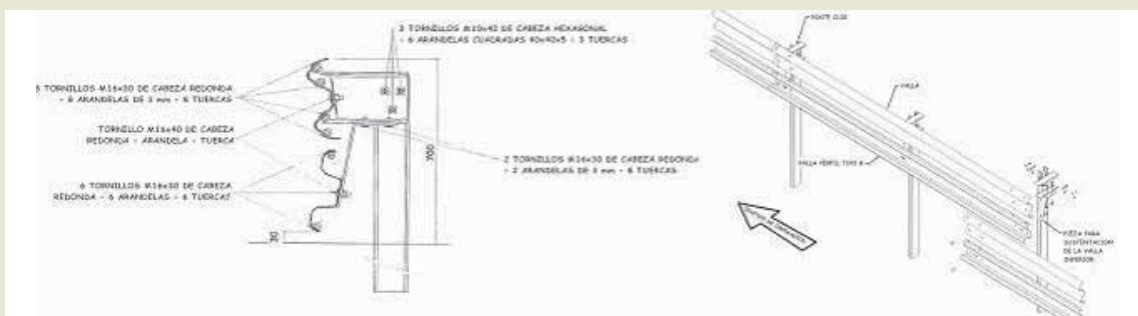


Figura 6. Detalle de valla de protección para motociclistas.

vía de Cantabria y accesos de Málaga y Murcia, configurándose así como una de las mayores redes actualmente en Europa de este tipo de paneles.

1.5. Estaciones meteorológicas

El primer proyecto de instalación de estaciones meteorológicas para carreteras (SEVAC) empezó a ser desarrollado en España desde el año 1998. Desde entonces han sido instaladas un total de 113 estaciones, cubriendo las más importantes carreteras y autopistas de la zona centro de España (con un alcance de 1 estación cada 10-15 km). Dichas estaciones llevaban los sensores adecuados que ayuda a detectar los fenómenos atmosféricos más influyentes en la seguridad de la conducción, tales como: niebla, hielo en calzada, nieve, vientos fuertes y lluvias. Los buenos resultados obtenidos desde el principio del plan propiciaron la ampliación del programa a tres nuevas zonas a partir del año 2000: Galicia, donde la lluvia, la nieve y la niebla son los factores más importantes, los Accesos a los Pirineos (nieve, hielo y lluvia) y el Este español, Albacete, Alicante y Valencia, (con presencia de niebla, heladas y esporádicas, pero significativas nevadas). Actualmente, son más de 350 las SEVAC de carretera instaladas, que cubren más de 10 000 km. de vías de gran capacidad, en los que existe un riesgo significativo de climatología adversa. Complementando a las SEVAC, también se instalan en el pavimento detectores de espiras que captan los datos del tráfico, tales como intensidad, velocidad, porcentaje de pesados, etc., que permiten transmitir en tiempo real mensajes del tipo: "NIEBLA DENSA EN XX KM, NIEVE DESDE PK XX A PK YY", con la antelación suficiente para que los conductores puedan tomar las decisiones más acertadas. Además de dichas estaciones meteorológicas, orientadas fundamentalmente a la información al usuario, existe otra red constituida por 97 estaciones fijas y 19 estaciones móviles, que se utilizan



Figura 7. Estación meteorológica para gestión de vialidad invernal colocada en Lorca.

para la gestión de las operaciones de vialidad invernal, y que, además de la información atmosférica, captan por medio de una sonda en calzada otros datos necesarios para el mantenimiento de la vialidad, tales como temperatura del asfalto, grado de salinidad, temperatura estimada de congelación, punto de rocío, etc. Los datos son remitidos vía GPRS, en tiempo real a los Centros de conservación integral de carreteras, en los cuales, tras consultar a los Jefes de Servicio de Conservación de la Dirección General de Carreteras, se ponen en marcha los tratamientos preventivos o curativos de extensión de fundentes, a partir del momento en que la temperatura ambiente desciende por debajo de los 2 °C, y la humedad ambiente supera el 75%.

Gracias a ello, se está consiguiendo que las actuaciones sobre la calzada se anticipen al momento en que ésta se encuentre en malas condiciones de vialidad, y, sobre todo, se consigue evitar la aparición de placas de hielo en la Red de Carreteras del Estado, que tan negativos efectos pueden tener sobre la seguridad vial.

2. Sistemas de ventilación y de extinción de incendios en túneles

La seguridad en los túneles viene

muy determinada por los sistemas de ventilación y de extinción de incendios. Se exponen dos casos muy diferentes, pero que se consideran de interés en el campo de la explotación de túneles. El primero se trata de un sistema de túneles urbanos de longitud considerable, y con una altísima intensidad de tráfico. El segundo caso se trata de una adaptación exitosa de un túnel existente para que cumpla con los nuevos requerimientos en materia de seguridad.

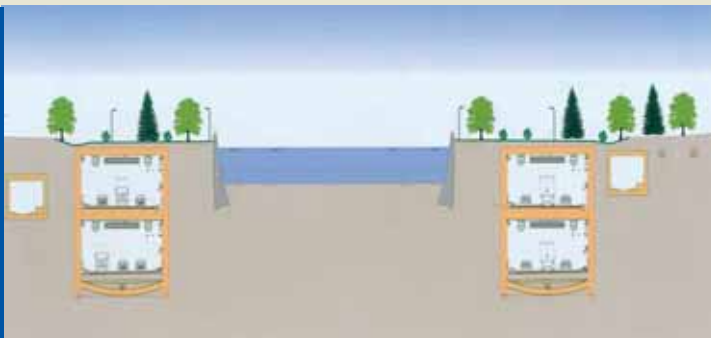
2.1. Túneles urbanos de Madrid Calle 30.

"Madrid Calle 30" es un gran proyecto, que contempla la transformación la antigua autovía de circunvalación M-30 en una autopista urbana, que discurrirá en gran parte de su trazado por debajo de la superficie, eliminando la barrera existente entre el centro de Madrid y los demás distritos que forman la ciudad. El diseño de esta autopista urbana permitirá mejorar la funcionalidad del viario, disminuyendo los tiempos de recorrido y generando nuevos espacios verdes, entre los que destaca la recuperación del Río Manzanares que actualmente es poco accesible para los madrileños.

La solución elegida para cumplir esos objetivos contempla el soterramiento de algunos tramos de la au-



Figura 8.
Recuperación
del río
Manzanares.



topista, y la construcción de varios kilómetros de túneles de nuevo trazado. La longitud total de tramos en túnel, incluyendo enlaces, llegará a alcanzar los 50 km, y el recorrido continuo más largo bajo tierra será de 11,5 km. La mayoría de las obras se realizan mediante pantallas, aunque dos nuevos túneles paralelos de 3,8 km se construirán mediante sendas tuneladoras de casi 16 m de diámetro. La Intensidad Media Diaria prevista en la nueva autopista urbana Calle 30 alcanza los 300 000 vehículos/día, y en los tramos de túnel se espera superar los 100 000 vehículos al día. Por los responsables de la gestión de los túneles se considera fundamental conseguir la disminución de incidencias y que, cuando éstas se produzcan, se pueda actuar de la forma más eficaz posible, dando prioridad a la seguridad; pero evitando, en la medida de lo posible, la congestión de la vía. Ha sido necesario realizar un estudio exhaustivo de los sistemas de seguridad y mejorar considerablemente los parámetros de diseño que habitualmente se utilizan.

2.2. Algunos datos

Las necesidades de energía para abastecer al conjunto de túneles son de 60 megavatios, suministrados por 5 subestaciones eléctricas, y se ha diseñado un anillo redundante de media tensión de 15 kilovoltios. Además, se han proyectado múltiples subsistemas, para garantizar la seguridad en los túneles, que se telecontrolarán desde un centro de control de túneles, que cuenta con un segundo centro de respaldo adicional preparado para tomar el control en caso de caída del principal. Estos dos centros de control estarán físicamente conectados

con los centros de movilidad y de policía municipal del Ayuntamiento de Madrid y con bomberos y Samur (Servicios Médicos de Emergencia), así como con el centro de gestión de la Dirección General de Tráfico.

Por su influencia en la seguridad en caso de incendio, cabe destacar los siguientes subsistemas:

- El sistema de ventilación
- El sistema de filtrado de aire
- La extinción de incendios mediante agua nebulizada (*water mist*) a alta presión.

2.3. Sistema de ventilación

El trazado de los túneles, en los que aparecen múltiples enlaces, hace que el sistema de ventilación proyectado sea transversal en los túneles del *By pass Sur*, y que en la zona del río sea longitudinal, basado en pozos y aceleradores con refuerzo para el caso de incendio, con extracciones uniformemente repartidas. De esta forma, en caso de incendio, el comportamiento aerodinámico de los túneles es homogéneo.

En el diseño han colaborado la Universidad y las mejores empresas fabricantes de ventiladores, control y filtrado, creando para cada túnel unos sistemas característicos seguros, robustos y fiables.

Los ventiladores empleados son:

- 155 ventiladores axiales, que conforman el núcleo básico del sistema de ventilación. Y pueden funcionar en impulsión y/o extracción con una potencia total de 43,340 MW
- 451 ventiladores longitudinales o de chorro, que se colocarán distribuidos a lo largo de ciertos segmentos del túnel, para establecer el movimiento longitudinal del aire en el

interior, con una potencia total de 11,747 MW.

- 258 ventiladores de extracción masiva puntual a lo largo del túnel, con una potencia total que ronda los 5 MW.

2.4. Sistema de filtrado de aire

Con el fin de reducir la contaminación producida por la extracción de aire en túnel se instalarán un total de 30 estaciones de filtrado de partículas por precipitación electrostática y 4 estaciones de filtrado de NO_2 .

Gracias a las estaciones de filtrado se consiguen unos niveles de calidad adecuada de aire y se eliminan los contaminantes nocivos sin expulsarlos al exterior ni afectar al medio ambiente, ya que el mismo aire que se toma del túnel se vuelve a recircular una vez filtrado y limpio.

2.5. Extinción de incendios mediante agua nebulizada (*water mist*)

El agua nebulizada, como sistema de protección activa, está conformándose como una de las tecnologías de mayor desarrollo y utilidad en el campo de la protección en túneles, gracias a su capacidad de control térmico en la zona de fuego y de reducir la propagación del fuego. La eficacia extintora del agua nebulizada se basa en la alta pulverización del agua que utiliza, lo que optimiza los efectos de enfriamiento, la atenuación del calor radiante y el desplazamiento del oxígeno en la base del fuego. La alta velocidad de las gotas compensa su pequeña masa a la hora de evaluar su cantidad de movimiento, parámetro que caracteriza la capacidad de pe-

netración de la gota en el penacho de gases calientes que producen las llamas, y garantiza que el agua no será desplazada del entorno del fuego. Las partículas crean, en suspensión en el entorno del fuego, una niebla húmeda y densa que lo envuelve impidiendo primero su expansión, reduciendo el tamaño de la llama, y apagándolo luego. El oscurecimiento que origina la niebla en el entorno del fuego atenúa a su vez la cantidad de calor radiado.

De esta manera, el agua nebulizada basa su principio de extinción y control del fuego en tres acciones diferentes:

- Enfriamiento por absorción del calor al vaporizarse el agua.
- Desplazamiento del oxígeno en el foco del fuego por la vaporización.
- Atenuación de la transmisión de calor por radiación.

El sistema de agua nebulizada se compone de un equipo centralizado de presurización y bombeo, que alimenta las boquillas nebulizadoras de agua a alta presión a través de una red de tuberías. En colaboración con el Departamento de extinción de incendios del Cuerpo de bomberos de Madrid, el CEMIM y empresas fabricantes, se han realizado pruebas reales en el túnel de ensayo de San Pedro de Ares para el estudio de la estrategia de empleo del sistema de agua nebulizada, que corroboran la eficacia del sistema, aunque queda por determinar el momento óptimo de disparo de las boquillas nebulizadoras.

2.6. Túnel de Monrepós

Se trata del acondicionamiento de un túnel de 1500 metros de longitud y tráfico bidireccional no urbano en una carretera de gran importancia, que comunica una zona del noreste de España con Francia, y es un paso obligado para el tráfico transfronterizo que circula también a través de otro túnel situado en la misma ruta, el de Somport.

Debido a la enorme dificultad para la construcción de galerías de escape al exterior, se ha optado por implantar una serie de medidas compensatorias de reducción de riesgos

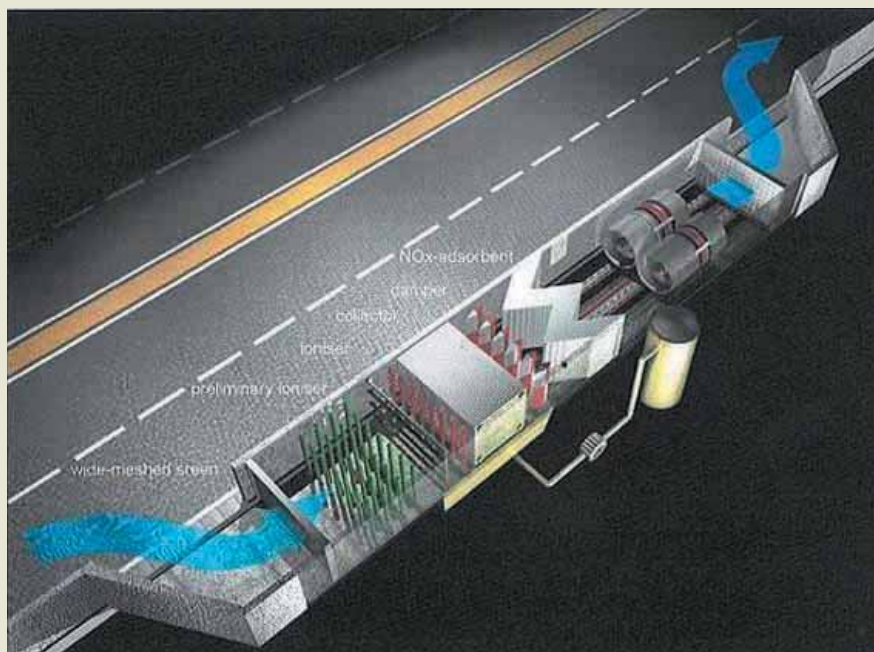


Figura 9. Sistema de filtrado.

que mejoren su seguridad. En dichas actuaciones se han tenido en cuenta los planes futuros de duplicación de la vía actual, que implicará la conversión de los túneles actuales en unidireccionales, para los cuales el sistema de ventilación idóneo sería del tipo longitudinal.

Así, entre las actuaciones llevadas a cabo, dentro de la primera fase de mejoras previstas en este túnel, merece la pena destacar el refuerzo del sistema de ventilación y la implantación de un sistema para el control automático de la ventilación en caso de incendio.

Así, se ha aumentado la capacidad del sistema de ventilación longitudinal previamente existente, mediante la instalación de equipos de mayores prestaciones. El objetivo ha sido, por un lado, conseguir en los escenarios de incendio una velocidad suficiente para expulsar los humos por una de las bocas sin que retrocedan; y, por otro lado, permitir el control de la corriente longitudinal, cuestión crítica para la seguridad en las primeras fases del incendio.

En este sentido, el sistema de control contribuye a conseguir unas condiciones de seguridad razonables, tanto en servicio normal, como en caso de incendio. Ello se consigue por dos métodos:

■ Actuaciones automáticas directamente sobre la ventilación.

■ Ayuda a la toma de decisiones al personal de explotación del túnel, proponiéndole actuaciones para su gestión que permitan la reducción del tiempo final de reacción.

La filosofía general de actuación en ambos casos es la misma: mantener las mejores condiciones de evacuación posibles mediante la conservación de las condiciones de estratificación a partir del control de la corriente longitudinal.

El sistema de ventilación instalado es de tipo longitudinal con 24 aceleradores de chorro reversibles, suficientes para cubrir la demanda de caudal de aire, tanto en situación normal de servicio como de incendio.

El caudal de ventilación de funcionamiento en servicio es el mínimo caudal de aire que garantiza, para cada escenario, tanto la dilución de contaminantes hasta límites admisibles como la capacidad de respuesta del sistema de ventilación ante una demanda rápida de caudal en cada situación de servicio.

Para la regulación de la ventilación se han instalado anemómetros y sistemas de detección de contaminantes (sensores de CO y opacímetros)

Para el dimensionamiento en situación de incendio, se ha tenido en



Figura 10. Descarga de agua nebulizada. Ejemplos de boquillas.

cuenta que el sistema de ventilación debe tener la capacidad suficiente para lograr el arrastre de la nube de humos hasta cualquiera de las bocas del túnel, independientemente de que en los primeros instantes de desarrollo del mismo las estrategias de ventilación estén dirigidas a reducir la velocidad del aire, para conseguir la evacuación de los usuarios en las mayores condiciones de seguridad. Así, la velocidad crítica considerada para el dimensionamiento del sistema ha resultado ser algo inferior a los 3 m/s.

Las estrategias de ventilación en este caso están basadas en el control de la corriente longitudinal, y así permitir el control de los humos.

El sistema de ventilación busca los siguientes objetivos:

- Situación de servicio:
 - Confort del usuario (niveles de CO y opacidad).
- Situación de incendio:
 - Control de nube de humos
 - Evitar la extensión del incendio
 - Apoyar el salvamento.

En el caso de los túneles de Monrepós, se dispone de un centro de control con presencia humana las 24 h. En caso de incendio el sistema está preparado para operar manual o automáticamente según la fase de que se trate:

Fase 1: Evacuación de usuarios

El objetivo fundamental es dar tiempo de escape a los usuarios. Para ello es necesario mantener la estratificación de la nube de humos,



Figura 11. Vista de la boquilla de entrada.

manteniendo una velocidad del aire reducida, pero en cualquier caso inferior a 2 m/s.

El control de la corriente longitudinal se realiza teniendo en cuenta las medidas de velocidad del aire en el interior del túnel mediante el encendido o apagado de los aceleradores (siempre evitando el encendido cerca del foco).

Fase 2: Expulsión de humos

Una vez seguros de que se ha producido la total evacuación de las personas, se procederá manualmente a la puesta en marcha de todos los ventiladores.

Para gestionar la forma en que se desarrolla la ventilación, se han desarrollado algoritmos que la controlan según las necesidades.

Así, dentro de la fase de incendio se distinguen las siguientes subfases:

- Pre-alerta: Disparo de las alarmas del sistema de detección lineal o de los sensores de contaminantes.
- Actuación: Secuencia de actuaciones programadas: Cierre, refuerzo de iluminación y control de ventilación.
- Ajuste: Compensación de los desequilibrios que se produzcan.
- Expulsión: Una vez evacuado el personal, se actuará manualmente sobre todos los ventiladores.

Este sistema proporciona unas condiciones razonables de seguridad. Aunque algunas actuaciones sean au-

tomáticas, otras dependen del personal de explotación, como la localización del foco; pues algunas decisiones, como la expulsión de los humos en uno de los sentidos, de las que pueden depender vidas humanas, no se deben tomar automáticamente. Lo que sí hace el sistema es facilitar la toma de decisiones, proponiendo actuaciones, consiguiendo así una disminución considerable del tiempo de reacción.

De esta forma, se ha conseguido adaptar un túnel existente a las nuevas exigencias de seguridad en túneles. ■

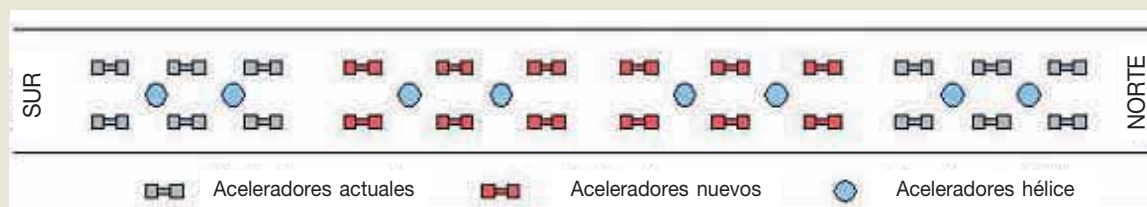


Figura 12. Adaptación del sistema de ventilación.