

Pavimentos de hormigón en túneles

Su influencia en la seguridad
frente al fuego

*Carlos Jofré
Joaquín Romero
Rafael Rueda*

Pavimentos de hormigón en túneles

Su influencia en la seguridad
frente al fuego

Carlos Jofré

Joaquín Romero

Rafael Rueda



Editado por:

Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)
José Abascal, 53
28003 MADRID

Diseño y maquetación:

Vaquero Servicios de Publicaciones, S.L.

Depósito Legal:

I.S.B.N.:

Índice

Prólogo

1 Introducción	3
2 Disposiciones en materia de seguridad en túneles	5
3 Curvas de fuego en túneles	7
4 Comportamiento del hormigón frente al fuego	9
5 Comportamiento de las mezclas bituminosas frente al fuego	15
6 Otras ventajas del empleo de pavimentos de hormigón en túneles	25
7 Construcción de pavimentos de hormigón en túneles	29
8 Conclusiones	37
Bibliografía consultada	41



Prólogo

A raíz de los incendios acontecidos en los últimos años en túneles europeos, se ha demostrado la necesidad de adoptar una serie de medidas al objeto de reducir en lo posible los riesgos y los daños tanto a las personas como a la infraestructura. Ello se ha materializado en España en el Real Decreto 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado, incluidos los de la red transeuropea.

Entre las disposiciones de dicho Real Decreto se encuentra la obligatoriedad de utilizar pavimento de hormigón en los túneles de más de 1.000 metros de longitud. El empleo de otras soluciones solamente puede adoptarse por razones debidamente justificadas y siempre y cuando éstas presenten una protección equivalente o mayor a la ofrecida por los pavimentos de hormigón, lo que debe demostrarse mediante un análisis de riesgo.

Para aportar información sobre estos temas, en la presente publicación se examinan algunos trabajos e investigaciones sobre el comportamiento de los pavimentos de hormigón y de mezcla bituminosa frente a los incendios, especialmente en túneles, incidiendo en especial en las cargas de fuego aplicadas, los métodos de ensayo empleados y las conclusiones a las que se llega en cada uno de ellos.

Tanto de dichos estudios como del análisis de una serie de casos reales se deduce que los pavimentos de hormigón son los que proporcionan al usuario un mayor nivel de seguridad en caso de incendio, sobre todo en lo referente a la emisión de gases tóxicos, generación de humo, aumento de la carga de fuego y mantenimiento de su integridad y capacidad de soporte.

Se destacan también otras contribuciones de los pavimentos de hormigón a la seguridad de los usuarios, como son su gran luminosidad, la facilidad con la que pueden obtenerse unas adecuadas características antideslizantes o las mínimas necesidades de conservación, lo que evita tener que realizar desvíos bajo tráfico.

Asimismo se dan algunas indicaciones sobre la ejecución de pavimentos de hormigón en túneles. En general son aplicables todos los métodos utilizados en carreteras al aire libre, con los lógicos condicionantes que, al igual que con cualquier otro tipo de firme, imponen las limitaciones de espacio disponible. Por ello las dificultades de construcción no deberían ser un pretexto para plantear otras soluciones.

El Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) confía en que esta publicación sea de utilidad para todas las personas interesadas en las técnicas de túneles, y en particular para los responsables de su proyecto.

Juan Carlos López Agüí
Director general de IECA



1

Introducción

La longitud total de túneles utilizados para el transporte de personas y mercancías en toda Europa supera los 15.000 km, por lo que se deduce claramente su importante papel, incluso vital en algunos casos, en el conjunto de las infraestructuras de transporte.

Los túneles de carretera son elementos que por sus singulares características dentro de la red viaria merecen una atención especial, no porque en ellos se produzcan más accidentes que en otros puntos del trazado de las carreteras, sino porque cualquier incidencia grave que les afecte puede provocar alarma social, dadas las circunstancias concurrentes y específicas del lugar en que se produce, las dificultades de rescate o evacuación, el dramatismo provocado por el confinamiento o el trastorno que para el sistema de transportes puede suponer el cierre temporal de un tramo viario, en ocasiones con alternativas difíciles o inexistentes.

Los últimos incendios ocurridos en túneles europeos (Fig. 1) han demostrado la necesidad de adoptar una serie de medidas al objeto de minimizar los riesgos y los daños tanto a las personas como a la infraestructura, tal y como se muestra en la Tabla 1 [1], [2].

Algunas investigaciones realizadas sobre el comportamiento humano bajo condiciones de incendio reflejan que la mayoría de las



Fig. 1 - Incendios en los túneles de Mont-Blanc (arriba) y San Gotardo (abajo)

personas son conscientes de su entorno y de su situación en un principio, pero ésta se agrava a los pocos minutos debido a la pérdida de visibilidad por el humo existente (éste desciende desde la clave del túnel a medida que se enfría) que produce irritabilidad en los ojos, dificultando la visión, así como al estrés



térmico producido por el calor irradiado por los elementos que producen y aumentan la carga de fuego.

En estas circunstancias, que evolucionan en pocos minutos, los usuarios del túnel solamente reaccionan frente a señales muy fuertes (luminosas y sonoras, estas últimas con la dificultad de que sean entendidas por conductores extranjeros, especialmente en zonas turísticas o cercanas a fronteras), teniendo que tomar decisiones en un plazo muy breve de tiempo [3]. Resulta por tanto imprescindible adoptar todas las medidas que puedan contribuir a

que no se empeore la situación de los ocupantes de los vehículos ni de los servicios de emergencias. Una de ellas es la elección de un firme que sea incombustible, de forma que al ser sometido a las temperaturas que se desarrollan en un incendio, no incremente la carga de fuego ni produzca humos o vapores tóxicos. Como se justificará en los apartados siguientes, entre los materiales habitualmente utilizados en las capas superiores de los firmes el hormigón es el único que cumple con estos requisitos.

Tabla 1 - Relación de algunos incendios recientes en túneles europeos

Lugar del accidente	Tipo de túnel	Año	Duración Temperatura	Daños personales	Vehículos implicados
Fréjus Francia-Italia	Carretera (1 tubo) 12,9 km	2005	6 horas 1.200 °C	2 muertos	9 vehículos
San Gotardo ⁽¹⁾ Suiza	Carretera (1 tubo) 16,3 km	2001	24 horas 1.200 °C	11 muertos 35 intoxicados	10 coches 13 camiones
Gleinalm Austria	Carretera (1 tubo) 8,3 km	2001	37 minutos -	5 muertos	2 coches
Tauern ⁽²⁾ Austria	Carretera (1 tubo) 6,4 km	1999	14 horas 1.200 °C	12 muertos	24 coches 16 camiones
Mont-Blanc ⁽³⁾ Francia-Italia	Carretera (1 tubo) 11,6 km	1999	53 horas 1.000 °C	39 muertos	32 coches 2 camiones
Palermo Italia	Carretera	1999	-	5 muertos	19 coches 1 autocar

(1) El incendio se produjo como consecuencia de un choque frontal entre dos camiones, lo que dió lugar a que murieran 11 personas por los efectos del humo y el calor. El cierre del tunel fué de unos 2 meses.

(2) El incendio tuvo lugar mientras se realizaban obras en su interior. Se estaba circulando de modo intermitente y en zonas de vehículos parados se produjo un alcance.

(3) El incendio fue provocado por sobrecalentamiento y posterior incendio de un camión que transportaba margarina. El túnel estuvo cerrado durante 3 años.

2

Disposiciones en materia de seguridad en túneles

A raíz de los hechos acontecidos en los últimos años, se han prescrito unos requisitos mínimos de seguridad en los túneles, mediante la aprobación de la directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004 para túneles de la red transeuropea de carreteras [4].

En dicha directiva se indica que la seguridad de los túneles¹ requiere una serie de medidas relacionadas, entre otros aspectos, con su geometría y diseño, los equipamientos de seguridad, incluida la señalización vial, la gestión del tráfico, la formación de los miembros de los servicios de emergencia, la gestión de incidentes, la información dirigida a los usuarios sobre la mejor manera de actuar en un túnel, así como una mejor comunicación entre las autoridades responsables y los servicios de emergencia, tales como la policía, los bomberos y los equipos de rescate (Fig. 2).

Como transposición al ordenamiento jurídico español de la citada norma europea, así como por la propia decisión de mejorar las condiciones de seguridad en la red viaria y más en particular en los túneles, se determinó la conveniencia de regular, mediante la aprobación del Real Decreto 635/2006 de 26 de mayo [5], las condiciones de diseño y explotación de los túneles de las carreteras del Estado, que englo-

⁽¹⁾ De longitud superior a 500 metros

MINISTERIO DE FOMENTO

9296 REAL DECRETO 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.

El desarrollo de las infraestructuras de transporte experimentado por nuestro país en los últimos años, motivado y acompañado a su vez por el incesante crecimiento de la demanda, no puede verse limitado solamente al incremento en la extensión de la red de carreteras, sino que también ha de fomentar la mejora de sus características de diseño y construcción que permita una explotación más eficiente de aquéllas.

La seguridad constituye uno de los objetivos más importantes hacia los que debe enfocarse prioritariamente la acción de gobierno en materia de infraestructuras y transportes, siempre en estrecha colaboración con las iniciativas de todos los agentes sociales implicados. La negativa repercusión que los accidentes tienen en la vida social constituye una grave preocupación por sus consecuencias humanas, sociales y económicas, que es preciso reducir utilizando todos los medios posibles, uno de los cuales es precisamente la mejora de

ban no solo a los túneles incluidos en la red transeuropea sino a todos los de la red estatal, al objeto de establecer los requisitos mínimos de seguridad.

En dicho Decreto se ha tenido en cuenta un hecho evidente: es preciso asegurar que todos los materiales que se empleen en la construcción de un túnel presenten el máximo nivel de seguridad en caso de incendio. En este sentido, una parte importante de la sección transversal de un túnel de carretera está ocupada por el firme de la calzada. Los dos materiales que pueden utilizarse en las capas superiores de la misma son el hormigón y las mezclas bituminosas. Sin embargo, mientras que el primero es incombustible, la presencia en las segundas de un derivado del petróleo, como es el betún, hace que puedan experimentar importantes degradaciones en caso de incendio, aumentando la carga de fuego,

Fig. 2 - Ámbitos de actuación para la mejora de la seguridad en túneles



emitiendo vapores tóxicos y perdiendo su integridad estructural hasta transformarse en un conjunto de partículas sueltas.

Por ello, entre las medidas de seguridad adoptadas en dicho Decreto se establece en el apartado 2.3.1 del Anexo I del mismo lo siguiente:

“Salvo razones debidamente justificadas, en túneles de más de 1.000 metros se empleará pavimento de hormigón ”

Por otra parte, en el artículo 4 se indica que:

“En los casos en que determinados requisitos estructurales de los establecidos en el anexo I sólo puedan satisfacerse recurriendo a soluciones técnicas de imposible ejecución en la práctica o que tengan un coste desproporcionado, la autoridad administrativa a que se refiere el artículo 5 podrá aceptar que se apliquen como alternativas otras medidas de reducción del riesgo, siempre y cuando estas medidas den lugar a una protección equivalente o mayor. La eficiencia de dichas medidas deberá demostrarse mediante un análisis de riesgo, de acuerdo con lo dispuesto en el capítulo IV”

En relación con el pavimento de hormigón como medida de seguridad y su posible sustitución por otra solución, como por ejemplo mediante el empleo de mezclas bituminosas, el propio Real Decreto indica que cualquier modificación con respecto a las prescripciones contenidas en el mismo solo será posible si la solución técnica es de imposible ejecución (no difícil o incómoda para el contratista por

el hecho de coexistir dos tipos de firme: uno para los túneles y otro a cielo abierto) o que tenga un coste desproporcionado (lo que no debe confundirse con sobrecoste). Ello no es el caso con los pavimentos de hormigón, ya que, como se detalla más adelante, en su construcción puede recurrirse a todos los métodos utilizados en carreteras al aire libre; y por otra parte su vida útil es igual o superior a 30 años, con unas operaciones mínimas de conservación, por lo que su coste total es del mismo orden o incluso inferior que el de las alternativas con mezcla bituminosa.

Asimismo, en el supuesto de que no se den las condiciones establecidas para justificar el cambio de pavimento (imposibilidad técnica de ejecución y coste desproporcionado), se aceptarán otras medidas siempre que den una protección equivalente o mayor a la que sustituyen.

Con objeto de poder comparar el comportamiento de las mezclas bituminosas y del hormigón frente al fuego, y con ello la mayor o menor seguridad que aportan al túnel en caso de incendio, en los apartados siguientes se resumen los resultados de varios ensayos e investigaciones llevadas a cabo sobre este tema.

Dicho comportamiento debe evaluarse, al igual que ocurre con cualquier equipo de un túnel, sometiendo a los materiales del firme a las condiciones que es razonable esperar que se alcancen durante un incendio. Por ello, puede ser de utilidad dar algunas informaciones sobre las denominadas curvas de fuego, es decir, las curvas de variación de la temperatura con el tiempo que han sido definidas en distintas reglamentaciones.

3

Curvas de fuego en túneles



En los últimos años se han llevado a cabo distintos trabajos de investigación a nivel internacional con el propósito de modelizar la evolución de la temperatura durante un incendio, tanto en edificios como en túneles.

Como consecuencia de los numerosos resultados obtenidos, se han desarrollado diferentes curvas tiempo/temperatura en función de la tipología de exposición analizada [6], tal y como se muestra en la Fig. 3.

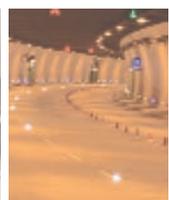
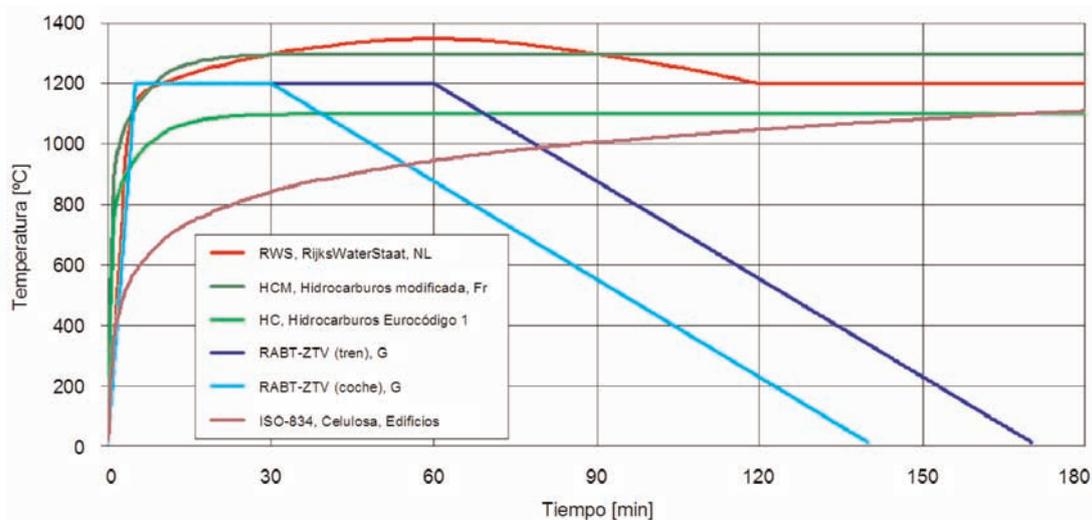
La curva ISO 834 es la que se ha designado como de incendio normalizado en numerosos países, y refleja la evolución de la temperatura en la ignición de los materiales de construcción empleados normalmente en edificación.

La curva HC corresponde a la combustión de hidrocarburos en pequeñas cantidades, como por ejemplo en el caso de incendio de depósitos de combustible de turismos o camiones cisterna que transporten combustibles o incluso ciertos productos químicos.

La curva HCM es una modificación de la curva de incendio de hidrocarburos HC, adoptada por la reglamentación francesa, en la que se alcanza una temperatura máxima de 1.300 °C en lugar de los 1.100 °C de la curva HC.

La curva RABT-ZTV se obtuvo en Alemania como resultado de una serie de ensayos realizados dentro del proyecto europeo FIRETUN (Fires in Transport Tunnels). Su gradiente de temperatura en los primeros minutos se ase-

Fig. 3 - Curvas de fuego. Evolución de la temperatura según la tipología de incendio



meja a los establecidos en las curvas HC y HCM, siendo más conservador que el adoptado por la curva ISO 834.

La curva RWS ha sido desarrollada por el Ministerio de Transportes Holandés y contempla el peor de los escenarios posibles: el incendio de un camión cisterna con 50 m³ de combustible que suponen una carga de fuego de 300 MW durante 120 minutos. Dicha curva se obtuvo tras unos ensayos realizados en 1979 y se reconfirmó su validez como curva de diseño de resistencia al fuego para túneles de carre-

tera en las pruebas realizadas a escala real en el túnel de Runehamar, en Noruega².

La vigente legislación española en materia de seguridad en túneles establece que los sistemas de ventilación deberán poder extraer el humo para un incendio tipo con potencia mínima de 30 MW y un caudal mínimo de 120 m³/s, lo que equivale a suponer el incendio de un camión de mercancías, tal y como se muestra en la Tabla 2 [7].

Tabla 2 - Cargas de fuego en túneles

Tipo de vehículo	Potencia térmica MW	Máxima temperatura en paredes del túnel °C	Producción de humo m ³ /s
Turismo	2,5 - 5	400	20
2 - 3 turismos	8	-	30
Furgoneta	15	-	50
Autobús	20	800	60 - 90
Camión de mercancías	20 - 30	1.000	60 - 90
Camión cisterna	100 - 300	1.200 - 1.400	> 100

⁽²⁾ Dentro del proyecto de investigación UPTUN (Cost-effective, Sustainable and Innovative Upgrading for Fire Safety in Existing Tunnels), financiado por la Unión Europea, se realizaron en 2003 4 ensayos de incendio a escala real en el túnel de Runehamar (Noruega). Éste se encuentra situado en un tramo de carretera que había quedado fuera de servicio por un cambio de trazado debido a un desprendimiento de rocas a cierta distancia del túnel, que se consideró insalvable

4

Comportamiento del hormigón frente al fuego



4.1 Introducción

El hormigón es incombustible. Se ha dicho, con razón, que entre los materiales habituales utilizados en construcción, es el que mejor resiste el ataque del fuego [8]. Ejemplos como el incendio del edificio Windsor en Madrid lo han demostrado sobradamente [9]. No solamente resistió la estructura de hormigón del edificio, evitando así una catástrofe de magnitud mucho mayor que la ocurrida, sino que su demolición fue realmente difícil y costosa, lo que prueba que el hormigón de la estructura mantenía, después del incendio, una resistencia considerable.

Este buen comportamiento de las estructuras de hormigón frente al fuego ha quedado de manifiesto no solamente en edificios, sino también en otros tipos de obras, como son los túneles. La conclusión obtenida de numerosos casos reales es clara [8]: los túneles sostenidos o revestidos con hormigón (ya sea éste prefabricado, encofrado o proyectado) son seguros, estructuralmente, frente a los incendios. No se ha producido en ningún caso el colapso de la estructura del túnel, ni se tienen referencias de muertes relacionadas con daños en esta última.

Sin embargo, al verse sometido el hormigón a temperaturas elevadas, sus componentes pue-

den experimentar modificaciones importantes [10]: a partir de los 100 °C el agua libre o capilar incluida en la masa del mismo empieza a evaporarse, retardando de esta forma su calentamiento; entre 200 y 300 °C la pérdida de agua es completa, sin que se aprecien aún alteraciones en la estructura del cemento hidratado y sin que las resistencias disminuyan de forma apreciable; de 300 a 400 °C se produce una pérdida de agua del gel de cemento, teniendo lugar una disminución más importante de las resistencias y pudiendo aparecer las primeras fisuras en la superficie; a los 400 °C una parte del hidróxido cálcico procedente de la hidratación de los silicatos se transforma en cal viva; hacia los 600 °C los áridos comienzan a expandirse, dando lugar a tensiones internas que comienzan a disgregar el hormigón. El aumento de volumen es mayor en los áridos de tipo silíceo que en los calizos, cuyo coeficiente de dilatación térmica es como media un 35 % menor.

Aunque la variación de resistencia con la temperatura depende del tipo de hormigón, siendo menor en el caso de que los áridos sean calizos, puede considerarse que a partir de 500 °C la disminución empieza a ser importante. Por ello, en la Instrucción EHE-08 [11] se admite, para comprobar la capacidad resistente de una sección de hormigón que ha es-



tado sometida a un fuego, el considerar una sección reducida obtenida eliminando, a efectos de cálculo, las zonas que hayan alcanzado una temperatura superior a 500 °C.

Una observación a este respecto es que las temperaturas mencionadas en los párrafos anteriores han de ser las reales del hormigón, y no las del ambiente o las de las llamas. Por ello las consecuencias de un incendio desde el punto de vista de la conservación de la resistencia y de la integridad de un elemento de hormigón son mucho menos importantes.

Por otra parte, el hormigón es un material con una conductividad térmica baja, lo que hace que el incremento de temperatura a través del mismo sea relativamente lento y las zonas interiores no alcancen las mismas temperaturas elevadas de la superficie expuesta a las llamas. A unos pocos centímetros de profundidad las temperaturas alcanzadas no disminuyen prácticamente la resistencia del hormigón. Ésta es otra de las razones del excelente comportamiento de las estructuras de hormigón en los incendios.

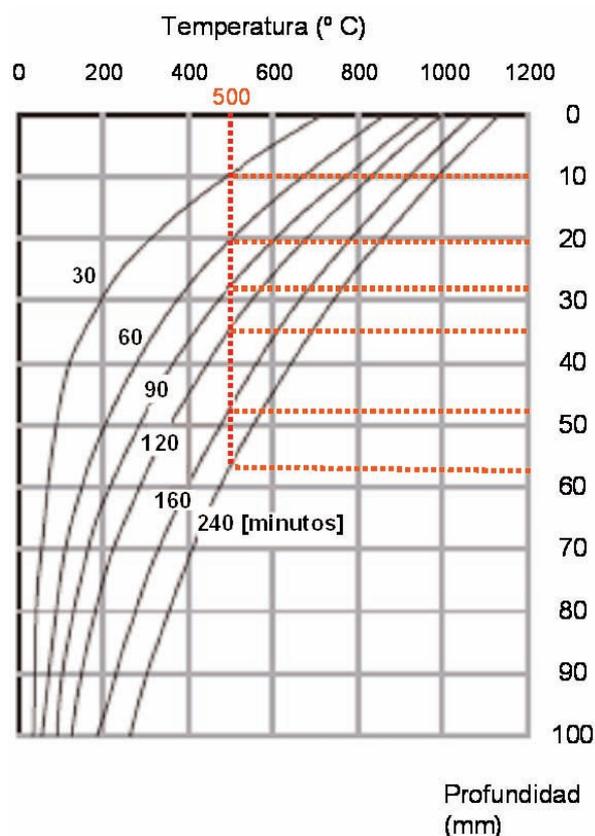
Hay que mencionar además que la progresión del incremento de temperaturas es menor en un pavimento que en un elemento estructural como una viga o un pilar, que pueden recibir calor por varias caras al mismo tiempo. Como puede verse en la Fig. 4, tomada de la Instrucción EHE-08, en una losa la temperatura a 2 cm de profundidad puede ser de 300 a 400 °C inferior a la de la superficie; y a 4 cm, de 500 a 600 °C menor. En el caso de que la temperatura de la superficie alcance un valor de 850 °C, únicamente los dos centímetros superiores estarían sometidos a temperaturas superiores a 500 °C. Conviene mencionar a este respecto que la propia Instrucción indica que

estas curvas son muy conservadoras. Por ello, en general los daños causados por el fuego afectan solamente a una capa superficial de poco espesor

4.2 El fenómeno del desconchado (spalling)

Aparte de la pérdida de resistencia del hormigón en si, otro problema que puede producirse en una estructura de hormigón durante un incendio es el desprendimiento de trozos de la superficie de la misma. Este fenómeno se conoce como desconchado, si bien está muy extendido el empleo de su denominación en inglés (spalling).

Fig. 4 - Curvas de variación de temperatura con la profundidad en una losa de hormigón durante un incendio (Instrucción EHE-08)



Se han desarrollado varias teorías para explicar la aparición del spalling [12]:

- Aumento de la presión interna tanto del vapor como del agua intersticial del hormigón a causa de la elevación de la temperatura. Las dilataciones que podrían producirse con ello, así como la eventual migración del vapor y del agua hacia el exterior, se ven tanto más coartadas cuanto más compacta sea la estructura del hormigón, lo cual está asociado en general a una elevada resistencia.
- Dilataciones térmicas impedidas, que dan lugar a compresiones que pueden alcanzar valores muy importantes.

No es de descartar que en muchos casos el spalling se haya producido por la acción combinada de ambas causas.

Los efectos del spalling son más visibles en el caso de hormigones de alta resistencia, pudiendo dar lugar incluso a desprendimientos explosivos. Distintos ensayos han demostrado el efecto beneficioso que puede tener en los mismos el empleo de fibras de polipropileno [28] que puedan fundirse con temperaturas de solamente 160 °C, proporcionando una vía de escape al vapor de agua, y reduciendo con ello los problemas de spalling. Otra posibilidad que se ha sugerido es la utilización de aireantes, pues éstos crean un conjunto de burbujas en la red de capilares que pueden actuar como cámaras de expansión [12]. En esta misma línea, en los hormigones que deben resistir a las heladas es una práctica usual incorporar aireantes para poder resistir las presiones internas provocadas por el aumento del volumen del agua al congelarse.

Otro factor que puede influir en el spalling es el diferente aumento de volumen de las armaduras con respecto al hormigón al calentarse. En los pavimentos éste no es un tema de importancia, pues o bien son de hormigón en masa o bien, en el caso de los pavimentos armados continuos, las armaduras se sitúan en el plano medio, con lo que se tiene un espesor de hormigón (normalmente entre 9 y 13 cm) suficiente para minimizar los cambios de temperatura y resistir las presiones provocadas por las armaduras al dilatarse. Por la misma razón, otro problema que puede presentarse como consecuencia de un incendio en una estructura de hormigón, como es la pérdida de adherencia entre este último y las armaduras, es muy improbable que se produzca en los pavimentos continuos de hormigón armado.

Por otra parte, al contrario que en las paredes o en los techos de los túneles, en los pavimentos de los mismos no hay efectos como los de la gravedad o los de presión del terreno circundante, que pueden favorecer que se desprendan fragmentos.

La influencia de la resistencia mecánica en el comportamiento de los hormigones frente al spalling se ha comprobado tanto en incendios reales como en ensayos de laboratorio. Han sido muy comentados los fenómenos de spalling en el túnel del enlace ferroviario del Canal de La Mancha, en el que se empleó un hormigón de alta resistencia (80 MPa). Por el contrario, tanto en el túnel del Mont-Blanc como en el de San Gotardo, construidos hacía ya muchos años en el momento de producirse los incendios y probablemente por ello con hormigones de menor calidad, la

aparición de desconchados fue mucho más reducida [8].

Otros casos reales han mostrado el buen comportamiento frente a los desconchados de los hormigones ordinarios, con resistencias a compresión del orden de 30 MPa.

A nivel de ensayos pueden mencionarse los realizados en Francia dentro del proyecto de investigación Feu – Béton (Fuego–Hormigón) [12]. De los resultados del mismo se concluye que los hormigones de resistencia de hasta 60 MPa sometidos a una curva de fuego del tipo ISO 834 no presentan un desconchado significativo.

A los hormigones de firmes se les exigen unas resistencias a flexotracción de 4,0 a 4,5 MPa, que en compresión suponen valores del orden de 25 a 30 MPa. A la vista de lo expuesto anteriormente, no parece que los desconchados como consecuencia de un incendio puedan suponer un problema importante en un pavimento de hormigón de un túnel.

Los autores de este trabajo han realizado asimismo ensayos de resistencia al fuego de hormigones de pavimentos utilizando un horno del tipo de los empleados para la determinación del contenido de ligante de las mezclas bituminosas por ignición de las mismas. Las probetas eran de 30 x 5 x 5 cm y antes de ser ensayadas se conservaron en cámara de curado durante varias semanas para saturarlas. Sometidas a temperaturas entre 350 y 450 °C durante 40 minutos³, no se observó ningún desconchado, aunque sí una pérdida de ma-

sa debida a la evaporación del agua absorbida (Fig. 5).

Como conclusión, puede afirmarse que los desconchados en un pavimento de hormigón como consecuencia de un incendio, en caso de producirse, tienen en general una importancia bastante menor que los de otras partes del túnel como puede ser el revestimiento o un falso techo.

El hormigón no afectado por temperaturas elevadas o por el spalling conserva prácticamente toda su resistencia, formando un sustrato sano. Por ello, la reparación de los desperfectos puede llevarse a cabo mediante bacheos a espesor parcial o, en caso necesario, con un refuerzo delgado adherido, previo fresado de algunos centímetros del pavimento.

Una demostración práctica del buen comportamiento de los pavimentos de hormigón frente al fuego es el túnel experimental del

Fig. 5 - Probeta de hormigón para firmes, conservada en cámara de curado y sometida después a un calentamiento a 450 °C en horno

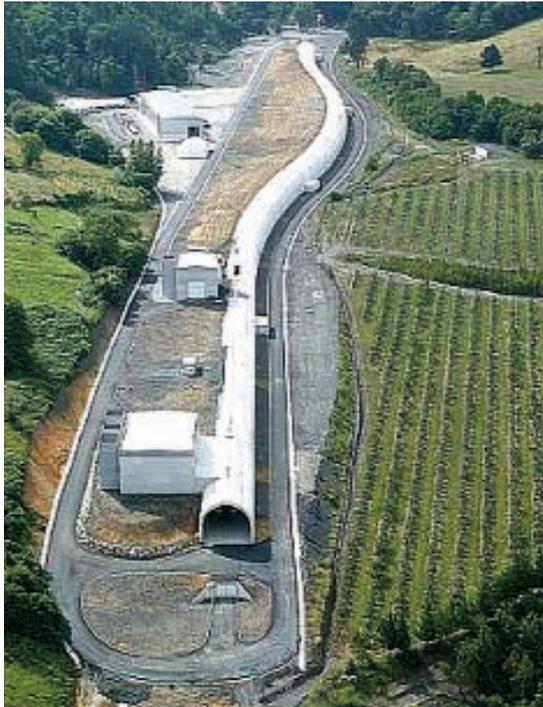


⁽³⁾ Los desconchados, en caso de producirse, suelen aparecer durante los primeros 30 minutos después de iniciado el fuego

Centro de Ensayos de Fuegos y Ventilación en Túneles de San Pedro de Anes (Asturias) , considerado como una de las mejores instalaciones a nivel mundial en estos temas. Desde su inauguración en junio de 2005, se han realiza-

do en su interior numerosas pruebas, entre ellas incendios controlados de vehículos, sobre su pavimento de hormigón, sin que éste haya sufrido ningún deterioro de importancia (Fig. 6).

Fig. 6 - Túnel experimental del Centro de Ensayos de Fuegos y Ventilación en Túneles de San Pedro de Anes (Asturias)



5

Comportamiento de las mezclas bituminosas frente al fuego

Como ya se ha mencionado, la presencia en las mezclas bituminosas de un derivado del petróleo, como es el betún, hace que puedan arder y experimentar con ello importantes degradaciones en el caso de un incendio.

Se resumen a continuación los resultados de varios ensayos y observaciones de casos reales que soportan este hecho.

5.1 Determinación del contenido de ligante de una mezcla bituminosa por ignición

Desde hace muchos años se ha aprovechado la combustibilidad de las mezclas bituminosas para determinar su contenido en ligante. Ya en 1970 el Transportation Research Board de Estados Unidos desarrolló un método para aplicación en obra utilizando un quemador de butano [13]. Posteriormente, el Centro Nacional de Tecnología del Asfalto (NCAT), también de Estados Unidos, puso a punto en 1994 un ensayo de ignición en horno, como alternativa al método más tradicional de extracción del ligante utilizando disolventes. Debido a la combustión completa del betún, el método se puede utilizar también para evaluar la composición de la mezcla, ya que con los áridos que quedan es posible determinar su granulometría y proporción en peso, a condición de que a la temperatura alcanzada no se produzca una disgregación excesiva de las partículas [14].



Dicho método de determinación del contenido de ligante por ignición ha sido recogido en la norma ASTM D6307 [15] y posteriormente en la norma UNE-EN 12697-39 [16].

Dependiendo del tipo de mezcla bituminosa, el ensayo suele durar unos cuarenta minutos desde el inicio del calentamiento, alcanzándose normalmente en el horno temperaturas entre 400 y 550 °C.

Este ensayo confirma que las mezclas bituminosas arden a unas temperaturas muy por debajo de las máximas establecidas en las curvas de fuego normalizadas para incendios en túneles.

En general la determinación del contenido de ligante se realiza sobre muestras sin compactar. No obstante, para tratar de reproducir las condiciones en las que se encuentra un pavimento durante un incendio, los autores de este trabajo han llevado a cabo una serie de ensayos con probetas de mezcla compactadas con un sistema similar al que se utiliza en la preparación de las utilizadas en el ensayo de pista de laboratorio (Fig. 7). Éstas se introdujeron en un horno especialmente adaptado para este tipo de ensayos, con unos elementos de calentamiento por rayos infrarrojos en su parte superior y una báscula que va realizando pesadas periódicas de la muestra introducida. El equipo detiene automáticamente el ensayo cuando se estabiliza la pér-



dida de peso debida a la combustión del ligante. Los registros de temperatura y de pérdida de masa se almacenan electrónicamente y también son impresos mediante un dispositivo incorporado al horno.

Después del ensayo las probetas pierden totalmente la cohesión proporcionada por el li-

gante, convirtiéndose en un conjunto de partículas sueltas o fácilmente disgregables limitadas por una corteza formada por restos de combustión del betún (Fig. 7e) prácticamente sin resistencia (Fig. 7f).



(a) Probeta de mezcla bituminosa antes de ser ensayada



(b) Introducción de la probeta en el horno



(c) Interior del horno, con los elementos de calentamiento por rayos infrarrojos en la parte superior



(d) Ignición de la mezcla bituminosa durante el ensayo



(e) Aspecto de la probeta después del ensayo



(f) Después del ensayo la mezcla bituminosa pierde por completo su cohesión, siendo fácilmente disgregable

Fig. 7 - Ensayo de ignición para determinar el contenido de ligante de un mezcla bituminosa

En la Fig. 8 pueden verse las curvas de evolución de la temperatura y de la pérdida de masa en uno de los ensayos realizados.

La respuesta de los pavimentos bituminosos en circunstancias reales se corresponde con estos resultados. En un informe elaborado por el Instituto Federal de Investigación de Carreteras (Bundesanstalt für Strassenwesen, BASt) de Alemania [17] sobre el comportamiento frente al fuego de los firmes bituminosos y de hormigón en túneles, y en el que se analiza un gran número de incendios, se indica que después de producirse los mismos el aglomerado se ve afectado en una profundidad de varios centímetros. Las partículas sueltas resultantes pueden ser fácilmente retiradas o arrastradas por los vehículos, produciéndose con ello baches (Fig. 9). En algunos puntos del túnel del Mont-Blanc ardió la totalidad del espesor de 10 cm de aglomerado, dejando al descubier-

to e incluso afectando a la losa de hormigón armado en la que se apoyaba [18].

No obstante, el ensayo de determinación del contenido de ligante por ignición no proporciona apenas información sobre otros efectos como el desprendimiento de calor o de gases durante la combustión de las mezclas bituminosas. Por ello se han llevado a cabo diferentes estudios con la instrumentación necesaria para poder obtener más datos sobre estos procesos, cuyos principales resultados se resumen a continuación.

5.2 Ensayos de la Universidad de Cergy-Pontoise (Francia)

Los ensayos más completos hasta el momento sobre la respuesta al fuego de los materiales para firmes fueron realizados por el Laboratorio de Ciencia de los Materiales y Construcción de la Universidad de Cergy-Pontoise, el cual

Fig. 8 - Curvas de evolución de la temperatura y de la pérdida de masa de un ensayo de ignición de una mezcla bituminosa

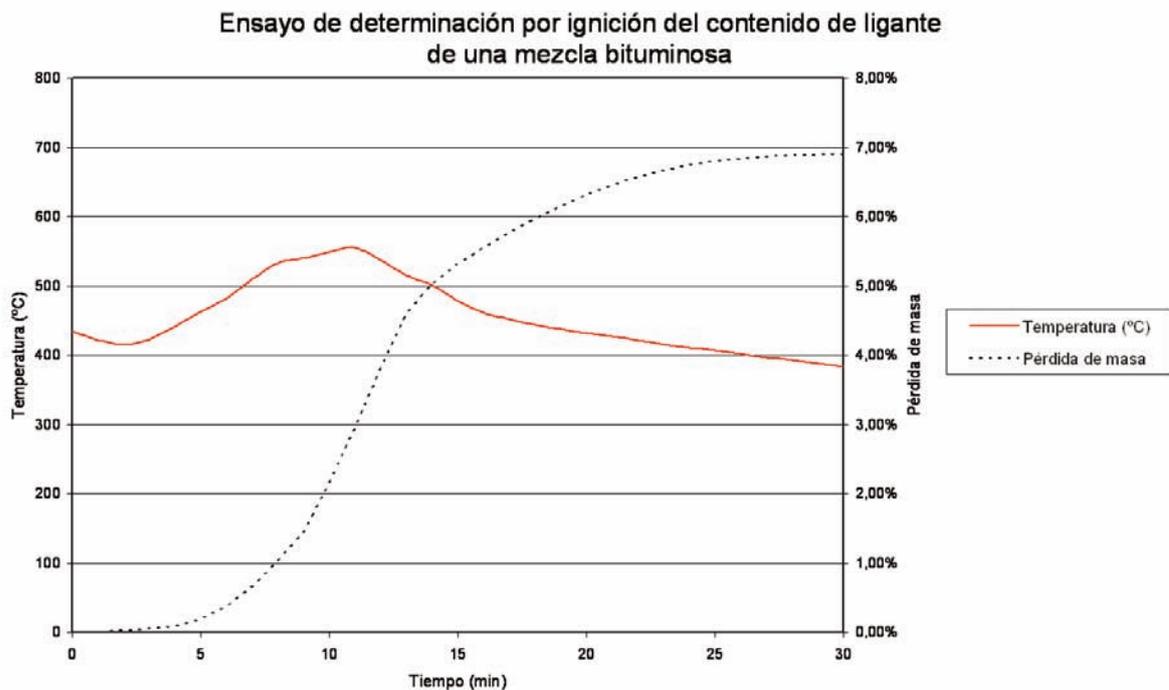




Fig. 9 - Daños causados en un firme urbano por el incendio de un automóvil

desarrolló un proyecto experimental muy detallado sobre el comportamiento al fuego de una serie de probetas de mezcla bituminosa y hormigón.

Uno de los méritos de este trabajo consiste en ser el primero en el que se abordó de forma controlada el comportamiento de las mezclas bituminosas en caso de incendio, someténdolas a una curva de fuego normalizada (ISO 834) hasta alcanzar una temperatura de 750 °C y midiendo con termopares la evolución de las temperaturas a diferentes alturas. A efectos comparativos se realizaron los mismos ensayos sobre probetas de hormigón [19]. También se efectuó un análisis de los gases emitidos durante la combustión de la mezcla bituminosa [20].

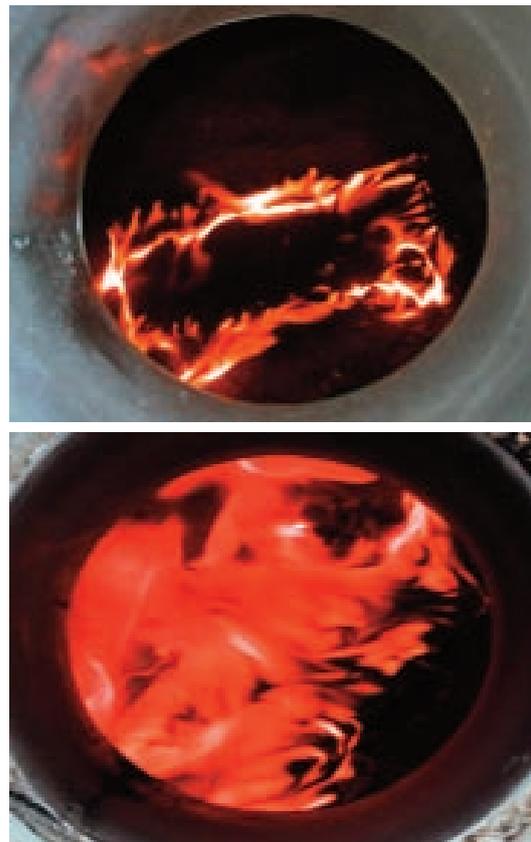
Las conclusiones más relevantes a las que se llegó en dicho estudio fueron las siguientes:

- *El pavimento de hormigón, debido a su composición, es estable en situación de fuego. No es inflamable, no arde y, por tanto, no contribuye a la carga de fuego que, dentro del túnel, determina el riesgo de in-*

endio y la magnitud y consecuencias del mismo.

- *Las capas de mezcla bituminosa tienen un fuerte poder calorífico, que incrementa la carga de fuego y las temperaturas durante un incendio. El punto de ignición, que marca el inicio de la combustión (Fig.10), se sitúa entre 428 °C y 530 °C.*
- *Las mezclas bituminosas no mantienen, en situación de fuego, sus características mecánicas. La combustión disgrega los áridos ya que pone fin, de manera irreversible, a la adherencia árido-ligante bituminoso.*

Fig. 10 - Probeta de mezcla bituminosa durante su ignición (Universidad de Cergy-Pontoise)



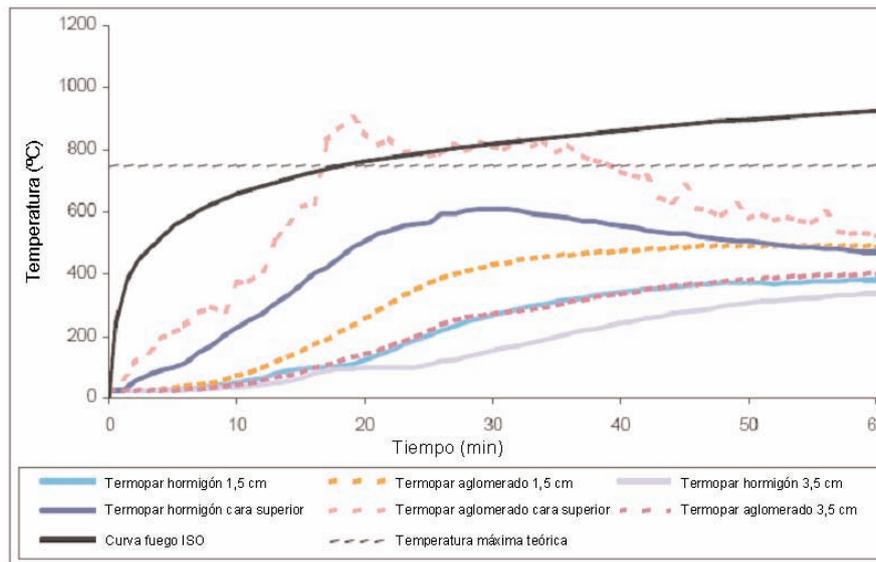


Fig. 11 - Temperaturas medidas en probetas de mezcla bituminosa y hormigón sometidas a una curva de fuego ISO 834 (Universidad de Cergy-Pontoise)

- Un pavimento bituminoso alcanza temperaturas elevadas muy rápidamente, en comparación con un pavimento de hormigón (Fig. 11).
- Un pavimento bituminoso, transcurridos 5 minutos después de iniciado el calentamiento, desprende gases asfixiantes y tóxicos (monóxido y dióxido de carbono, aldehídos, metanol, propanol-2, acetona, benceno, tolueno, dióxido de azufre y ácidos, entre otros) por lo que agrava la situación de incendio⁴.

El aspecto que presentaban las probetas de mezcla bituminosa tras el ensayo (Fig. 12) se corresponde con el obtenido en los ensayos de determinación del contenido de ligante

⁽⁴⁾ Según un informe de una de las comisiones que se crearon después del incendio del túnel de Mont-Blanc “el calor era de tal magnitud que el asfalto se inflamó, precipitando la asfixia de la mayor parte de la víctimas” [21]

(Fig. 7). Por el contrario, en las probetas de hormigón los únicos daños observados fueron producidos por su manipulación y no por efecto del fuego.

5.3 Ensayos del Centro Científico y Tecnológico de la Construcción de Francia (CSTB)

En los ensayos llevados a cabo por el Centro Científico y Tecnológico de la Construcción de Francia (Centre Scientifique et Technique du Batiment, CSTB), para determinar el comportamiento al fuego de los pavimentos bituminosos en caso de incendio en túneles de carretera, las probetas de aglomerado mostraron una respuesta al fuego similar a la indicada en los apartados anteriores [22] [23] [24].

Las pruebas consistieron en colocar las probetas bajo un panel radiante que aplicaba a las mismas un flujo de calor entre 20 y 50 kW/m².

Cada uno de los ensayos se daba por finalizado cuando un termopar, situado a 15 mm



Fig. 12 - Probeta de mezcla bituminosa (izqda.) y hormigón (dcha.) tras un ensayo de ignición (Universidad de Cergy-Pontoise)

de profundidad de la superficie expuesta a la radiación, indicaba 300 °C. Esta temperatura es inferior a aquélla en la que se produce la ignición del betún, por lo que las pruebas carecen de representatividad de lo que sucede en un incendio en un túnel de carretera. Por otra parte, la forma de aplicar el calor no permite ajustarse a ninguna de las curvas de fuego normalizadas.

Aun con estas bajas temperaturas, en general las probetas perdieron en su interior su cohesión, convirtiéndose en un conjunto de áridos fácilmente disgregable, mientras que en la superficie se formaba una corteza de material. Como ya se ha indicado, ello está en línea con lo observado en los ensayos de ignición para determinación del contenido de ligante (Fig. 7) o en los llevados a cabo en la Universidad de Cergy – Pontoise (Fig. 12). En consecuencia, dicha corteza no impide que el resto del espesor arda, sino que por el contrario puede interpretarse como un resultado de dicha combustión.

Durante la realización de los ensayos, además de la inflamación de las probetas, se observó la aparición de humos oscuros, densos y con fuerte olor.

Resulta por tanto sorprendente que en el informe se den las siguientes conclusiones:

- *Un pavimento bituminoso no se incendia fácilmente, y es necesaria una muy elevada temperatura para que se produzca su ignición.*
- *El volumen de gases producidos en la combustión del pavimento bituminoso, en caso de incendio, es muy bajo comparado con el que se origina por la combustión de los vehículos afectados por el mismo.*
- *En las pruebas realizadas aplicando fuego sobre el pavimento bituminoso se puso de manifiesto que sólo la parte superficial del mismo participa en el incendio, formándose una corteza inerte en la superficie debida a los residuos de la combustión.*

Las dos primeras no pueden extraerse de los ensayos, dado que éstos se llevaron a cabo a temperaturas relativamente bajas. Tampoco se indica en el informe que se llevara a cabo ningún tipo de determinación sobre los gases emitidos (volumen, composición, etc.).

En cuanto a la última conclusión, contradice no solamente los propios resultados obtenidos por el CSTB, sino también los de otras pruebas, así como el comportamiento de los firmes en casos reales. No obstante, ha sido ampliamente difundida, a pesar de su falta de rigor.

5.4 Proyecto SAMARIS (Sustainable and Advanced Material for Road InfraStructure)

Como ya se ha indicado en varias ocasiones, para evaluar adecuadamente en laboratorio el comportamiento de las mezclas bituminosas es preciso que éstas se sometan a temperaturas o flujos de calor similares a los de los

incendios reales. Las curvas de fuego normalizadas indican que se alcanza rápidamente la temperatura de ignición del betún.

Cualquier ensayo cuyas condiciones no permitan alcanzar dicha temperatura no podrá caracterizar con precisión el comportamiento de las mezclas bituminosas frente al fuego. Esto quedó de manifiesto en las pruebas realizadas en el proyecto de investigación europeo SAMARIS (Sustainable and Advanced MAterial for Road InfraStructure [25]).

En dicho proyecto las probetas de mezcla bituminosa se ensayaron tanto con un panel radiante como con un calorímetro de cono [26]. Este último equipo es capaz de generar unos flujos caloríficos más aproximados a los que se producen en un incendio real en un túnel que los que en general pueden obtenerse con los paneles radiantes [27] especificados en la Norma UNE - EN 13501-1: 2002, para caracterizar la reacción al fuego de los revestimientos de suelos (moquetas, tarimas, etc.) [28].

Entre las conclusiones más importantes del proyecto SAMARIS pueden destacarse las siguientes:

- Los ensayos especificados en la Norma UNE-En 13501-1, como el del panel radiante, no son válidos para evaluar el comportamiento frente al fuego de las mezclas bituminosas, salvo que se introduzcan modificaciones en los mismos.
- El flujo calorífico crítico para iniciarse una combustión sostenida de una mezcla bituminosa densa [Fig. 13] fue del orden de 21 kW/m^2 , es decir, dentro del intervalo de valores ($15 - 25 \text{ kW/m}^2$) obtenido en ensayos con coches ardiendo al aire libre.

Se destaca, no obstante, que la carga de fuego y en consecuencia el flujo calorífico son bastante mayores con un camión ardiendo; y que en un espacio confinado, como es el caso de un túnel, el calor irradiado por la capa de humo caliente y por las paredes del túnel aumentan todavía más dicho flujo calorífico sobre el pavimento, incrementándose así su contribución a la carga de fuego.

- El tiempo para iniciarse la combustión sostenida disminuía notablemente al aumentar el flujo calorífico, de forma que con 35 kW/m^2 podía ser superior a 10 minutos, mientras que con 75 kW/m^2 era inferior a 1 minuto.

5.5 Ensayos del Centro de Ingeniería de Seguridad frente al Fuego de la Universidad de Edimburgo

El calorímetro de cono se utilizó también en unos ensayos de ignición de mezclas bituminosas llevados a cabo por el Centro de Ingeniería de Seguridad frente al Fuego de la Universidad de Edimburgo [29] con objeto de hacer una caracterización completa del com-

Fig. 13 - Ensayo del calorímetro de cono (proyecto SAMARIS)



portamiento frente al fuego de las mismas y obtener parámetros para simular incendios dentro de un túnel empleando métodos de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD).

Los principales resultados de dichos ensayos se indican a continuación:

- *La combustión de las mezclas se inicia con flujos de calor inferiores a 40 kW/m². Este valor se alcanza fácilmente durante un incendio en un túnel.*
- *Después de la combustión las probetas perdían prácticamente toda su cohesión, siendo fácilmente disgregables.*
- *La tasa de liberación de calor aumentaba notablemente al crecer el flujo de calor incidente. Con un valor de este último de 60 kW/m² se obtuvo una tasa de liberación de calor de casi 100 kW/m². Es de esperar que con flujos mayores también crezca dicha tasa.*

En el informe de los resultados se destaca que durante los ensayos de fuego en el túnel de Runehamar se registraron los flujos de calor en distintos puntos cerca de los focos del incendio (trailers de camiones de mercancías simulados). En los primeros tres vehículos (uno cargado con palets de madera y plástico, el segundo con palets de madera y colchones y el tercero con muebles) el flujo crítico se rebasó en varios puntos de la carretera, aguas abajo de los focos del incendio, alcanzándose valores máximos de 280, 200 y 75 kW/m², respectivamente. También se obtuvieron flujos por encima del valor crítico 5 m aguas arriba del foco del primer ensayo, alcanzándose máximos de casi 100 kW/m².

En consecuencia, incluso si la combustión de la mezcla bituminosa se limita a la zona inme-

diatamente aguas abajo de un camión ardiendo, esto puede afectar a una superficie de pavimento superior a 50 m², con lo que el calor desprendido por esta última puede ser de 5 MW o superior. Ello es equivalente al menos a la combustión de uno o dos coches. En casos severos, en los que puede también arder la superficie de la calzada aguas arriba del fuego, la combustión de la superficie afectada llegar a alcanzar flujos de calor de 20 MW.

5.6 Comportamiento en incendios a escala real

Las conclusiones anteriores están de acuerdo con distintas mediciones efectuadas en ensayos a escala real, que indican que a una cierta distancia de un vehículo ardiendo todavía se alcanzan temperaturas capaces de provocar la combustión de las mezclas bituminosas. Ya se ha mencionado que en un espacio confinado, como es un túnel, los efectos del fuego se ven agravados y aumentan todavía más el flujo calorífico sobre el pavimento. Por ello no es extraño que las longitudes afectadas de este último sean bastante superiores a las ocupadas por los vehículos quemados durante el incendio. A este respecto puede mencionarse que el fuego dañó seriamente, entre otros ejemplos, longitudes importantes de los pavimentos bituminosos de los túneles de San Gotardo, Mont-Blanc (1,2 km) y Fréjus (800 m), que tuvieron que ser reconstruidos posteriormente. En el incendio del túnel de Mont-Blanc en 1999 se produjeron deterioros en 1200 m de calzada, mientras que ardieron 32 coches y 2 camiones, cuya longitud total no llega a 250 m.

En esta misma línea, en el informe sobre el comportamiento de los firmes bituminosos y de hormigón en túneles frente a los incendios

del BASt alemán [17] se destaca que también en el túnel del Mont-Blanc se quemaron ocho vehículos estacionados a una distancia de unos 300 m del fuego en la parte italiana, mientras que el techo de la galería en esa longitud apenas presentaba daños.

Aun sin llegar a producirse la ignición de las mezclas, las temperaturas alcanzadas pue-

den provocar un reblandecimiento excesivo de las mismas. En el incendio del túnel de Fréjus en 2005 las labores de los equipos de rescate se vieron obstaculizadas porque, según informaron los componentes de los mismos, la mezcla bituminosa se fundía bajo sus pies en las proximidades del fuego [30].

6

Otras ventajas del empleo de pavimentos de hormigón en túneles



En los túneles los pavimentos de hormigón presentan otras ventajas que también inciden en la seguridad de los mismos y que hacen además que su empleo suponga una inversión ventajosa. Entre ellas pueden destacarse las siguientes:

- Superficie más clara y luminosa (Fig. 14), lo que permite optimizar el coste de la iluminación, ahorrando energía y gasto durante toda la vida de servicio del túnel. Ello es una cualidad intrínseca del hormigón, que se consigue sin tener que añadir ningún aditivo especial que encarezca su coste [31].
- Menor deterioro, tanto estructural como superficial, y mayor vida útil, lo que redunda en un menor coste total. Con respecto a este último punto, hay que subrayar que en el interior de los túneles las diferencias de temperatura son mucho menos importantes que en el exterior, lo que se traduce en unos gradientes térmicos muy pequeños y, en consecuencia, en unas menores tensiones y una mayor durabilidad del pavimento de hormigón frente a la que tendría al aire libre.
- Reducción de la distancia de frenado.

Fig. 14 - Túnel Juan Carlos I (Vielha)



- Disminución de posibles accidentes durante las operaciones de conservación, ya que éstas son infrecuentes.
- Reducción del consumo de carburante. Distintos estudios llevados a cabo en varios países indican que, a igualdad de los demás factores, los camiones consumen menos carburante al circular sobre un pavimento de hormigón que sobre uno bituminoso.

Las investigaciones más detalladas sobre este tema fueron realizadas en tres fases a lo largo de distintos años por el Consejo Nacional de Investigación de Canadá [32]. Se utilizaron vehículos ordinarios de varios tipos (coches, camiones, etc.) equipados con dispositivos para medir el consumo instantáneo de carburante. Como resultado se concluyó que al circular sobre pavimentos de hormigón los camiones tenían un consumo de combustible menor que al hacerlo sobre pavimentos bituminosos (entre el 6,9 y el 0,8 %, dependiendo del tipo de camión, de la velocidad y de la carga). Ello se explica por la menor deformación vertical de los pavimentos de hormigón, a igualdad de carga, frente a los firmes bituminosos. Por ello, para hacer avanzar los vehículos se precisa una mayor energía.

A las economías en el consumo de combustible hay que sumar también la disminución en el volumen de gases emitidos.

- Disminución de niveles sonoros. Un defecto que se ha achacado con frecuencia a los pavimentos de hormigón es su mayor nivel de ruido con respecto a las mezclas bituminosas. Ello es cierto en los acabados con texturas transversales, sobre todo si están constituidas por surcos profundos y a distancias regulares. Sin embargo se ha compro-

bado que, a igualdad de resistencia al deslizamiento, las texturas longitudinales dan lugar a unos niveles sonoros análogos a los de muchas mezclas bituminosas.

Con el denudado de los pavimentos (Fig. 15) se pueden obtener niveles sonoros incluso más reducidos. Esta técnica consiste en distribuir un retardador sobre la superficie del hormigón fresco, que impide el fraguado de los primeros milímetros del mismo. Algunas horas después, cuando ya ha endurecido suficientemente el resto del espesor del pavimento, se elimina el mortero sin fraguar mediante barrido u otros sistemas. Con ello se obtiene una textura formada por un mosaico de gravillas, que presenta unas notables características antideslizantes y un bajo ruido de rodadura.

Cuanto menor es el tamaño máximo del árido, más reducido es también el ruido de rodadura. De ahí que en algunos países, como Austria, los pavimentos de hormigón se construyan en dos capas, empleándose en la superior áridos con un tamaño máximo de 8 a 11 mm [33].

La larga experiencia que se tiene ya con el denudado ha permitido constatar que, los niveles sonoros que se obtienen inicialmente con el mismo son superiores a los de las mezclas bituminosas drenantes⁵ y otras alternativas; pero el aumento del nivel sonoro que se produce en todos los tipos de superficie de firme con el paso del tiempo hace que, transcurridos 10 años, los pavimentos de hormigón denudado sean los más silenciosos (Fig. 16) [34].

⁽⁵⁾ El empleo de las mismas está prohibido en túneles



(a) Eliminación del mortero superficial sin fraguar



(b) Detalle de textura

Fig. 15 - Pavimento de hormigón denudado

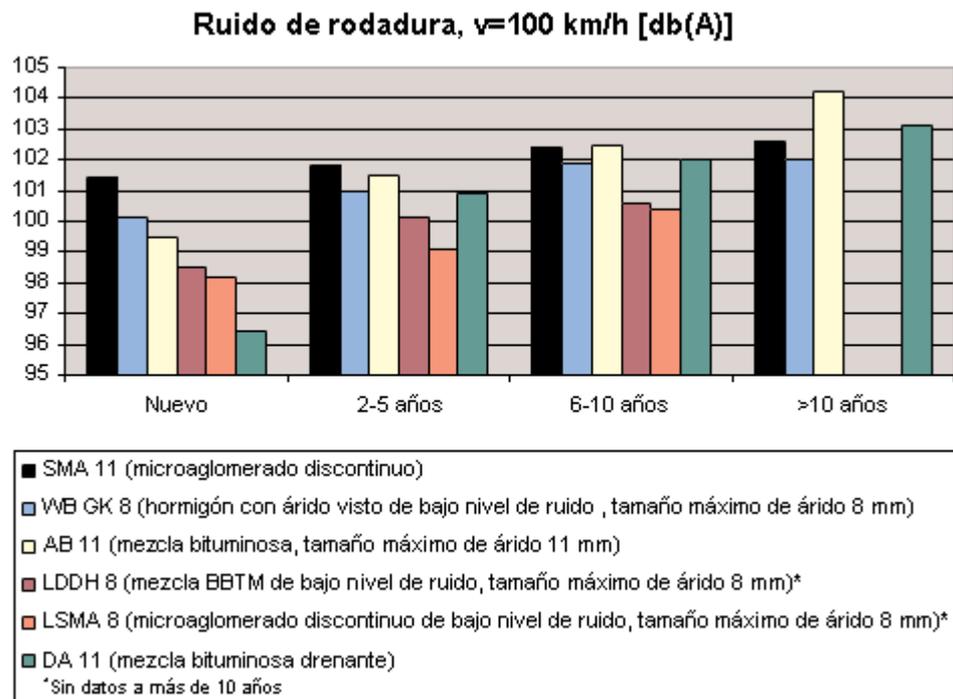


Fig. 16 - Evolución del ruido de rodadura a 100 km/h en distintos tipos de pavimento en Austria

7

Construcción de pavimentos de hormigón en túneles

7.1 Equipos

En principio, todas las técnicas utilizadas en la ejecución de pavimentos de hormigón al aire libre pueden ser empleadas también en túneles.

Dejando aparte la construcción con regla vibrante entre encofrados fijos, los equipos más habituales son:

- Las pavimentadoras de encofrados deslizantes.
- Las bordilladoras.
- Las acabadoras de cilindro (cylinder finishers,) muy utilizadas también en la ejecución de pavimentos de puente y de revestimientos de canales.

Un ejemplo de empleo de estos últimos equipos lo constituye el túnel de La Rovira, en el casco urbano de Barcelona (Fig. 17), en servicio desde 1984.

Las bordilladoras o motobordilladoras son equipos que pueden ejecutar por extrusión una gran variedad de elementos en hormigón, según la forma del molde que se las instale: bordillos, cunetas, barreras de seguridad, etc.; e incluso, sin más que colocarles un molde plano, pavimentos que en algunos casos pueden alcanzar anchos de 6 m (Fig.18).



Fig. 17 - Ejecución con acabadora de cilindro (túnel de La Rovira, Barcelona)

Dentro de las pavimentadoras de encofrados deslizantes propiamente dichas, puede hacerse asimismo una distinción entre las que llegan hasta anchos máximos de trabajo del orden de 6 m, es decir, los usuales para la ejecución por semicalzadas (Fig. 19), y aquellas otras en las que, a partir de un mínimo del orden de 2,5 m pueden alcanzarse anchuras máximas de 7,5 - 8,5 m (Fig. 20). Existen además grandes equipos para la construcción de pavimentos de autopistas y de aeropuertos, que pueden llegar hasta anchos de trabajo de 16 m.

Los equipos de encofrados deslizantes se desplazan sobre orugas, efectuándose generalmente el guiado de los mismos mediante unos hilos tensos colocados sobre piquetes regularmente espaciados, en los que se apoyan unos sensores de alineación y de cota.





Fig. 18 -Solera de túnel ejecutada con bordilladora



Fig. 19 - Pavimento ejecutado por semianchos con extendidora de encofrados deslizantes

Fig. 20 - Pavimento ejecutado por anchos completos



7.2 Particularidades de la ejecución de pavimentos de hormigón en túneles

Los condicionantes mayores proceden de la limitación de espacio, en los laterales y en altura, lo que puede influir tanto en el suministro del hormigón como en los propios equipos de puesta en obra, y muy particularmente en sus sistemas de guiado

En otras ocasiones puede plantearse también el problema de mantener abierto el túnel al tráfico (generalmente de obra), lo que obligará a construir el pavimento por anchos parciales y, en ocasiones, a emplear hormigones permitiendo su puesta en servicio lo más rápidamente posible.

7.2.1 Suministro del hormigón

El sistema más rápido de alimentación del hormigón es mediante camiones volquete vertiendo directamente el mismo delante de la pavimentadora. Para ello, y como es lógico, la subbase no tiene que tener elementos situados sobre la misma que puedan entorpecer o impedir la circulación de los vehículos (como ocurre en general con las armaduras de los pavimentos armados continuos).

En el caso de que por el gálibo existente no sea posible el empleo de camiones volquete normales, algunas de las posibles soluciones son las siguientes:

- Camiones hormigonera (aunque los rendimientos que pueden alcanzarse con los mismos son bastante reducidos: la descarga de un camión de 8 m³ puede durar más de 15 minutos).
- Camiones basculantes de vuelco lateral (Fig. 21).
- Camiones eyectores, con una caja provista de un émbolo que empuja el hormigón y provoca su descarga (Fig. 22).

Se puede recurrir asimismo a ayudar a la descarga del volquete mediante una retroexcavadora, de forma que la caja del camión no tenga que elevarse totalmente.

Como complemento a los sistemas anteriores, hay que mencionar la posibilidad del empleo de cintas de transferencia montadas encima de un carro, para permitir salvar elementos situados delante de la pavimentadora (por

Fig. 21 - Camión basculante de vuelco lateral.



Fig. 22 - Camión eyector

ejemplo, pasadores). Se recurre a una opción similar en el caso de ejecutar el pavimento en dos capas simultáneamente, empleando en la superior un hormigón con una mayor resistencia, un contenido de cemento más elevado y un tamaño de árido menor. Para la alimentación del hormigón de esta capa a la pavimentadora trasera se puede utilizar una cinta transportadora que pasa por encima de la pavimentadora delantera (Fig. 23).

7.2.2 Limitaciones de espacio lateral

En las pavimentadoras, aparte del ancho a hormigonar, hay que contar con la necesidad de un espacio lateral para las orugas sobre las que se desplazan, si se trata de equipos



Fig. 23 - Ejecución de pavimento de hormigón en dos capas: alimentación del hormigón de la capa superior

de encofrados deslizantes, así como para posicionar los elementos de guiado. Éstos pueden estar constituidos por un hilo o cable tenso (pavimentadoras de encofrados deslizantes) o bien, en el caso de acabadoras de cilindro, por unos carriles sobre las que circulan unas ruedas provistas de pestañas.

Es frecuente que los túneles de carretera estén provistos de aceras o andenes laterales, dando lugar entonces a dificultades para fijar en las mismas los piquetes para situar los hilos de guiado, generalmente por falta de espacio.

Una alternativa es situar dichos elementos de fijación de los hilos en las paredes, por encima de las orugas en los equipos de encofrados deslizantes (Fig. 24). También puede recurrirse a un sistema similar para situar los elementos de guiado de las ruedas en las acabadoras de cilindro. Con ello se consigue reducir al mínimo el espacio entre las paredes del túnel y dichas orugas o ruedas.

Otra posibilidad es el empleo de sistemas de guiado 3D, que permiten eliminar los hilos de guiado. Se posee ya una amplia experiencia sobre este método tanto en el interior de túneles como en pavimentos al aire libre.

Por otra parte, si las aceras están huecas (por ejemplo, para permitir el alojamiento de conductos) y las orugas de la pavimentadora deben circular por encima de las mismas, es preciso protegerlas para evitar roturas.

7.2.3 Pavimentos continuos de hormigón armado

Se constata desde hace algunos años en Europa un renovado interés en la aplicación de

Fig. 24 - Colocación de piquetes para sujeción de hilo guiado de la pavimentadora en pared del túnel



los pavimentos continuos de hormigón armado (PCHA), en el caso de tráficos pesados, como consecuencia de su muy reducida conservación cuando se proyectan y construyen correctamente. La disminución de los costes del usuario puede compensar con creces el sobreprecio introducido por la armadura. A este respecto, en la última revisión de la Norma 6.1 – IC sobre Secciones de Firme del Ministerio de Fomento (2003) se prescribe que los pavimentos de hormigón a utilizar en las dos categorías superiores de tráfico (T00 y T0) deben ser PCHA[35]. En ello ha influido el excelente comportamiento de la autopista Oviedo-Gijón-Avilés, también conocida como la Y asturiana, por su forma en planta. Fue abierta al tráfico en 1976 y su pavimento armado continuo se encuentra en la actualidad todavía en perfecto estado, a pesar de las condiciones de tráfico pesado e intenso, lluvias frecuente y abundantes y características mediocres de los terrenos por los que discurre la autopista. La conservación que ha requerido ha sido muy reducida, y por ello se ha utilizado también en otras obras en Asturias.

En Bélgica, país líder en Europa en el empleo de los PCHA, se ha utilizado en los últimos años esta solución en algunos túneles de autopistas urbanas [36].

Al no poder circular los camiones por encima de la armadura, algunas de las posibles alternativas son:

- La ejecución por semianchos, que deben conectarse mediante barras de unión (Fig. 25).
- la utilización de pavimentadoras provistas de guías (trompetas), que permiten con-



Fig. 25 - Ejecución por semianchos de un pavimento continuo de hormigón armado

centrar las armaduras longitudinales en los bordes de la capa de apoyo del PCHA, dejando un espacio libre suficiente para que circulen los camiones de transporte del hormigón (Fig. 26). Éste se vierte en la tolva de recepción de una cinta transportadora, que salva la longitud necesaria para que las armaduras se vayan situando en su posición definitiva al ir pasando a través de las guías. En España se ha utilizado este método en la construcción al aire libre del PCHA de la autopista Oviedo – Pola de Siero.

7.3 Hormigones para pavimentos de túneles

Los hormigones de los pavimentos de túneles no tienen en principio ninguna diferencia notable con respecto a los empleados al aire libre. No obstante, algunas medidas que también son de interés en estos últimos pueden ayudar a optimizar el comportamiento del hormigón en un incendio:

- la utilización de áridos gruesos calizos, por su menor coeficiente de dilatación
- el empleo de aireantes, que crean unas cámaras de expansión que disminuyen la pre-



Fig. 26 - Colocación de armaduras de un pavimento continuo de hormigón armado mediante guías en la pavimentadora

sión del vapor en caso de una elevación importante de temperatura.

Los aireantes también contribuyen a mejorar la trabajabilidad del hormigón. Respecto a este último punto, puede ser conveniente mencionar que las fórmulas de trabajo de los hormigones para revestimiento de túneles, si se emplean para los mismos arenas de machaqueo, pueden no ser adecuadas para pavimentos, por contener un exceso de finos que dan lugar a hormigones “pegajosos”, así llamados por adherirse a las maestras de las pavimentadoras o a otros útiles de acabado. Ello puede dar lugar a problemas de calidad de rodadura, que no se producen con una fórmula de trabajo adecuada.

Para la obtención de unas características antideslizantes duraderas, los áridos en contacto con las ruedas de los vehículos deben tener una resistencia al desgaste adecuada. Ello se consigue utilizando arenas con un contenido mínimo de partículas silíceas del 35 %, en caso de que la textura superficial se obtenga por cepillado o estriado del hormigón fresco, o empleando gravillas con un coeficiente de pulimento acelerado no inferior a 0,5 si se recurre a la técnica del denudado [37].

En el caso de que en un plazo reducido haya que poner el pavimento en servicio, o bien sea necesario tener que permitir que sobre una banda ya ejecutada se apoyen los equipos de construcción o circule el tráfico de obra, es posible utilizar hormigones que en unos pocos días o incluso en algunas horas alcancen las resistencias necesarias [38].

7.4 Condiciones para obtener una buena regularidad superficial

Las reglas para obtener una buena calidad de rodadura en un pavimento de hormigón en la elección de una fórmula de trabajo están basadas sobre todo en la elección de una fórmula de trabajo adecuada y en una gran regularidad del proceso de fabricación y puesta en obra del hormigón. Entre ellas pueden destacarse las siguientes:

- hormigón homogéneo, sin variaciones en su consistencia
- pavimentadora en buen estado
- fabricación de hormigón acorde con el ritmo previsto de puesta en obra
- transporte de hormigón desde la planta al punto de vertido bien organizado

- suministro de hormigón a la pavimentadora adecuado al avance, evitando sobre todo que se produzcan paradas de la misma
- guiado correcto de la pavimentadora
- caminos de rodadura estables de las orugas de la pavimentadora
- avance regular

- evitar retoques manuales.

Respetando estos principios, los equipos para la ejecución de pavimentos de hormigón permiten obtener una regularidad superficial cumpliendo con las prescripciones y que se mantiene a lo largo de toda la vida de servicio del firme.

8

Conclusiones



En los apartados anteriores se ha analizado el comportamiento frente al fuego de dos materiales típicos para firmes, como son las mezclas bituminosas y el hormigón, con el fin de comparar la seguridad que aportan a un túnel en un incendio.

El hormigón es un material incombustible, que no genera humos ni gases tóxicos durante un incendio ni aumenta la carga de fuego. El espesor en el que pueden producirse pérdidas de resistencia de una cierta importancia se limita a unos pocos centímetros. Los fenómenos de desconchado (spalling) no son importantes en los pavimentos, en los que se emplean hormigones de resistencias moderadas.

En el caso de las mezclas bituminosas, la presencia de un derivado del petróleo, como es el betún, altamente combustible, hace que se planteen una serie de cuestiones que se indican a continuación, junto con las respuestas deducidas tanto de experiencias reales como de ensayos de laboratorio:

- **¿Pueden arder las mezclas bituminosas?**

Sí, en cuanto se alcanza en las mismas la temperatura de combustión del betún (entre 400 y 500 °C). Haciendo uso de esta propiedad se han puesto a punto métodos de determinación del contenido de ligante mediante ignición de las mismas.

- **¿Las temperaturas para que se origine la combustión de las mezclas se producen en un incendio de un túnel?**

En general son superiores, no solamente en la sección libre sino también en el firme. A lo anterior hay que añadir que en un espacio confinado, como es un túnel, los efectos del fuego se ven agravados por el calor irradiado por las paredes y por la capa de humo caliente, que aumentan todavía más el flujo calorífico sobre el pavimento.

- **¿Qué efectos tiene la combustión de la mezcla bituminosa?**

El fuerte poder calorífico del betún da lugar a un incremento de la carga de fuego. Por otra parte, al poco tiempo de iniciarse la combustión se empiezan a desprender humos y gases tóxicos, lo que puede precipitar la asfixia de las víctimas. Finalmente se produce una pérdida de cohesión del aglomerado, transformándose en un conjunto de partículas sueltas.

- **¿La combustión de las mezclas afecta únicamente a la superficie del firme?**

Generalmente la profundidad en la que se produce la combustión alcanza varios centímetros. En el incendio del túnel del Mont-Blanc ardieron en algunos puntos la totalidad de los 10 cm de aglomerado. Cuanto mayor es el espesor afectado, más aumen-



tan su contribución a la carga de fuego y los humos y gases desprendidos.

- **¿La combustión de las mezclas se limita a la zona inmediatamente debajo de los vehículos ardiendo?**

Varios factores, como la ventilación o el calor reflejado en las paredes y el techo de un túnel, pueden dar lugar a que en puntos alejados del foco del incendio la temperatura sea todavía suficiente para provocar la combustión de las mezclas. Por ello, la superficie afectada puede ser bastante mayor que la de los vehículos incendiados. En el incendio del túnel del Mont-Blanc ardiéron 32 coches y 2 camiones, cuya longitud total no llega a 250 m, mientras que se produjeron deterioros en 1200 m de calzada. El calor desprendido por la combustión de 50 m² suplementarios puede ser equivalente al de dos o tres vehículos ligeros.

- **¿La existencia de un pavimento bituminoso puede hacer que el incendio se propague a otros vehículos alejados del foco inicial?**

En el túnel del Mont-Blanc se quemaron ocho vehículos estacionados a una distancia de unos 300 m del incendio. El techo de la galería en esa longitud apenas presentaba daños, por lo que parece probable que la combustión de los vehículos se produjera por una propagación del fuego en la mezcla bituminosa a elevada temperatura.

- **¿Qué otros efectos puede tener en las mezclas bituminosas el calor generado durante un incendio?**

Aún sin llegar a producir la ignición de la mezcla, el aumento de temperatura puede dar lugar a un reblandecimiento de la misma perjudicando el acceso de los equipos de rescate o de extinción del fuego. En el

incendio del túnel de Frejus, los bomberos informaron que la mezcla bituminosa se fundía bajo sus pies.

En consecuencia, carece de fundamento la afirmación, ampliamente difundida para justificar el empleo de las mezclas bituminosas en túneles, de que solamente una delgada capa superficial se inflama durante un incendio, porque se crea una corteza inerte que impide que se propague el fuego debajo de la misma. La realidad demuestra que, por el contrario, puede producirse la combustión de varios centímetros de aglomerado, formándose como consecuencia de la misma dicha corteza que prácticamente no tiene ninguna cohesión.

Como resumen de lo anterior, puede concluirse que en los túneles, en caso de incendio, los pavimentos de hormigón son los que proporcionan un mayor nivel de seguridad.

Por otra parte, en la construcción de pavimentos de hormigón en túneles pueden emplearse los mismos métodos que en carreteras al aire libre, sin que ello suponga un condicionante insalvable.

El Real Decreto 635/2006 de 6 de mayo sobre condiciones de diseño y explotación de los túneles de las carreteras del Estado prescribe que, salvo razones debidamente justificadas, en túneles de más de 1.000 metros se empleará pavimento de hormigón; y que se podrán aplicar como alternativas otras medidas de reducción del riesgo, siempre y cuando éstas den lugar a una protección equivalente o mayor. A la vista de lo expuesto anteriormente, la sustitución del pavimento de hormigón por otro de mezcla bituminosa no cumple este requisito.

En esta línea, la Federación de Bomberos de Francia opina que "la simple lógica debería imponer la sustitución de las mezclas bituminosas por un material totalmente neutro como es el hormigón" [39].

Por su parte, el Comité Técnico Internacional para la Prevención y Extinción de Incendios

(CTIF) [1], una organización que representa a cinco millones de bomberos y que es la más importante a nivel mundial, indica que "los firmes de las carreteras deberían ser incombustibles, no emitir humos tóxicos y ser claros, lo que mejora la visibilidad. Por ello el hormigón debería preferirse a las mezclas bituminosas".

Bibliografía consultada

- [1] "Improving fire safety in tunnels: The concrete pavement solution". BIMB – Cembureau - ERMCO, Bruselas, abril 2004
- [2] "Incendie dans le tunnel de Fréjus : 2 morts". Disponible en <http://lci.tf1.fr/france/2005-06/incendie-dans-tunnel-frejus-morts-4859236.html>
- [3] Romana Ruiz, M. : "Incendios en túneles". Curso teórico-práctico sobre incendios en túneles. San Pedro de Anes (Asturias), 6, 7 y 8 de mayo de 2009. Organizado por Servicios Técnicos de Mecánica de Rocas S. L. (STMR), Madrid
- [4] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, "Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004". Diario Oficial de la Unión Europea, 7 de junio de 2004
- [5] Ministerio de Fomento: "Real Decreto 635/2006 de 26 de mayo sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado". Boletín Oficial del Estado, Madrid, 27 de mayo de 2006
- [6] "Fire Curves". Promat Tunnel, Tissett (Bélgica). Disponible en <http://www.promat-tunnel.com/en/hydrocarbon-hcm-hc-rabt-rws.aspx>
- [7] Fuentes Cantillana, J. L.: "Tipos de ventilación en túneles. Comportamiento del humo". Curso teórico-práctico sobre incendios en túneles. San Pedro de Anes (Asturias), 6, 7 y 8 de mayo de 2009. Organizado por Servicios Técnicos de Mecánica de Rocas S. L. (STMR), Madrid
- [8] Romana Ruiz, M.: "El comportamiento del hormigón de los túneles frente al fuego". IV Simposio de Túneles, Andorra, 26 al 28 de octubre de 2005. Organizado por la Asociación Técnica de Carreteras, Madrid
- [9] Calavera, J. et al: "El incendio del Edificio Windsor de Madrid. Investigación del comportamiento al fuego y de la capacidad resistente residual de la estructura tras el incendio". Nota de Información Técnica NIT-2 (05), Intemac, Madrid, 2005
- [10] Khoury, G.A.: "Passive fire protection in tunnels". Concrete, febrero 2003
- [11] "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. Anejo 6: Recomendaciones para la protección adicional contra el fuego de elementos estructurales". Ministerio de Fomento, Madrid, 2008
- [12] Colina, H. et al : "La durabilité des bétons face aux incendies". En "La durabilité des bétons", Presses de l'E.N.P. et Ch., París, 2008
- [13] "Rapid Test Methods for Field Control of Highway Construction". NCHRP Report 103, Highway Research Board, Washington D.C., 1970
- [14] "Asphalt Content Test Offers Improvement Over Solvents". TR News nº 180, septiembre – octubre 1995
- [15] "ASTM D6307 - 05 Standard Test Method for Asphalt Content of Hot-Mix Asphalt by Ignition Method". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2005
- [16] "UNE-EN 12697-39 Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa



en caliente. Parte 39: Contenido en ligante por ignición". AENOR, Madrid, diciembre 2006

[17] Roder, C. y Decker, W.: "Verhalten von Asphalt- und Betonbelägen bei Tunnelbauwerken insbesondere im Brandfall". Projekt 02 231 / B3, Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, Alemania, octubre 2003

[18] "Mission administrative d'enquête technique sur l'incendie survenu le 24 mars 1999 au tunnel routier du Mont Blanc. Rapport d'étape du 13 Avril 1999". Ministère de l'Intérieur et Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, París, 1999

[19] Noumowé, A.: "Characterisation of Asphalt Exposed to High Temperature: Application to Fire Case of Asphalt Pavement". Université de Cergy-Pontoise, París, 2002

[20] Noumowé, A.: "Analysis of the Gases Emitted During the Combustion of the Asphalt: Application to Fire Case of Asphalt Pavement". Université de Cergy-Pontoise, París, 2002

[21] Secretariat du Grand Conseil de la République et canton de Genève: "Rapport M 1375-A de la Commission des affaires communales, régionales et internationales chargée d'étudier la proposition de motion pour un tunnel du Mont-Blanc moins dangereux et moins polluant". Ginebra, 18 septiembre 2001. Disponible en www.ge.ch/grandconseil/data/texte/M01375A.pdf

[22] Demouge, F. et al : "Comportement au feu des enrobés bitumineux. Volet expérimental – Partie n° I". Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB), París, octobre - novembre 2005

[23] Demouge, F.: "Comportement au feu des chaussées bitume en cas d'incendie en tunnel

routier. Rapport d'étude bibliographique" Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB), París, septiembre 2004

[24] Avenel, R. et al : "Comportement au feu des enrobés bitumineux. Volet expérimental – Partie n° II". Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB), París, noviembre - diciembre 2005

[25] Colwell, S. et al: "Test Methodologies for Reaction to Fire of Pavement Materials". Informe SAM-04-D20, Proyecto SAMARIS (Sustainable and Advanced MAterials for Road InfraStructure), 2005. Disponible en www.fehrl.org/?m=32&mode=download&id_file=802

[26] "ISO 5660-1:2002 Reaction-to-fire tests -- Heat release, smoke production and mass loss rate -- Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) ". ISO, Ginebra, 2002

[27] "UNE-EN ISO 9239-1 Ensayos de reacción al fuego de los revestimientos de suelos. Parte 1: Determinación del comportamiento al fuego mediante una fuente de calor radiante". AENOR, Madrid, 2002

[28] "UNE - EN 13501-1: 2002 Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego". AENOR, Madrid, 2002

[29] Carvel, R.O. y Torero, J.L.: "The contribution of asphalt road surfaces to fire risk in tunnel fires: preliminary findings". Proceedings Int. Conf. Risk and Fire Engineering for Tunnels, Stations and Linked Underground Spaces, 19-20 abril 2006, Hong Kong. Organizada por Tunnel Management International, Tenbury Wells, Worcs, Reino Unido. Disponible en <http://>

//www.era.lib.ed.ac.uk/bitstream/ 1842/ 895/ 1/Carvel%20Torero%20Hong%20Kong%202006 b.pdf

[30] "Tunnel stays shut after blaze". The Guardian, Londres, 6 de junio de 2005. Disponible en <http://www.guardian.co.uk/world/2005/jun/06/france.italy/print>

[31] Felipo, J. et al: "Influencia de la mezcla asfáltica en la seguridad de los túneles". Monografía nº 5, Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA), Madrid, marzo 2009

[32] Taylor G.W. y Patten, J.D.: "Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption – Phase III". National Research Council of Canada, Ottawa, 2006

[33] Sommer, H.: "La experiencia austriaca con los pavimentos de hormigón". V Jornadas sobre Pavimentos de Hormigón, Alicante, 2 y 3 de diciembre de 1999. Asociación Técnica de Carreteras, Madrid, 2000

[34] Haberl, J. y Litzka J.: "Bewertung der Nahfeld-Geräuschemission österreichischer Fahrbahndeckschichten", Reihe Strassenforschung des BMVIT, Heft 554, S. 63, Viena, 2005.

[35] Ministerio de Fomento: "Norma 6.1 – IC sobre Secciones de Firme". Madrid, 2003

[36] Jasienski, A. y Verlaine, D.: "Los túneles de Cointe". Cemento – Hormigón, nº 849, mayo 2003

[37] Ministerio de Fomento: "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3. Artículo 550: Pavimentos de hormigón". Madrid, 2004

[38] Van Dam, T.J. et al: "Guidelines for Early-Opening-to-Traffic Portland Cement Concrete for Pavement Rehabilitation". NCHRP Report 540, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2005

[39] "Les feux de tunnel". Soldats du Feu, París, 8 de diciembre de 2009



 **IECA**
INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO
Y SUS APLICACIONES