

CONSIDERACIONES EN TORNO AL COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO EN LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES FRENTE AL FUEGO

Carlos Jofré

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Director Técnico - Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)

Joaquín Romero

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Director Zona Canarias - Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)

Rafael Rueda

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Director Zona Levante - Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)

Resumen

A raíz de los incendios acontecidos en los últimos años en túneles europeos, se ha demostrado la necesidad de adoptar algunas medidas al objeto de minimizar los riesgos y los daños tanto a las personas como a la infraestructura, materializadas 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 medidas de seguridad incluidas en dicho Real Decreto se encuentra la obligatoriedad de emplear pavimento de hormigón en túneles de más de 1.000 metros, pudiéndose elegir otro tipo de soluciones por razones debidamente justificadas y siempre y cuando éstas presenten una protección equivalente o mayor a la ofrecida por los pavimentos de hormigón, debiendo demostrar su eficacia mediante un análisis de riesgo.

En la presente comunicación se analizan algunos trabajos e investigaciones sobre el comportamiento de los pavimentos de hormigón y de mezcla bituminosa frente al fuego 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, en comparación con los firmes con capas bituminosas, los pavimentos de hormigón proporcionan al usuario un nivel de seguridad superior 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.

Palabras clave

Incendio, pavimento, hormigón, fuego, mezcla bituminosa, seguridad, spalling.

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 algunas 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].



Figura 1 Incendios en los túneles de San Gotardo (izquierda) y Mont-Blanc (derecha)

CONSIDERACIONES EN TORNO AL COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO EN LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES FRENTE AL FUEGO

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 1200 °C	2 muertos	9 vehículos
San Gotardo ¹ Suiza	Carretera (1 tubo) 16,3 km	2001	24 horas 1200 °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 1200 °C	12 muertos	24 coches 16 camiones
Mont-Blanc ³ Francia-Italia	Carretera (1 tubo) 11,6 km	1999	53 horas 1000 °C	39 muertos	32 coches 2 camiones
Palermo Italia	Carretera	1999	-	5 muertos	19 coches 1 autocar

Tabla 1 Relación de algunos incendios recientes en túneles europeos

Varias investigaciones realizadas sobre el comportamiento humano bajo condiciones de incendio reflejan que la inmensa mayoría de las personas son conscientes de su entorno y su situación en un principio, agravándose 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.

Ante esta situación, que evoluciona en pocos minutos, los usuarios del túnel intentan reunir a sus familiares o amigos, al igual que sus objetos personales –tal y como se muestra en la fig. 2-, si bien sus mentes solo reaccionan ante señales muy fuertes (luminosas y sonoras, estas últimas con la dificultad de entenderse por conductores extranjeros, especialmente en zonas turísticas), teniendo que tomar decisiones en un plazo muy breve de tiempo [3].



Figura 2 Intento de giro de un vehículo en el túnel de San Gotardo durante el incendio

1. El incendio se produjo como consecuencia de un choque frontal entre dos camiones, lo que dio lugar a que murieran 11 personas por los efectos del humo y el calor. El cierre del túnel fue de unos 2 meses.
2. El incendio tuvo lugar mientras se realizaban obras en su interior. Se estaba circulando de modo intermitente y en la zona 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. Comportamiento de los pavimentos en caso de incendio

A la vista de lo expuesto en los párrafos anteriores, resulta evidente que hay que 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 el caso de un incendio, aumentando la carga de fuego, emitiendo vapores tóxicos y perdiendo su integridad estructural hasta transformarse en un conjunto de partículas sueltas.

La ignición de las mezclas bituminosas es un hecho probado tanto en numerosos ensayos de laboratorio como en el comportamiento de distintos pavimentos sometidos a incendios reales. Como se detalla más adelante, el ensayo de ignición de las mismas para la determinación de su contenido de betún está normalizado tanto en Estados Unidos como en Europa. En lo que se refiere a incendios reales, el fuego dañó seriamente, entre otros casos, longitudes importantes de los pavimentos bituminosos de los túneles de San Gotardo, Mont-Blanc (1,2 km) y Fréjus (800 m), las cuales tuvieron que ser reconstruidas posteriormente. En algunos puntos del túnel del Mont-Blanc ardió la totalidad del espesor de 10 cm de aglomerado, dejando al descubierto e incluso afectando a la losa de hormigón armado en la que se apoyaba [4].

Puede mencionarse además que, en el incendio del túnel de Fréjus, 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 [5].

Al arder el betún, las mezclas bituminosas se transforman en un conjunto de partículas sueltas sin cohesión que dificultan la circulación sobre las mismas.

Además del calor generado por la combustión de las mezclas bituminosas, otro problema son los gases y humos emitidos durante la misma, de gran toxicidad. Según un informe de una de las comisiones que se crearon después del incendio de Mont-Blanc “el calor era de tal magnitud que el asfalto se inflamó, precipitando la asfixia de la mayor parte de las víctimas” [6].

Por el contrario, el hormigón es un material incombustible, que no emite gases tóxicos al ser sometido a la acción del fuego y que retiene una parte muy importante de su capacidad estructural incluso a temperaturas muy elevadas. Esto se ha podido comprobar en numerosos ensayos de laboratorio, aunque la mejor demostración es sin duda el comportamiento de un gran número de estructuras de hormigón en incendios reales. En este sentido, un caso de gran interés es el del edificio Windsor en Madrid (2005), en el que, a pesar de haber permanecido activas las llamas durante más de 24 horas y haberse alcanzado en algunas zonas temperaturas superiores a 1000 °C, la estructura se mantuvo en pie [7].

Una prueba del buen comportamiento de los pavimentos de hormigón frente al fuego es la del túnel experimental del 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 realizado 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.



Figura 3 Túnel experimental del Centro de Ensayos de Fuegos y Ventilación en Túneles de San Pedro de Anes (Asturias)

De lo anterior se deduce que para poder caracterizar de forma realista en laboratorio el comportamiento de un material frente al fuego hay que someterlo a unas temperaturas que reproduzcan, al menos de forma aproximada, las que razonablemente pueden producirse en un incendio. Por otra parte, para que se produzca la combustión del betón, éste debe alcanzar una temperatura del orden de 350 °C. Este valor, como puede verse en la tabla 1, se ha rebasado ampliamente en muchos casos.

3. Curvas de fuego en túneles

En los últimos años se ha 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 específicamente en túneles.

Como consecuencia de los numerosos resultados obtenidos, se han desarrollado diferentes curvas tiempo/temperatura en función de la tipología de exposición analizada [8], tal y como se muestra en la fig. 4.

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.

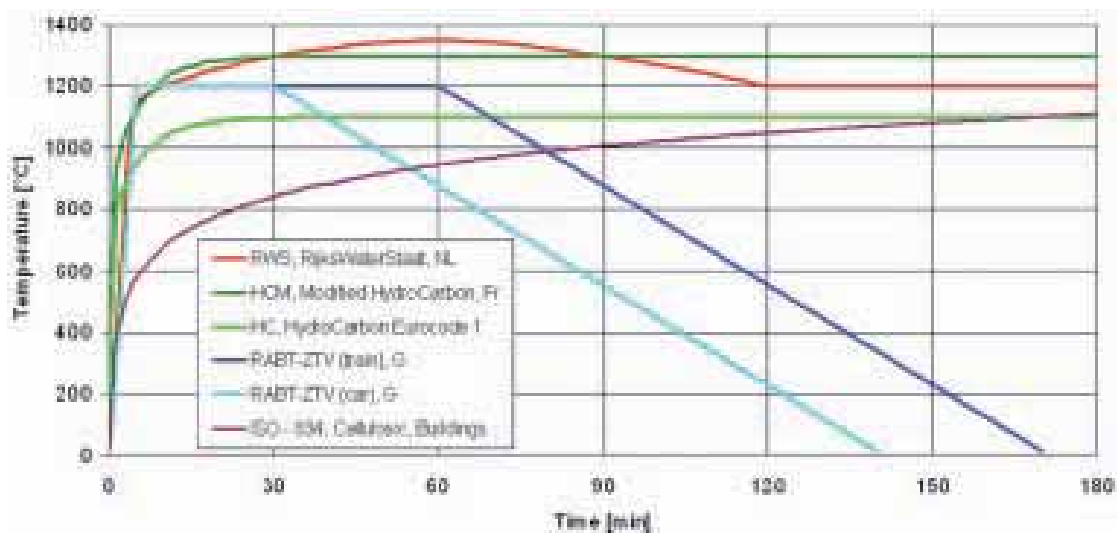


Figura 4 Curvas de fuego. Evolución de la temperatura según la tipología de incendio)

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 un pico de temperatura de 1.300 °C en lugar de los 1.100 °C establecidos en la curva HC.

La curva RABT-ZTV se ha desarrollado en Alemania como resultado de una serie de ensayos realizados en el proyecto EUREKA. Su gradiente de temperatura en los primeros minutos se asemeja a los establecidos en las curvas HC y HCM, siendo más conservador que el adoptado por la curva ISO 834.

La curva RWS se ha desarrollado 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 lo que se traduce 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 carretera en las pruebas realizadas a escala real en el túnel de Runehamar, en Noruega.

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 [9].

Tipo de vehículo	Potencia térmica MW	Max. temp. 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	1000	60-90
Camión cisterna	100 – 300	1200 – 1400	> 100

Tabla 2 Cargas de fuego en túneles

4. Disposiciones en materia de seguridad en túneles

A raíz de los hechos acontecidos en los últimos años, se han adoptado una serie de medidas que establecen unos requisitos mínimos de seguridad para 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 [10].

En dicha directiva se indica que la seguridad de los túneles requiere una serie de medidas relacionadas, entre otros aspectos, con la geometría del túnel y su diseño, el equipamiento de seguridad, incluida la señalización vial, la gestión del tráfico, la

4. De longitud superior a 500 metros.

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. 5).



Figura 5 Ámbitos de actuación para la mejora de la seguridad en túneles

Como transposición al ordenamiento jurídico español de la citada norma europea, así como 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 jurídicamente, mediante la aprobación del Real Decreto 635/2006 de 6 de mayo [11], las condiciones de diseño y explotación de los túneles de las carreteras del Estado, que engloban 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 este orden de cosas, entre las medidas de seguridad adoptadas se establece en el apartado 2.3.1 del Anexo I del Real Decreto 635/2006, los siguiente:

“Salvo razones debidamente justificadas, en túneles de más de 1.000 metros se empleará pavimento de hormigón con aditivos coloreantes para que proporcionen suficiente contraste con las marcas viales”

Por otra parte, el artículo 4 de dicha norma establece:

“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 esto 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 (no confundir con sobrecoste), lo cual no es el caso, ya que este tipo de pavimento ha sido empleada con éxito en carreteras así como en puertos y aeropuertos con una vida útil de 30 años o más con operaciones mínimas de conservación, por lo que su coste total es menor que el de los ejecutados con mezcla bituminosa.

Asimismo, en el caso 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, en los apartados siguientes se resumen los resultados de varios ensayos e investigaciones llevadas a cabo sobre este tema.

5. Comportamiento de los materiales para firmes frente al fuego

Se resumen a continuación se exponen los resultados de distintos ensayos y análisis sobre el comportamiento frente al fuego de las mezclas bituminosas y del hormigón.

5.1. Ensayo de contenido de ligante de mezcla bituminosas 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 [12]. Posteriormente, el Centro Nacional de Tec-

nología del Asfalto (NCAT), también de Estados Unidos, puso a punto en 1994 un ensayo de ignición en horno, como alternativa al tradicional de extracción de 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 [13].

Dicho método ha sido recogido en la norma ASTM D6307 [14] y posteriormente en la norma UNE-EN 12697-39 [15].

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 demuestra que las mezclas bituminosas arden, y a unas temperaturas por debajo de las 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 esta comunicación 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. 6). 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 pérdida 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 ligante, convirtiéndose en un conjunto de partículas sueltas o fácilmente disgregables limitadas por una corteza formada por restos de combustión del betún.

CONSIDERACIONES EN TORNO AL COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO EN LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES FRENTE AL FUEGO



(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

Figura 6 Ensayo de ignición para determinar el contenido de ligante de una mezcla bituminosa

En la fig. 7 pueden verse las curvas de evolución de la temperatura y de la pérdida de masa en uno de los ensayos realizados.

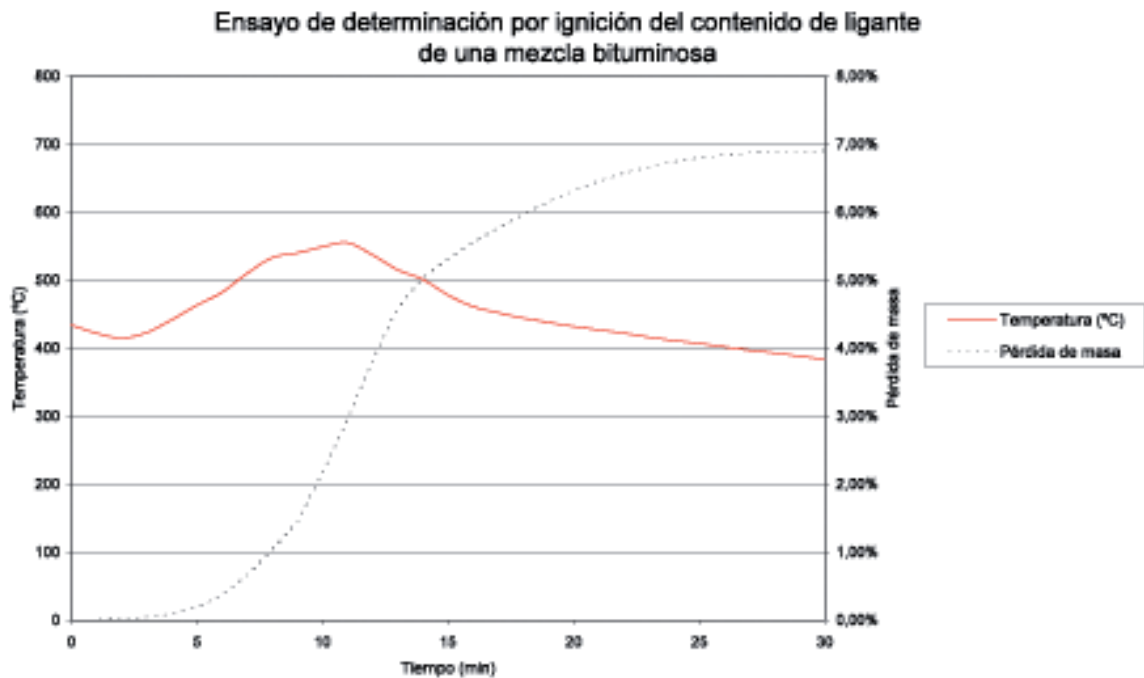


Figura 7 Curvas de evolución de la temperatura y de la pérdida de masa en un ensayo de ignición de una mezcla bituminosa

5.2. Universidad de Cergy-Pontoise (Francia)

El Laboratorio de Ciencia de los Materiales y Construcción de la Universidad de Cergy-Pontoise realizó un estudio experimental detallado sobre el comportamiento al fuego de una serie de probetas de mezcla bituminosa y hormigón por encargo de CEMBUREAU. Los resultados fueron publicados en 2003.

Uno de los méritos de este trabajo consiste en ser el primero en el que se ha abordado de forma controlada el comportamiento de las mezclas bituminosas en caso de incendio, sometiéndolas a una curva de fuego normalizada (ISO 834) y midiendo con termopares la evolución de las temperaturas a diferentes alturas. A efectos comparativos se han realizado los mismos ensayos sobre probetas de hormigón [16].

En el estudio se detallan las características de los materiales empleados (dosificación y demás propiedades), las dimensiones de las probetas (la mayor parte de las de mezcla bituminosa, prismáticas de 50 x 18 x 5 cm), el horno utilizado para calentar las mismas, la disposición de los termopares y la evolución de la temperatura en las probetas, así como un análisis de los gases emitidos durante la combustión de la mezcla bituminosa [17]. Toda la información está complementada con numerosas

fotografías y gráficos. Algunas de ellas se reproducen en las figuras 8 a 12.

Las conclusiones más relevantes a las que se llega en este estudio son 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 incendio 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, 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.



Figura 8 Probeta de mezcla bituminosa antes del ensayo, en el interior del horno



Figura 9 Probeta de mezcla bituminosa durante su ignición



Figura 10 Probeta de mezcla bituminosa tras el ensayo



Figura 11 Probetas de mezcla bituminosa (izqda.) y hormigón (dcha.) tras el ensayo

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

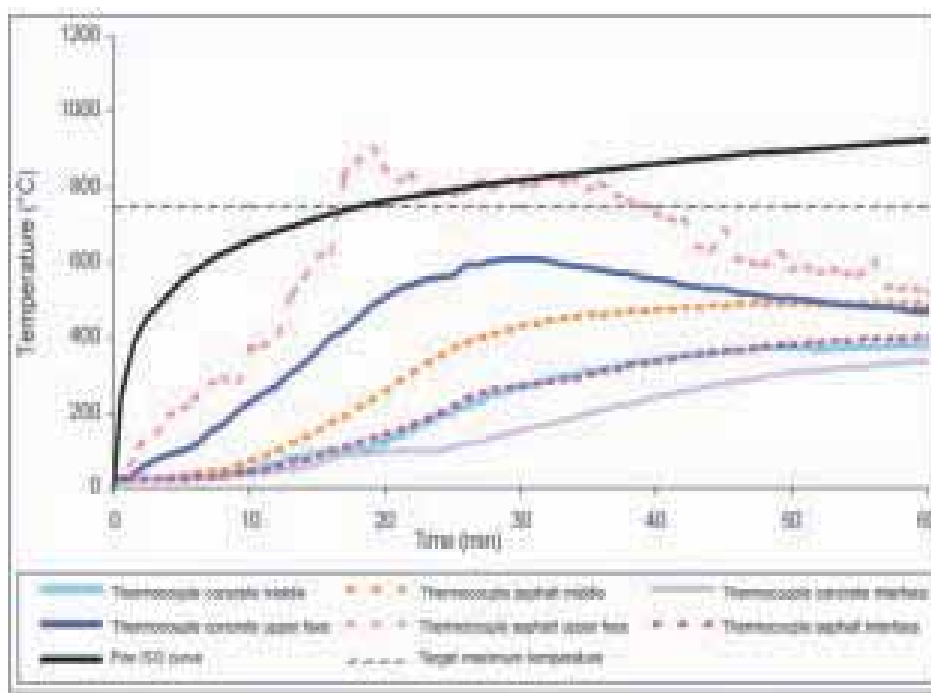


Figura 12 Temperaturas medidas en probetas de mezcla bituminosa y hormigón para una curva de fuego ISO 834

El aspecto que presentaban las probetas de mezcla bituminosa tras el ensayo se corresponde con el obtenido en los ensayos de determinación del contenido de ligante (fig. 6).

5.3. Instituto Federal de Investigación de carreteras de Alemania (BASt)

El Instituto Federal de Investigación de Carreteras (Bundesanstalt für Straßenwesen, BASt) de Alemania publicó en 2003 un estudio bibliográfico sobre el comportamiento de los firmes bituminosos y de hormigón en túneles frente a los incendios [18].

Dicho estudio analiza solamente bibliografía alemana, y quizás por coincidir en su año de publicación con el de la Universidad de Cergy – Pontoise no hace referencia a los resultados de este último.

En el documento se analizan detalles de una serie de incendios en túneles de carretera desde 1949 hasta 2000. Se indica que los daños en las capas bituminosas alcanzaron varios centímetros de profundidad.

Se menciona también que, como consecuencia de la catástrofe del túnel de Mont Blanc, se había planteado la cuestión de la posible influencia en la carga de fuego de los materiales del firme a temperaturas muy altas y, en particular, de las mezclas bituminosas. Ello se debía a que no se había aclarado oficialmente la causa por la que se quemaron ocho vehículos estacionados a una distancia de unos 300 m del incendio en la parte italiana. El techo de la galería en esos 300 m 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.

Se describen algunos ensayos llevados a cabo en Alemania. Los resultados son muy discutibles, puesto que debido a la forma de aplicar el calor (por ejemplo, haciendo arder cajas de madera apiladas sobre el pavimento) la temperatura de la superficie de la mezcla bituminosa no superaba los 400 °C. Aun así, la mezcla bituminosa se había dañado en una profundidad de 1 cm.

A la vista de estos hechos recogidos en el propio estudio, resulta cuanto menos sorprendente, y totalmente en desacuerdo con el comportamiento de los firmes bituminosos en casos reales, que entre las conclusiones del mismo se incluyan las siguientes:

- Las capas bituminosas, después de un incendio, presentan únicamente una decoloración oscura en su superficie.
- Las capas bituminosas no se queman ni se fisuran aun estando sometidas a una temperatura muy elevada durante un tiempo prolongado, al igual que tampoco se rompen.
- Las capas bituminosas no son conductoras del fuego.
- En el caso de incendios en túneles de carreteras, únicamente existe peligro inmediato para las personas debido a las llamas y al calor a una distancia relativamente corta del fuego.
- Debido al escaso porcentaje de betún en la mezcla y a la estabilidad calorífica del producto, no se producirá ningún reblandecimiento digno de mencionarse en el firme.

5.4. Centro Científico y Tecnológico de la Construcción de Francia (CSTB)

El Centro Científico y Tecnológico de la Construcción de Francia (Centre Scientifique et Technique du Batiment, CSTB) realizó, a petición de la USIRF⁶ (Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française), un análisis bibliográfico y un estudio

⁶ Dentro de la Asociación USIRF tienen un papel muy destacado los principales fabricantes de betunes y mezclas bituminosas de Francia

experimental sobre el comportamiento al fuego de los pavimentos bituminosos en caso de incendio en túneles de carretera [20] [21].

Los ensayos consistieron en colocar las probetas (de 60 x 40 x 10 cm) bajo un panel radiante (de 60 x 60 cm) que aplicaba a las mismas un flujo de calor entre 20 y 50KW/m².

Cada uno de los ensayos se daba por finalizado cuando un termopar, situado a 15 mm 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, transformándose en un conjunto de áridos fácilmente disgregable, mientras que en la superficie se formaba una corteza de restos de betún. Este comportamiento es similar al observado en los ensayos de ignición (fig. 6) o en los llevados a cabo en la Universidad de Cergy – Pontoise (fig. 11). 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, aparte de la inflamación de las probetas, se observó la formación de humos oscuros, densos y con fuerte olor.

A pesar de lo discutible de estos resultados, en el informe se dan 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 produce 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 han realizado a temperaturas relativamente bajas. En cuanto a la última, 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 (a título de ejemplo, y como ya se ha mencionado, en el túnel del Mont-Blanc ardió en algunos puntos el espesor total de 10 cm de mezclas bituminosas). A pesar de ello, ha sido ampliamente difundida, a pesar de su falta de rigor.

La falta de protección proporcionada por la “corteza inerte” es fácilmente comprobable no solamente mediante ensayos de laboratorio, sino también por el comportamiento real de las mezclas bituminosas en caso de fuego, aun siendo éste de poca severidad. A título de ejemplo, en la figura 13 pueden apreciarse los daños causados en un pavimento urbano por el incendio de un automóvil.



Figura 13 Daños causados en un pavimento urbano por el incendio de un automóvil

5.5. Proyecto Samaris (Sustainable and Advanced MAterial for Road InfraStructure)

SAMARIS fue un proyecto de investigación europeo en el que participaron 23 socios, financiado en parte por la Comunidad Europea. Fue desarrollado entre 2002 y 2005. Se dividió en dos líneas principales: estructuras y firmes. Uno de sus principales objetivos fue incentivar el uso de materiales reciclados y alternativos en firmes, identificando como pueden ser seleccionados y ensayados a fin de asegurar un comportamiento satisfactorio, tanto desde el punto de vista medioambiental como funcional.

Dentro de los trabajos desarrollados en el proyecto, uno de ellos fue el de la reacción al fuego de distintos materiales para firmes [22]. Existían dudas sobre si los

resultados de los ensayos especificados en la Norma 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” [23] podían discriminar suficientemente los distintos tipos de mezclas bituminosas. Por ello se decidió someter tres aglomerados diferentes (una mezcla drenante, una mezcla bituminosa densa y un mastic asfáltico) a dos ensayos:

- el de la Norma 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” [24], que es uno de los prescritos en la mencionada Norma UNE - EN 13501-1
- el de la Norma ISO 5660-1. “Ensayos de fuego – Reacción al fuego - Parte 1: Tasa de liberación de calor de productos de construcción (método del calorímetro de cono)” [25] (fig. 14).



Figura 14 Ignición de una probeta de mezcla bituminosa en el ensayo del calorímetro de cono

Dentro de los resultados del proyecto pueden destacarse los siguientes:

- El flujo calorífico crítico para iniciarse una combustión sostenida de una mezcla bituminosa densa 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 serían bastante mayores en el caso de un camión ardiendo; y que en un espacio confinado, como en 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.
- Dicho valor del flujo crítico es bastante superior al máximo que en general suelen proporcionar los equipos de panel radiante, que es del orden de unos 12 kW/m^2 . Por ello, los resultados obtenidos con estos últimos no son

válidos para evaluar el comportamiento frente al fuego de las mezclas bituminosas, salvo que se introduzcan modificaciones en los mismos.

- El tiempo para que se inicie la combustión sostenida disminuye notablemente al aumentar el flujo calorífico, de forma que con 35 kW/m^2 puede ser superior a 10 minutos, mientras que con 75 kW/m^2 es inferior a 1 minuto.

5.6. Centro de Ingeniería de Seguridad frente al fuego de la Universidad de Edimburgo

El Centro de Ingeniería de Seguridad frente al Fuego de la Universidad de Edimburgo ha desarrollado unos ensayos de ignición de mezclas bituminosas utilizando también el método del calorímetro de cono [26], a fin de hacer una caracterización completa del comportamiento frente al fuego de las mismas y obtener parámetros para simular incendios dentro de un túnel empleando métodos de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD).

Se ensayaron probetas de mezcla bituminosa (Stone Mastic Asphalt), con un 6,3 % de ligante, las cuales fueron sometidas a flujos de calor de 60, 50, 40 y 30 kW/m^2 . Dichas probetas tenían unas dimensiones de 100 x 100 x 60 mm.

Los principales resultados de los ensayos fueron los siguientes:

- La combustión de las mezclas se inicia con flujos de calor inferiores a 40 kW/m^2 . 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/m^2 se obtuvo una tasa de liberación de calor de casi 100 kW/m^2 . Es de esperar que con flujos mayores también crezca dicha tasa.

Como complemento a lo anterior habría que añadir que estos resultados se obtuvieron con probetas de 60 mm de espesor. En incendios reales se ha observado que la profundidad de mezcla afectada por las llamas puede llegar a ser mayor, lo cual se traduciría en un desprendimiento de calor todavía más elevado.

En el informe de los resultados se destaca que durante los ensayos de fuego en el túnel de Runehamar en Noruega en 2003 se obtuvieron registros de los flujos de

calor en distintos puntos cerca de las 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, con máximos de casi 100 kW/m².

En consecuencia, incluso si la combustión de la mezcla bituminosa se limita a la zona inmediatamente 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, aún si solamente se vieses afectados los 6 cm superiores de mezcla, lo que 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 toda la superficie afectada llegar a alcanzar flujos de calor de 20 MW.

6. Comportamiento del hormigón frente al fuego - Fenómenos de desconchado (Spalling)

El hormigón es incombustible. Se ha dicho, con razón, que entre los materiales habituales utilizados en construcción, es el que resiste mejor el ataque del fuego [27]. Ejemplos como el incendio del edificio Windsor en Madrid lo han demostrado sobradamente. 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: 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 pueden experimentar modificaciones importantes [28]: a partir de los 100 °C el agua libre o capilar incluida en la masa del mismo empieza a evaporarse, retar-

dando 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 [29] se admite para comprobar la capacidad resistente de una sección de hormigón que ha estado 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 importante 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 que 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 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. 15, 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.

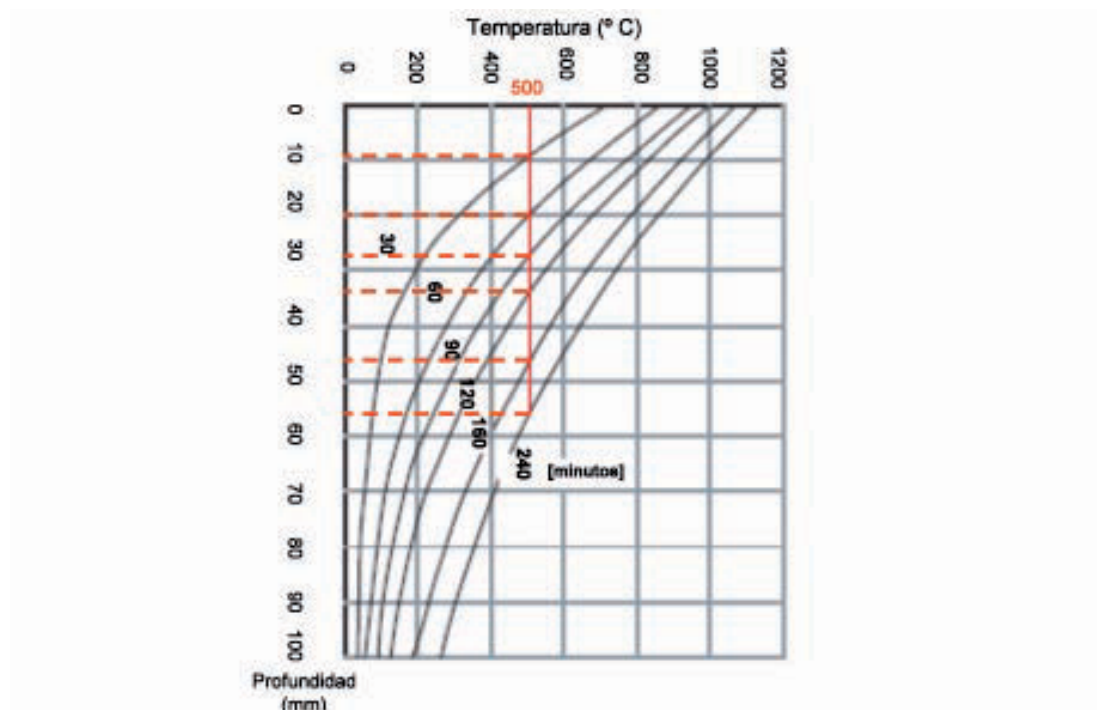


Figura 15 Curvas de variación de temperatura con la profundidad en una losa de hormigón durante un incendio (Instrucción EHE-08)

Por ello, en muchos casos los daños causados por el fuego afectan solamente a una capa superficial.

Aparte de la pérdida de resistencia del hormigón en sí, 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 generalizado el emplear su denominación inglesa (spalling).

Se han desarrollado varias teorías para explicar la aparición del spalling [30]:

- 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, a fin de reducir 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 [30]. Es una práctica usual en los hormigones que deben resistir a las heladas 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, en los pavimentos no hay efectos como los de la gravedad o los de presión del terreno circundante, que pueden favorecer el desprendimiento de fragmentos.

La influencia de la resistencia mecánica en el distinto 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, contruidos 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 más reducida [27].

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), cuyos resultados se publicaron en 2006 [30]. 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 supongan un problema importante en un pavimento de hormigón.

Los autores de esta comunicación 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 minutos⁷, no se observó ningún desconchado, aunque sí una pérdida de masa como consecuencia de la evaporación del agua absorbida.



Figura 15 Probeta de hormigón para firmes, conservada en cámara de curado y sometida después a un calentamiento a 350 – 450 °C en horno

⁷ Los desconchados, en caso de producirse, suelen aparecer durante los primeros 30 minutos después de iniciado el fuego

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 pueden ser el revestimiento o un falso techo.

El hormigón no afectado por las temperaturas 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.

7. Otras ventajas del uso de los pavimento de hormigón en túneles

Los pavimentos de hormigón en los túneles presentan otras ventajas que también inciden en la seguridad de los mismos y que hacen que además que su empleo suponga una inversión ventajosa, con menor coste total, por su mantenimiento y explotación más reducidos.

Entre dichas ventajas en relación con el pavimento asfáltico se encuentran las siguientes:

- Superficie más clara y luminosa (fig. 17), lo que permite optimizar el coste de la iluminación, ahorrando energía y gasto durante toda la vida de servicio del túnel.
- Menor deterioro mecánico y mayor vida útil, lo que redunda en un menor coste total.



Figura 17 Túnel Juan Carlos I (Vielha)

Las ventajas, en relación con el pavimento asfáltico, que tienen que ver con la seguridad del usuario de la vía son:

- Reducción de la distancia de frenado.
- Disminución de posibles accidentes durante las operaciones de conservación, ya que éstas son infrecuentes.

8. Resumen y conclusiones

En la mayor parte de los incendios importantes ocurridos en los últimos años en túneles con pavimento con mezclas bituminosas, éstas han presentado longitudes importantes con deterioros de varios centímetros de profundidad. En algunos puntos del túnel del Mont-Blanc el fuego consumió el espesor total de 10 cm de aglomerado.

Este comportamiento se debe a la combustibilidad del betún, que tiene además un fuerte poder calorífico. Haciendo uso de esta propiedad se ha puesto a punto un método de ensayo para determinar el contenido de ligante de las mezclas bituminosas por ignición de las mismas. La temperatura a la que se inicia la combustión, entre 350 y 450 °C, se alcanza fácilmente con el flujo calorífico generado en la mayoría de los incendios, en los que las temperaturas máximas pueden superar los 1000 °C.

Los efectos del fuego sobre el aglomerado se observan también, como es lógico, en incendios producidos al aire libre. Sin embargo, en un espacio confinado, como es un túnel, se ven agravados por el calor irradiado por la capa de humo caliente y por las paredes del túnel, que aumentan todavía más el flujo calorífico sobre el pavimento.

Por ello no es extraño que las longitudes afectadas sean bastante superiores a las ocupadas por los vehículos quemados durante el incendio. Así, por ejemplo, en el túnel de Mont-Blanc 1200 m de calzada experimentaron deterioros, mientras que ardieron 32 coches y 2 camiones, cuya longitud total no llega a 300 m.

No es tampoco descartable que haya también una transmisión de calor a través de la propia mezcla bituminosa. Ya se ha mencionado que, también en el túnel de Mont-Blanc, se quemaron ocho vehículos estacionados a una distancia de unos 300 m del incendio en la parte italiana, mientras que el techo de la galería en esos 300 m apenas presentaba daños; mientras que en el incendio del túnel de Fréjus 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.

Al quemarse, las mezclas bituminosas aumentan la carga de fuego. La superficie afectada directamente bajo un camión ardiendo puede desprender un calor equivalente al de dos o tres vehículos ligeros.

Por otra parte, la combustión del betún genera humos y gases de gran toxicidad. Según un informe de una de las comisiones que se crearon después del incendio de Mont-Blanc “el calor era de tal magnitud que el asfalto se inflamó, precipitando la asfixia de la mayor parte de las víctimas”

Después de arder, la mezcla bituminosa pierde prácticamente toda su cohesión, disgregándose con gran facilidad y dificultando la circulación sobre la misma.

Por el contrario, 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. Por otra parte, los fenómenos de spalling no son preocupantes en los pavimentos, en los que se emplean hormigones de resistencias moderadas.

Las consideraciones anteriores se han visto avaladas por distintos estudios experimentales. Lógicamente, en éstos se deben tratar de reproducir las condiciones que se dan en los incendios reales. Los flujos caloríficos aplicados a las probetas deben tratar que se consiga una evolución de temperaturas similar a la de alguna de las curvas de fuego que figuran en las reglamentaciones; y, en cualquier caso, para poder analizar adecuadamente el comportamiento de las mezclas bituminosas frente al fuego, es preciso que se alcance la temperatura de combustión del betún.

Por ello, ensayos como los llevados a cabo por el CSTB en Francia, que se daban por finalizados cuando un termopar, situado a 15 mm de profundidad de la superficie expuesta a la radiación, indicaba 300 °C, creemos que carecen de representatividad. Pero incluso en estas condiciones, el núcleo de las probetas se convertía en un conjunto de partículas sueltas bajo una capa superficial de residuos de betún. Este mismo aspecto presentaban las probetas en otros ensayos, como los de la Universidad de Cergy – Pontoise (fig. 10) o los de determinación del contenido de ligante por ignición (fig. 6).

En consecuencia, carece de fundamento la afirmación, ampliamente difundida [18] [31] [32] 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 con el residuo del betún que ha ardido que impide que se propague el fuego debajo de la misma. La realidad demuestra que 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 todo lo anterior, puede concluirse que en los túneles, en caso de incendio, los pavimentos de hormigón tienen un mayor nivel de seguridad que los de mezcla bituminosa.

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 las mismas den lugar a una protección equivalente o mayor. A la vista de lo expuesto anteriormente, no parece que la sustitución del pavimento de hormigón por otro de mezcla bituminosa cumpla este condicionante.

En esta línea, la Federación de Bomberos de Francia opina [33] que "la simple lógica debería imponer la sustitución de las mezclas bituminosas por un material totalmente neutro como es el hormigón".

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, que arden y emiten gases tóxicos".

Bibliografía consultada

- [1] "Improving fire safety in tunnels: The concrete pavement solution". BIBM – 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] “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 y Ministère de l’Equipement, des Transports et du Logement, París, 1999
- [5] “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>
- [6] 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 de septiembre de 2001. Disponible en www.ge.ch/grandconseil/data/texte/M01375A.pdf
- [7] 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
- [8] “Fire Curves”. Promat Tunnel, Tisselt (Bélgica). Disponible en <http://www.promat-tunnel.com/en/hydrocarbon-hcm-hc-rabt-rws.aspx>
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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
- [12] “Rapid Test Methods for Field Control of Highway Construction“. NCHRP Report 103, Highway Research Board, Washington D.C., 1970
- [13] “Asphalt Content Test Offers Improvement Over Solvents”. TR News nº 180, septiembre – octubre 1995
- [14] “ASTM D6307 - 05 Standard Test Method for Asphalt Content of Hot-Mix Asphalt by Ignition Method”. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2005
- [15] “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
- [16] Noumowé, A.: “Characterisation of Asphalt Exposed to High Temperature:

- Application to Fire Case of Asphalt Pavement”. Université de Cergy-Pontoise, París, 2003
- [17] 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, 2003
- [18] 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
- [19] 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
- [20] Demouge, F. et al : “Comportement au feu des enrobés bitumineux. Volet expérimental – Partie n° I”. Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB). París, octubre - noviembre 2005
- [21] 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
- [22] 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
- [23] “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
- [24] “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
- [25] “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
- [26] 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 de abril de 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%202006b.pdf

- [27] 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
- [28] Khoury, G.A.: ‘‘Passive fire protection in tunnels’’. Concrete, febrero 2003
- [29] ‘‘Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. Anejo 6: Recomendaciones para la protección adicional contra el fuego de elementos estructurales’’. Ministerio de Fomento, Madrid, 2008
- [30] 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
- [31] De Lathawer, W.: ‘‘Effects of Pavement on Fires in Road Tunnels’’. Dossiers de AIPCR-PIARC, Routes - Roads, nº 334, 2007
- [32] Felipe, 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
- [33] ‘‘Les feux de tunnel’’. Soldats du Feu, París, 8 de diciembre de 2009