

Comportamiento al fuego de mezclas bituminosas a escala real: Proyecto Pavirex

La longitud de los túneles construidos en Europa, para su uso en transporte, supera los 15.000 km. Si tenemos en cuenta este dato, resulta obvio que es preciso dedicar grandes esfuerzos para mejorar la seguridad de los usuarios. Uno de los riesgos reales es el inicio de un escenario de fuego, con las consecuencias tanto de vidas humanas derivadas de un posible descontrol del mismo como económicas. La adecuada construcción del pavimento puede contribuir a minimizar las consecuencias del desastre, tanto en cuanto a la respuesta frente al fuego como en la toxicidad de los humos generados. La respuesta del pavimento frente al fuego está ligado a una circunstancia excepcional, que puede alcanzar dimensiones de catástrofe, por lo que cualquier mejora puede traducirse en la salvación de vidas humanas. En la presente comunicación se presentan los resultados obtenidos en el estudio del comportamiento al fuego de las mezclas asfálticas realizado dentro del proyecto PAVIREX, subvencionado por el Ministerio de Economía y Competitividad en su convocatoria Innpacto 2011. Se aborda el análisis del comportamiento frente al fuego de mezclas bituminosas convencionales y mejoradas a diferentes niveles: a escala de laboratorio, mediante el uso del cono calorimétrico, normalizado según la norma ISO 5660¹ y mediante un ensayo de propagación diseñado específicamente para el estudio. Con los materiales que mejores resultados han dado en esta primera fase se ha realizado una prueba a escala real con diferentes cargas de fuego en el Túnel experimental de San Pedro de Anes (Siero- Asturias). La conclusión más importante radica en la constatación de que no existe, en ninguno de los casos estudiados, una propagación del incendio a través de la mezcla bituminosa. Se detecta únicamente una degradación superficial de la mezcla en aquellas zonas en las que, debido a una fuente externa de calor (>400°C), llega a arder.

Palabras clave: comportamiento al fuego, mezclas bituminosas, Pavirex, retardantes a la llama, Túnel experimental de San Pedro de Anes.

Most roads and tunnels in Europe use asphalt mixtures as upper layer due to their excellent properties, but the fire performance of these materials has been always a subject of discussion. In this paper the study of the fire performance of different asphalt mixes (conventional and modified with different additives) is reported. The study was carried out at laboratory and full scale. Asphalt mixtures were evaluated at laboratory level using two different tests: The cone calorimeter test, as described in the ISO 5660, and a new test developed to study fire propagation in asphalt mixtures slabs. Then, the best rated modified mixture and the conventional one were tested at full scale using different fire loads in the San Pedro de Anes test tunnel (Asturias, Spain). The main conclusion obtained from the different tests carried out during this four years project is that there is no fire propagation over asphalt mixtures, but a surface degradation in those zones were, due to an external heat source (> 400 °C), asphalt burns. Results showed in this paper have been obtained in the development of the PAVIREX project, granted by the Spanish "Ministerio de Economía y Competitividad", call "Innpacto 2011".

Keywords: fire performance, asphalt mixtures, Pavirex project, flame retardant, San Pedro de Anes test tunnel.

Marisol Barral, mbarral@campezo.com
Ramón Romera,
Campezo Obras y Servicios, S. A.

Fernando Garrido, fernando.garrido@tunneltest.com)
TST

Celestino González, Inmaculada Álvarez,
celes@gjt.uniovi.es
Universidad de Oviedo

M^a Eugenia Muñoz, mariaeugenia.munoz@ehu.es
Antxon Santamaría,
Zita Palmillas,
POLYMAT, UPV/EHU

Ignacio Pérez, ignacio.perez@cepsa.com
CEPSA-PROAS

Sara Villanueva, sara.villanueva@tecnalia.com
TECNALIA

Comportamiento al fuego de mezclas bituminosas a escala real: Proyecto Pavirex

1. Introducción

La negativa repercusión que los accidentes tienen en la vida social constituye una grave preocupación, por sus consecuencias humanas, sociales y económicas. En el caso concreto de los túneles, cuando se trata de mejorar la seguridad en su interior se incide, prioritariamente, en aspectos tales como la ventilación, iluminación, sistemas de comunicación o sistemas de evacuación, sin duda aspectos de gran importancia. Sin embargo, uno de los aspectos a los que no se ha dado la suficiente importancia hasta hace algunos años es, a la utilización de pavimentos que mejoren la seguridad en su interior, en caso de escenarios de fuego desencadenados como consecuencia de accidentes producidos en el interior del túnel ^{2,3,4}.

La adecuada construcción del pavimento, puede contribuir a minimizar las consecuencias del desastre, como por ejemplo en la posible propagación del fuego o en la toxicidad de los humos. Esta misma preocupación se puede trasladar a otras infraestructuras de similares características a los túneles, como por ejemplo naves industriales con elevada carga de fuego teórica o la pavimentación de parkings soterrados en los que el código técnico de la edificación establece una clasificación en EUROCLASES, para los revestimientos de suelos de dicha infraestructura ⁵.

El firme de la mayoría de las carreteras y túneles está compuesto por mezclas bituminosas, ya que es el material que presenta un mejor comportamiento, especialmente en categorías de tráfico pesado. Ahora bien, la utilización de formulaciones convencionales puede ser modificada por ejemplo, mediante la sustitución de una parte de las cargas convencionales por diversas cargas, que actúan como retardantes a la llama, de cara a mejorar la reacción al fuego de las mezclas bituminosas.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, dentro del proyecto PAVIREX, se ha estudiado esta problemática en profundidad, trabajando en dos líneas diferentes:

- Estudiar el comportamiento al fuego de las mezclas asfálticas convencionales para comprobar así su idoneidad como capas de rodaduras en túneles.
- Mejorar, de forma paralela, el comportamiento al fuego de las mezclas asfálticas mediante la utilización de distintos aditivos retardantes a la llama.

Para mejorar el comportamiento al fuego de las mezclas asfálticas se han utilizado distintos tipos de retardantes como hidróxidos de aluminio y magnesio, ácido polifosfórico o diferentes fosfatos y polifosfatos. Estos materiales se han utilizado unas veces modificando los ligantes bituminosos y otras directamente en las mezclas bituminosas en sustitución del polvo mineral.

En todos los casos se ha estudiado la influencia de los distintos aditivos tanto en el comportamiento al fuego de los materiales diseñados como en su comportamiento como ligantes o mezclas bituminosas que deben mantener unas prestaciones adecuadas para su uso en pavimentos de carretera.

Los estudios de comportamiento al fuego se han realizado a dos niveles:

- A nivel de laboratorio y a dos escalas según el tamaño de la muestra: uno, que denominaremos a pequeña escala, mediante el uso del cono calorimétrico normalizado según la norma ISO 5660 ¹ con probetas de dimensiones de 100 x 100 x 10 mm y otro, a escala media, de creación propia que consiste en la aplicación de una llama directa sobre probetas de mezcla bituminosa, de dimensiones de 410 x 260 x 50 mm para poder comprobar la posible propagación de la llama en estos materiales.
- A escala real, en un túnel especialmente diseñado para poder realizar este tipo de ensayos de manera controlada, sometiendo tanto a mezclas convencionales como mezclas mejoradas a distintas cargas de fuego, incluida la combustión de un coche sobre las mismas.

Dada la magnitud de los trabajos realizados durante el desarrollo del proyecto en esta comunicación nos vamos a centrar únicamente en la descripción de los resultados obtenidos en estos estudios de comportamiento al fuego en los que se han obtenido resultados muy interesantes.

2. Mezclas bituminosas ensayadas

El tipo de mezcla bituminosa estudiada ha sido una mezcla AC16 surf 50/70 S sílice. Como aditivo retardante a la llama se ha seleccionado, tras un completo estudio previo, un fosfinato. Se han ensayado distintas composiciones de retardante en la mezcla bituminosa como sustitución parcial del filler, con el fin de optimizar la formulación. Estas composiciones de re-

tardante a la llama sobre la mezcla bituminosa han sido del 0,7%, 1,0% y 1,4%. Así mismo, se ha analizado la muestra sin aditivar, que llamaremos “blanco”.

3. Estudio de la reacción al fuego de mezclas bituminosas diseñadas a nivel de laboratorio

3.1 Estudio a pequeña escala - Ensayo con el cono calorimétrico

Como se ha citado anteriormente, el equipamiento que se ha empleado para evaluar la respuesta frente al fuego de las mezclas bituminosas que se han diseñado a lo largo del proyecto ha sido el cono calorimétrico.

El cono calorimétrico es un equipo muy versátil ya que aporta mucha información sobre la reacción al fuego de distintos materiales y permite reproducir las condiciones de distintos escenarios de incendios (cargas de fuego de 0 a 100 kW/m²) midiendo en un sólo ensayo parámetros tales como el *t_{ig}* (segundos) *time to Ignition*, tiempo al cual tiene lugar la ignición (segundos); *HRR Heat Release Rate*, velocidad de desprendimiento de calor (kW/m²); *pHRR* máximo calor liberado (kW/m²); *t_{peak}* (segundos) tiempo al cual tiene lugar el desprendimiento máximo de calor, *pHRR*; *THR Total Heat Release*, Calor total liberado (MJ/m²) y *MARHE Maximum Average of Heat Emission*, velocidad máxima del calor medio emitido (kW/m²), entre otros. Una representación esquemática del equipo se muestra en la Figura 1. A continuación se describen los aspectos más importantes en cuanto a las condiciones del ensayo realizado con este equipo:

Preparación de las mezclas bituminosas:

- Las mezclas bituminosas ensayadas fueron preparadas en el laboratorio a partir de probetas paralelepípedas de

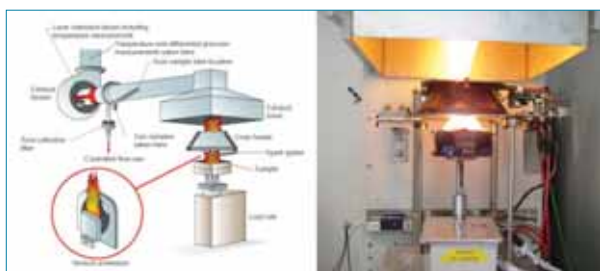


Figura 1: Representación esquemática del cono calorimétrico.

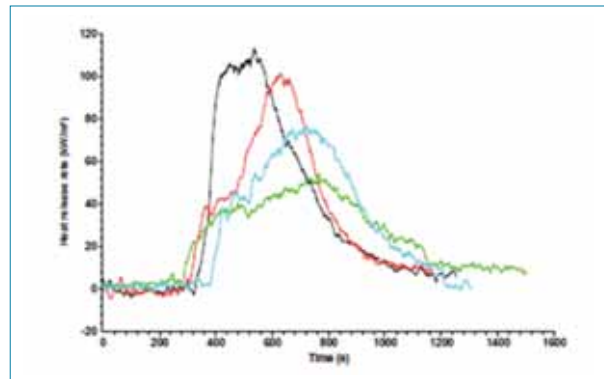


Figura 2: Evolución de la velocidad de desprendimiento de calor (HRR) frente al tiempo para el blanco (curva negra), y las aditivadas con retardante a la llama al 1,4% (curva azul), al 1,0% (curva verde) y al 0,7% (curva roja).

iguales dimensiones que las que se utilizan para el ensayo de rodadura, posteriormente fueron cortadas a las dimensiones de 100 x100 mm con un espesor de aproximadamente 10 mm, de manera que no se sobrepasen los 250 g de peso máximo.

- Las muestras antes de ensayarlas se han acondicionado a masa constante a una temperatura de 23 ± 2 °C y a una humedad relativa de 50 ± 5 %, de acuerdo a la norma ISO 554⁶. Se considera que se alcanza la masa constante cuando dos operaciones de pesado sucesivas, llevadas a cabo en un intervalo de 24 h, no difieren en más de 0,1% de masa de la pieza de ensayo o 0,1 g.

Condiciones del ensayo:

- Los ensayos se han realizado por triplicado para cada formulación siendo los valores mostrados en la tabla la media aritmética de los tres ensayos.
- Para la realización de los ensayos se ha seleccionado un flujo de calor de 40 kW/m².
- El flujo de calor de radiación del cono se ha calculado a una distancia de 25 mm desde la base del cono radiante hasta la superficie de la muestra.

Tal y como se observa en las curvas donde se representa la velocidad de desprendimiento de calor (HRR) frente al tiempo (Figura 2) las proporciones de retardante a la llama más efectivas son: la del 1,0% (curva verde) y 1,4% (curva azul). En el primer caso, el valor máximo de la velocidad de desprendimiento de calor (HRR_{peak} , 53.9 kW/m²) es el me-

Comportamiento al fuego de mezclas bituminosas a escala real: Proyecto Pavirex



Figura 3: Cámara NBS

nor de todas las formulaciones estudiadas, aunque la ignición tiene lugar antes (283 segundos). En el segundo caso, aunque el valor máximo de desprendimiento de calor (HRR_{peak} , 76.59 kW/m^2) es más alto que en el caso anterior, la ignición es más tardía (378 segundos), hecho que es beneficioso para el ensayo a gran escala. A la vista de los resultados, son las formulaciones con 1,0% y 1,4% de fosfinato las que se ensayarán a gran escala.

3.2 Toxicidad y opacidad de los humos de las mezclas bituminosas

Tras caracterizar las distintas formulaciones en el cono calorimétrico, se han preparado probetas con las mismas proporciones pero con distintas dimensiones, $75 \times 75 \text{ mm}$ con un espesor de aproximadamente 16 mm para no sobrepasar la masa máxima de 250 g, para ser ensayadas en la cámara NBS a un flujo de 50 kW/m^2 y sin llama directa (condiciones semejantes a las que va a sufrir la mezcla bituminosa en el ensayo del TST).

La cámara NBS (Figura 3) es un dispositivo que determina, a partir del parámetro de densidad óptica específica, D_s , la cantidad de humos que se generan durante la combustión de un material en el interior de una cámara cerrada, cuando éste está sometido a una fuente de calor radiante. Los parámetros que se determinan son:

- D_s (4min), densidad óptica específica a los 4 minutos
- VOF4, oscurecimiento durante los 4 primeros minutos
- D_{smax} , densidad óptica específica máxima

Tras la caracterización de las muestras, lo que se observa es (Tabla 1):

- El “blanco” y la muestra con un 1,0% del retardante, no arden (tig). La combustión es parcial y por ello el valor de densidad óptica máxima (D_{smax}) para estas dos formulaciones es el más alto (humos más opacos).
- Las muestras que contienen 0,7% y 1,4% del retardante, arden. La combustión es total y en ambos casos la densidad óptica máxima (D_{smax}) es menor (humos menos opacos).
- La muestra sin retardante, es la que tiene una menor opacidad de humos a tiempos bajos (menor valor de D_s al minuto 4 y VOF4). Se comporta mejor en los primeros minutos de ensayo. Sin embargo luego alcanza un valor de densidad óptica máximo (D_{smax}) muy alto a tiempos más cortos que el resto de formulaciones.
- Por otra parte, en el resto de formulaciones, la presencia del retardante empeora la opacidad de los humos en los primeros minutos de ensayo (mayor valor de D_s en el minuto 4 y VOF4, durante los 4 primeros minutos).

En resumen, podemos decir que, en estas condiciones de ensayo, la muestra “blanco” y la que contiene un 1,0% de retardante, presentan un mayor valor de densidad óptica máxima (D_{smax}), siendo menor este valor para las muestras que contienen un 0,7 y 1,4% de retardante. Por otra parte, la introducción del retardante en las distintas formulaciones incide negativamente en la densidad óptica a tiempos bajos, durante los 4 primeros minutos (VOF4) y en el minuto 4 de ensayo (D_s 4 min), siendo estos valores más altos.

A continuación se muestra en la Figura 4 la evolución de la densidad óptica específica con el tiempo para hacer más visual los resultados. Como se puede ver las formulaciones sin retardante y con un 1,0% son las que presentan mayores valores de densidad óptica específica.

Con el fin de determinar la naturaleza de los gases que se producen durante la combustión de estas cuatro mezclas se ha acoplado a la cámara NBS un equipo de espectroscopía infrarroja, FTIR, con el cual se han tomado muestras en el

Tabla 1: Principales valores correspondientes a los parámetros de opacidad realizados a las muestras aditivadas y sin aditivar, en la cámara NBS con un flujo de 50 kW/m² y sin llama.

Formulación	t _g (s)	t _{fo} (s)	D _s (4min)	D _{Smax}	Tiempo D _{Smax} (s)	VOF 4
sin retardante	-	-	29,12	608,03	797	28,3
0,7% retardante	389	FINAL	41,5	343,5	780	44,9
1,0% retardante	-	-	45,1	619,79	1200	41,4
1,4% retardante	no reg	FINAL	45	410,67	914	46,5

interior de la cámara a los 4, 8 y 20 minutos de ensayo. Las probetas han sido ensayadas con y sin llama directa a un flujo de 50 kW/m². Siendo los resultados obtenidos los que se observan en el gráfico de barras (Figura 5). En esta gráfica está representado el valor del Índice Convencional de Toxicidad, CIT_g, de cada una de las formulaciones a distintos tiempos (4, 8 y 20 minutos) y en dos condiciones diferentes de ensayo (con y sin llama). Este índice, es función de la concentración de cada gas en el interior de la cámara y de la concentración de referencia para este gas, C_i (límite para las personas expuestas a los componentes gaseosos. Peligro inmediato para la vida o la salud). Siendo ocho, el número de gases que se determinan (CO₂, CO, HBr, HCl, HCN, HF, NO₂ y SO₂) e indicando peligrosidad cuando el valor de CIT_g es igual a 1:

$$CIT_g = 0,0805 \times 10^{-6} \sum ci/Ci$$

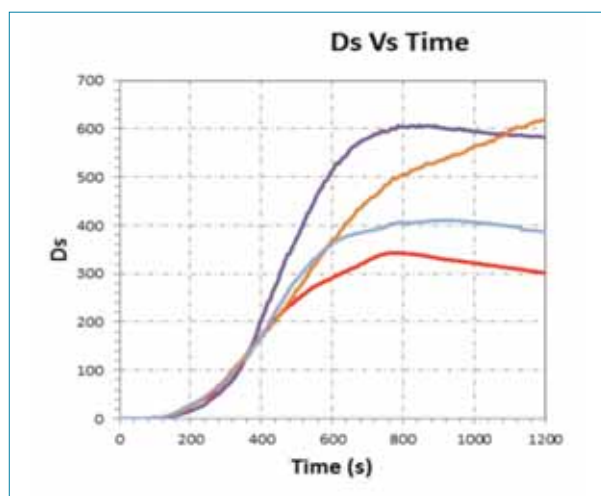


Figura 4: Evolución de la Densidad óptica específica, D_s, frente al tiempo en el ensayo NBS para la mezcla bituminosa sin el aditivo ignífugo (curva morada), y las aditivadas con 0,7 % (curva roja), 1,0% (curva naranja) y 1,4% (curva azul).

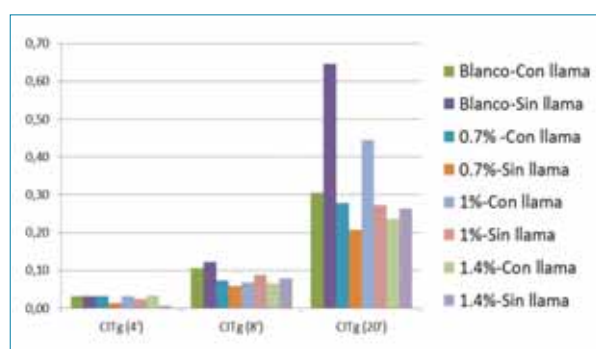


Figura 5: Valores de CIT_g obtenidos al combustionar en la cámara NBS+FTIR a un flujo de 50 kW/m² con y sin llama las mezclas bituminosas sin el aditivo ignífugo, y las aditivadas con 1,4, 1,0 y 0,7 % de retardante a la llama.

- En todos los casos se observa que el Índice Convencional de toxicidad (CIT_g) es inferior a la unidad (situación de peligrosidad).
- En nuestro caso, los gases que mayor contribución han tenido al valor de CIT_g han sido: CO₂, CO y SO₂.
- El valor de CIT_g a los 4 minutos es prácticamente el mismo para todas las formulaciones excepto para la formulación con el 1,4% de retardante que presenta un menor valor cuando el ensayo se realiza sin llama.
- El "blanco" es la que presenta un valor mayor de CIT_g a los 8 minutos, tanto si el ensayo se realiza con o sin llama.
- Cuando el ensayo se realiza sin llama, la fórmula que mayor valor de CIT_g proporciona a los 20 minutos es de nuevo el del "blanco". Sin embargo, cuando el ensayo se realiza con llama, es la fórmula con 1,0% de aditivo la que presenta un peor comportamiento.

En conclusión, se puede decir que, aunque ninguna de las formulaciones alcanza un valor de Índice Convencional de Toxicidad, CIT_g igual a uno (indicando peligrosidad), es la

Comportamiento al fuego de mezclas bituminosas a escala real: Proyecto Pavirex

fórmula de referencia (sin llama) y la que contiene un 1,0% de retardante (con llama) las que presentan un peor comportamiento a tiempos largos de ensayo (20 minutos). Siendo las diferencias entre las formulaciones muy pequeñas a tiempos cortos (4 y 8 minutos).

3.3 Estudio a escala media - Ensayo de creación propia

Se pensó en diseñar un ensayo sencillo y económico con la idea de simular lo que posteriormente se iba a realizar a escala real, con muestras de un mayor tamaño que permitieran apreciar si existe o no propagación del fuego a lo largo de la superficie de la probeta. Así mismo, aplicar distintas cargas de fuego directas sobre la mezcla bituminosa a través de un soplete alimentado con gas butano (protocolo de ignición en este caso a través de una llama directa en contacto con la mezcla bituminosa).

En todos los ensayos lo que se ha registrado son medidas continuas de temperatura con sensores de temperatura de tipo K.

Tras un arduo trabajo de puesta a punto del ensayo, realizando distintas pruebas con distintos materiales se llegó a establecer la siguiente metodología de trabajo como la más adecuada por ser susceptible de ser extrapolada a incendios a gran escala.

Procedimiento del ensayo

- Dimensiones de las probetas de mezclas bituminosas 410 mm x 260 mm con un espesor de 5 cm.
- Caudal de gas butano 114 mg/s ya que la potencia de fuego determinada a partir de ensayos con muestra patrón refractaria alcanzada fue de 0,8 MW/m².
- Distribución de los sensores de temperatura a lo largo de la superficie de la probeta (ver figura 6) y en profundidad (a 2,5 cm y 5 cm de profundidad).
- Colocación de una carga de 50 kPa ubicada próxima a la zona de fuego en la cara superior.
- En este ensayo se analiza la distribución de la temperatura tanto en superficie como a lo largo del espesor de la probeta bituminosa, aplicando calor en un extremo de la misma mediante llama directa de butano. Además de la colocación de sensores para el registro de temperatura,

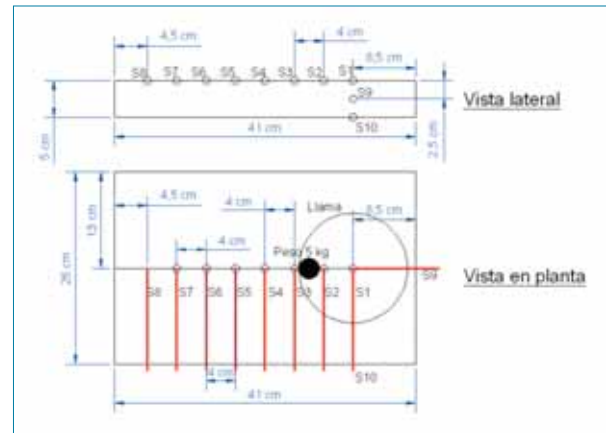


Figura 6: Distribución de los sensores de temperatura en superficie y en profundidad.

se ubica un peso de 50 kPa cerca del foco de calor simulando las cargas existentes sobre la mezcla bituminosa.

Los ensayos, en este caso, se han realizado sobre las tres formulaciones optimizadas según los resultados del cono calorimétrico, es decir, sobre muestras de mezcla bituminosa AC16S sílice sin aditivar (blanco), sobre la mezcla aditivada con un 1,0% de retardante y sobre la aditivada 1,4%.

La Figura 7 muestra el fuego aplicado durante el ensayo en la probeta "blanco", y el aspecto final de la muestra tras el ensayo. La presencia de diferentes tonalidades en la probeta se puede apreciar mejor en esta última imagen.

En el Figura 8 se muestra la evolución de la temperatura en los distintos sensores colocados en la superficie y en profundidad de la probeta durante el ensayo.

En la Figura 9 se muestran dos fotografías, después de los ensayos de las muestras bituminosas aditivadas con los dos porcentajes del 1,0% y del 1,4% de retardante.

La Figura 10 muestra los resultados para las tres mezclas y para el sensor de temperatura colocado en superficie, bajo la llama (gráfico de la izquierda). Se observa que se alcanzan



Figura 7: Muestra de AC16S sílice sin aditivar "blanco", durante el ensayo (izda.) después del ensayo (dcha.)

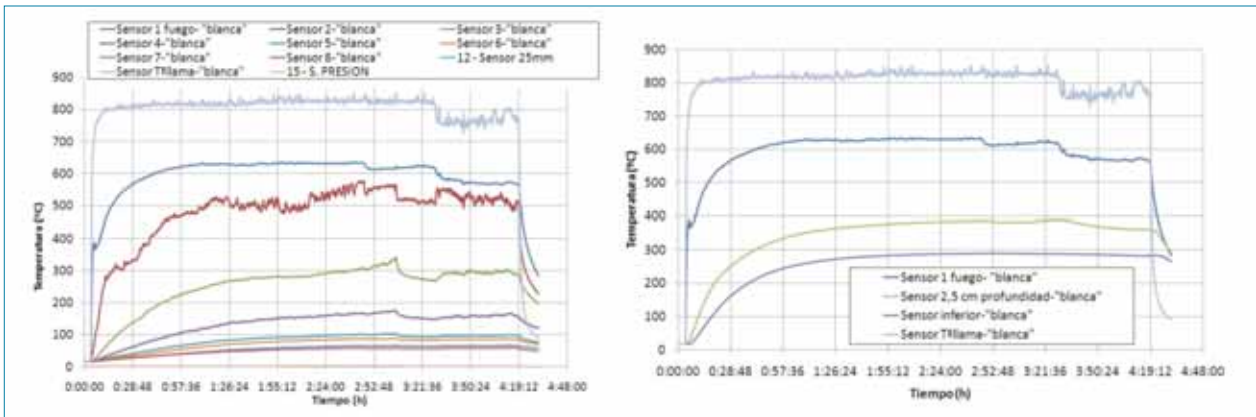


Figura 8: Evolución de la temperatura de los sensores colocados en la superficie (izq.) y en profundidad (dcha.) de la probeta "blanco".



Figura 9: Muestra de AC16S sílice tras el ensayo aditivada al 1,0% (izda.) y con el 1,4% (dcha.)

mayores temperaturas en la probeta con un 1,0% de aditivo (por encima de 700°C), siendo bastante próximos los resultados para la probeta del 1,4% de aditivo (valores próximos a 700°C) y menor temperatura para la probeta "blanco" (sobre 635°C de máxima).

En el sensor de temperatura nº 2, ubicado a 4 cm de distancia del que está bajo la llama, los mayores registros de temperatura se producen en la probeta con un 1,4% de aditivo (con temperaturas próximas a 600 °C), y la probeta con

un 1,0% de aditivo presenta valores de temperatura próximos a 500 °C. La probeta "blanco" alcanza valores de temperatura intermedios entre las probetas con aditivo.

Como puede apreciarse en el Figura 10 (gráfico inferior), a 16 cm de distancia del foco las temperaturas tienden a igualarse en las tres probetas y han descendido ya al entorno de 100 °C.

Para el caso de los sensores más alejados del foco de calor, ubicados en el extremo opuesto (sensor 6, 7 y 8), las mayores temperaturas se registran en la probeta "blanco", aunque en la parte final del ensayo se igualan bastante en las tres probetas, si bien las temperaturas en esta parte de la muestra no pasan de 90 °C. Por tanto, en la parte superficial de la probeta, las temperaturas próximas al foco de calor son mayores en las probetas que tienen aditivo; en el centro de la muestra y hacia el extremo opuesto al fuego se registran mayores temperaturas en la probeta "blanco".

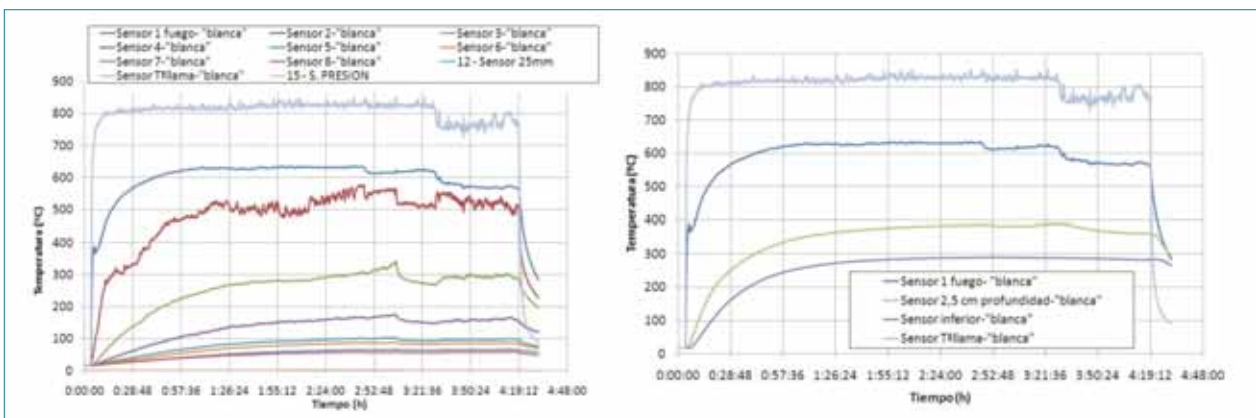


Figura 10: Temperatura vs tiempo del sensor bajo llama (izq.) y del sensor a 16 cm (nº 5) del foco de llama (dcha.) para las tres muestras de mezcla bituminosa: sin aditivar "blanco" (curva roja), 1,0% (curva azul) y 1,4% (curva verde) de aditivo.

Comportamiento al fuego de mezclas bituminosas a escala real: Proyecto Pavirex

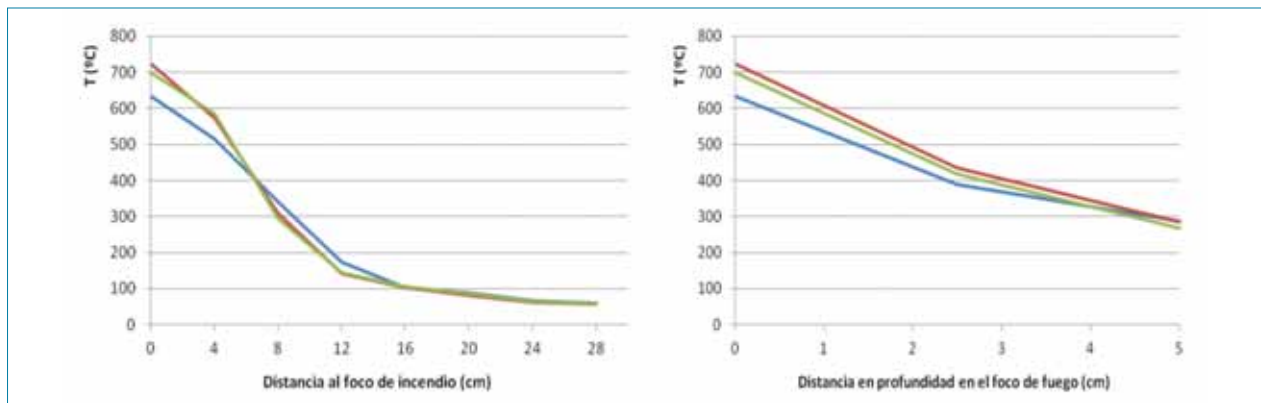


Figura 11: Temperaturas de equilibrio registradas en los distintos sensores de temperatura superficiales y en profundidad para las tres mezclas: blanco (curva azul), 1,0% de retardante (curva roja), 1,4% de retardante (curva verde).

En cuanto a los sensores interiores, el que está ubicado bajo la llama a 2,5 cm de profundidad las mayores temperaturas registradas corresponden a la probeta del 1,0% de aditivo (sobre 430 °C), siendo las más bajas las de la probeta "blanco" (390 °C).

El sensor inferior bajo la llama, en la cara inferior de la muestra, presenta valores muy similares (entre 280 y 290 °C) entre la probeta "blanco" y la probeta del 1,0% de aditivo, que se corresponden con los mayores valores de temperatura registrados en la parte inferior de la probeta.

En la Figura 11 se resumen las temperaturas de equilibrio alcanzadas en cada sensor para las tres mezclas asfálticas objeto de ensayo.

En resumen, se observa que el blanco alcanza menores temperaturas de equilibrio (633 a 514 °C) cuanto más próximo está del foco de incendio que las mezclas aditivadas (722 a 573 °C), y lo mismo ocurre en cuanto a las temperaturas de equilibrio alcanzadas a lo largo del espesor de la probeta en el foco de incendio. Este comportamiento puede deberse a que en el blanco se produce una combustión más temprana de ciertos componentes orgánicos, lo que hace que la temperatura no aumente tanto.

Sin embargo, el blanco llega a mayores temperaturas superficiales de equilibrio (340-104 °C) a medida que se aleja del foco de incendio, a partir de unos 7 cm de distancia del foco que es cuando se produce el cambio hasta los 16 cm de distancia respecto al foco de incendio. Posteriormente el comportamiento es muy similar en las tres mezclas (temperaturas sobre los 100 °C).

En cuanto a las dos mezclas con retardante 1,0% y 1,4%, no se aprecian diferencias sustanciales en su comportamien-

to tanto en superficie como en profundidad, quizás en este último caso se registran menores temperaturas de equilibrio en la mezcla con el 1,4% de retardante. En cuanto al aspecto superficial se observa que las mezclas con aditivo crean una capa superficial de aspecto brillante que no se detecta en la mezcla "blanco".

4. Ensayos a escala real realizados en el túnel experimental de TST

Los tres tipos de mezclas bituminosas estudiadas a escala media de laboratorio (blanco, 1,0% y 1,4% de retardante) se han ensayado posteriormente a escala real en un centro de ensayos especializado (Tunnel Safety Testing).

4.1 Descripción del Túnel experimental de la empresa TST

El Centro, así como sus instalaciones, pertenecen a la Fundación Barredo, dependiente del Gobierno del Principado de Asturias, y es operado, en régimen de concesión, por la empresa Tunnel Safety Testing, S. A, de capital privado.

En este caso concreto se ha utilizado el túnel de ensayos, que se trata de un falso túnel de hormigón, semienterrado, de dimensiones equivalentes a las de un túnel carretero de dos carriles, y que incorpora además dos estaciones de ventilación, una galería de emergencia y servicio inferior (ver Figura 12), así como tres salidas de emergencia. Tiene una longitud total de 600 m y mide 8,1 m de alto por 9,5 m de ancho. La galería de emergencia mide 4 m de ancho por 2,50 m de alto. Está dotado de una máxima flexibilidad en cuanto



Figura 12: Sección del túnel de ensayos.

a su ventilación, de manera que puedan ensayarse los distintos sistemas de ventilación más usuales y modernos.

En este túnel pueden realizarse diferentes tipos de ensayos, pero en este estudio se ha utilizado para realizar ensayos de resistencia al fuego de materiales constructivos para túneles como son las mezclas bituminosas, en condiciones reales.

El sistema de control y adquisición de datos del túnel es una parte fundamental de la instalación, y se utiliza tanto para el control y regulación de los distintos sistemas de ventilación, como para la adquisición y registro de datos e imágenes durante los ensayos. Se trata de un sistema descentralizado basado en 13 Estaciones de Monitorización y Control (EMCs), localizadas en la galería de servicio cada 40-50 m, además de dos unidades para control de las estaciones de ventilación. Todas las unidades se comunican con la estación de control central mediante un anillo cerrado de fibra óptica.

4.2 Tipología de ensayos a escala real

Los ensayos se llevaron a cabo en el mes de enero del año 2014 a lo largo de una semana con diferentes cargas de fuego.

Las mezclas bituminosas se prepararon en la planta Asfáltica de Campezo Obras y Servicios S.A. ubicada en Quintana del Puente (Palencia). Se prepararon un total de 16 placas de mezcla bituminosa de un espesor de 5 cm. Todas ellas se extendieron sobre unas placas de hormigón alveolar con unas dimensiones determinadas para su posterior traslado y manipulación en el túnel. Las dimensiones de las placas de mezcla bituminosa fueron: 12 placas de 1,2 x 3 m (para cada ensayo se utilizaron dos placas por lo que la superficie de la mezcla ensayada fue de 14,4 m²). Para el ensayo con el automóvil, se utilizaron 4 placas de una superficie de 1,2 x 4 m cada una de ellas.

Las cargas de fuego fueron de distintos tipos; se ensayaron mezclas con dos torretas de nueve pallets de madera se-

cos (dimensiones de cada pallet 0,80 x 1,20 m), estimando una carga de fuego de la torre de 9 pallets de aproximadamente 0,6 MW/m², en el lateral derecho se colocaron dos neumáticos de coche. Se hicieron ensayos con cargas de fuego solo neumáticos; un total de 16 neumáticos de coche y 7 neumáticos de camión, donde la carga de fuego estimada fue de 5-6 MW/m². Por último, se realizó un ensayo quemando un automóvil, donde la carga de fuego estimada fue de 0,5 a 0,8 MW/m².

La velocidad del aire en el interior del túnel, utilizada para la realización de los ensayos, fue de 3-4 m/s que equivale a 10,8-14,4 km/h, (velocidad crítica).

La duración de los ensayos fue entre 35-55 min dependiendo de la carga de fuego aplicada. Se terminaba el ensayo bien con la autoextinción de la llama o bien cuando el termopar colocado, bajo la carga de fuego o el siguiente más próximo comenzaban a registrar bajada de temperatura y cuando esta era inferior a 200 °C se procedía a la extinción.

El protocolo de ignición utilizado fue colocar unos pequeños recipientes con combustible debajo de la carga de fuego que se prendían mediante la aplicación de una llama directa y controlada.

Para analizar el efecto del fuego sobre la mezcla bituminosa se ha llevado a cabo un control de temperaturas utilizando dos sistemas de medición:

- Sensores de temperatura (termopares): Se han instalado seis sensores, dos en cada uno de los emplazamientos de-

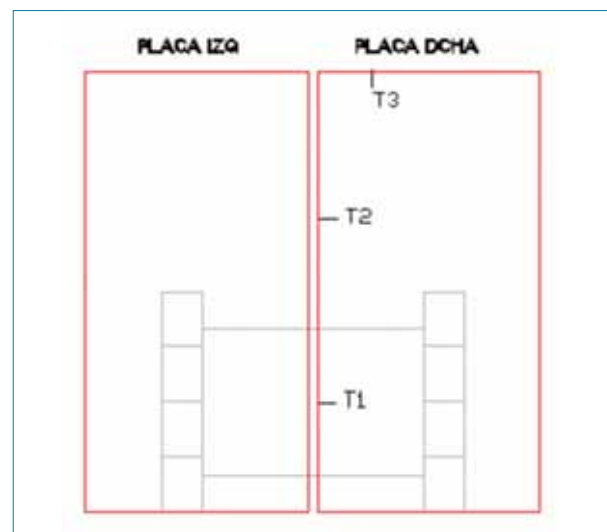


Figura 13: Disposición de los termopares.

Comportamiento al fuego de mezclas bituminosas a escala real: Proyecto Pavirex



Figura 14: Fotos de la disposición de la carga de fuego: torres de pallets y neumáticos sobre las placas de mezcla bituminosa.



Figura 15: Fotos durante el ensayo de las distintas muestras ensayadas.

signados como T1, T2 y T3 en la figura 13, uno de ellos en superficie y otro a 2,5 cm de profundidad.

- Cámara termográfica: Con la que se ha grabado y registrado la evolución de las temperaturas a nivel de superficie durante todo el ensayo.

En la Figura 14 se muestra una serie de fotografías donde se puede ver la disposición del ensayo en función de las distintas cargas de fuego utilizadas. En todos los casos los sensores de temperatura se mantuvieron como se muestra en la Figura 13.

4.3 Resultados de los ensayos realizados con carga de fuego: dos torretas de nueve pallets

Se ensayaron con esta disposición y carga de fuego los tres tipos de mezclas bituminosas que hemos venido analizando a lo largo de esta comunicación, es decir, el AC16S sílice sin aditivo, con retardante a la llama al 1,0% y con el 1,4%. La carga de fuego estimada en este caso es de 1,2 MW/m². En la Figura 15 se muestra una serie de fotografías realizadas durante el ensayo.

A continuación en las figuras 16a, 17a y 18a se muestran los gráficos de la evolución de la temperatura en superficie durante el ensayo medidas con la cámara termográfica, además se presenta una fotografía tomada por dicha cámara en el instante de mayor temperatura registrada en el punto A. Y en las figuras 16b, 17b y 18b se muestran los resultados de la evolución de la temperatura en superficie y profundidad de los termopares colocados en las placas de mezcla bituminosa según el esquema de la Figura 13.

En este caso se alcanzan temperaturas máximas de hasta 350 °C, sin detectarse propagación del incendio a través de la mezcla bituminosa en ningún momento. Los mayores picos de temperatura se alcanzan entre los 5-15 min desde la ignición. Se observa que a los 10 min el punto C mas distanciado de la carga de fuego llega a alcanzar temperaturas de 300 °C debido a las llamas que se orientan en el sentido de

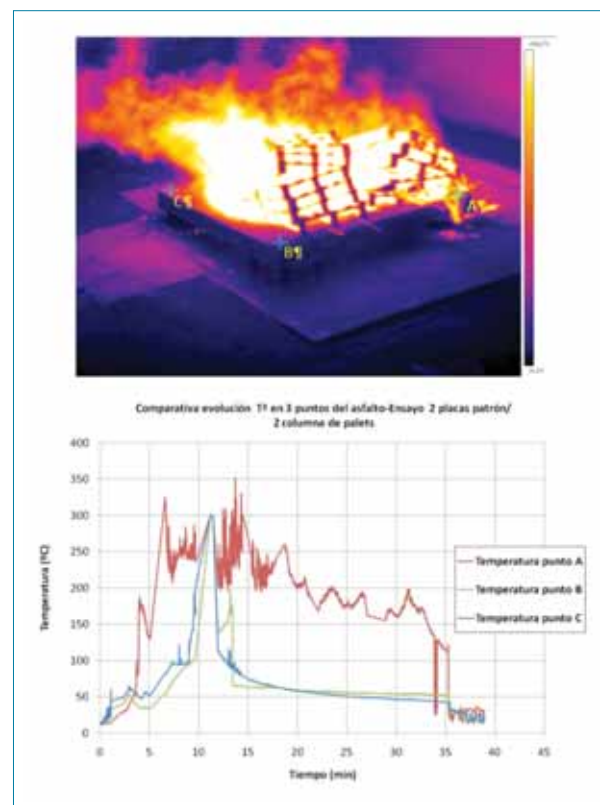


Figura 16a: Evolución de la temperatura superficial con la cámara termográfica del blanco. La foto termográfica se corresponde con el momento de mayor temperatura registrado en el punto A.

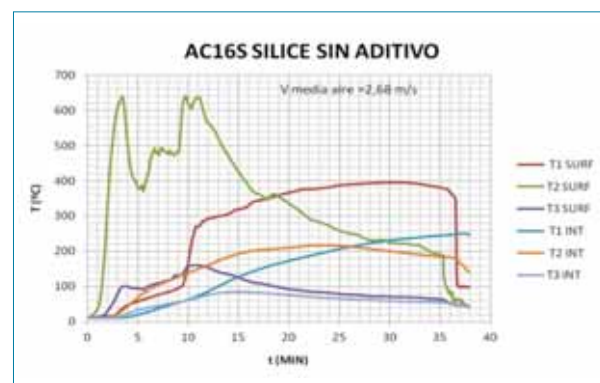


Figura 16b: Evolución de la temperatura superficial y en profundidad del blanco con los sensores de temperaturas ubicados en las placas de mezcla bituminosa según el esquema de la Figura 13.

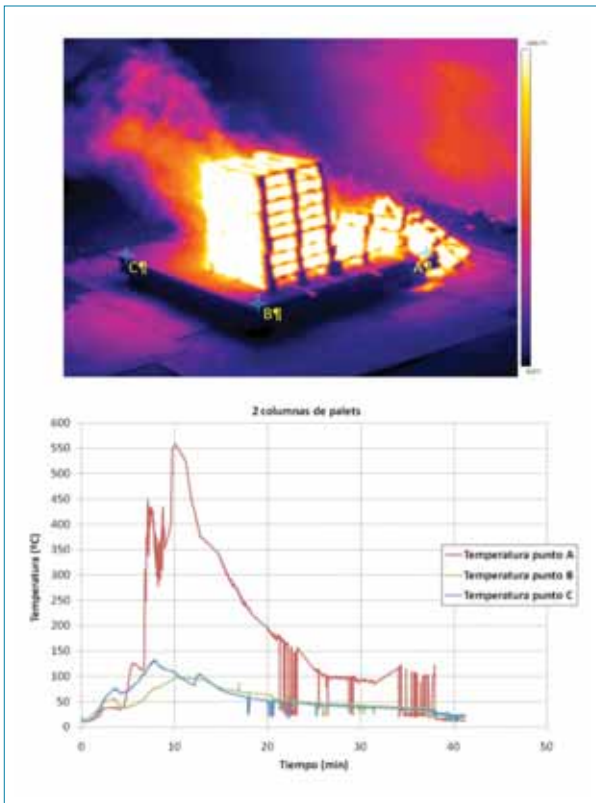


Figura 17a: Evolución de la temperatura superficial con la cámara termográfica de la mezcla con el 1,0% de aditivo. La foto termográfica se corresponde con el momento de mayor temperatura registrado en el punto A.

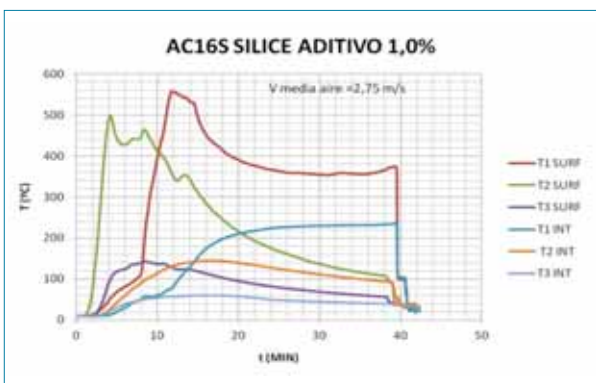


Figura 17b: Evolución de la temperatura superficial y en profundidad de la mezcla aditivada con el 1,0% con los sensores de temperaturas ubicados en las placas de mezcla bituminosa, según el esquema de la Figura 13.

la ventilación de aire en el túnel, como se puede apreciar en fotografía termográfica de la Figura 16a.

Analizando ahora los resultados de los sensores de temperatura colocados en las placas de mezcla bituminosa, se observa que el termopar superficial colocado a mayor distancia del foco de incendio (T3) no llega a alcanzar temperaturas supe-

riores a 180 °C y, el termopar que mayores temperaturas registra es el T2 superficial siendo estas temperaturas cercanas a los 650 °C entre 2-12 min de ensayo. En cuanto a los termopares colocados a mitad del espesor de la mezcla bituminosa y ubicados en las mismas posiciones de los T1, T2 y T3 superficiales, se observa que ninguno supera temperaturas superio-

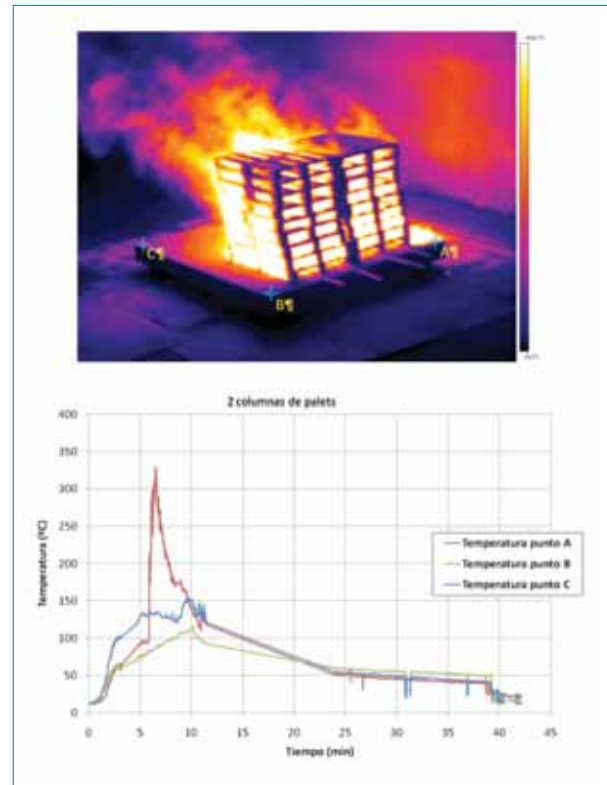


Figura 18a: Evolución de la temperatura superficial con la cámara termográfica de la mezcla con el 1,4% de aditivo. La foto termográfica se corresponde con el momento de mayor temperatura registrado en el punto A.

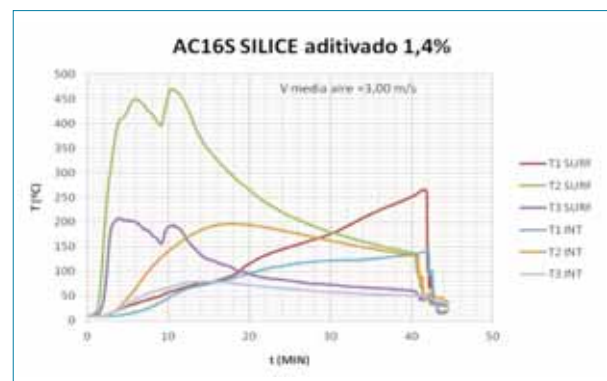


Figura 18b: Evolución de la temperatura superficial y en profundidad de la mezcla aditivada con el 1,4% con los sensores de temperaturas ubicados en las placas de mezcla bituminosa según el esquema de la Figura 13.

Comportamiento al fuego de mezclas bituminosas a escala real: Proyecto Pavirex

res a 250 °C, siendo el termopar T1 el que se encuentra colocado justo debajo del foco del incendio, el que se encuentra más próximo de éstas temperaturas a tiempo final del ensayo.

En las muestras aditivadas se observa que las temperaturas en superficie obtenida a través de la cámara termográfica, se mantienen por debajo de 150 °C a poca distancia del foco (punto B). La temperatura máxima registrada alcanza los 550 °C para la mezcla aditivada al 1,0% a los 10 min de desarrollo del ensayo y para la aditivada al 1,4% hasta 350 °C a los 6-7 min de desarrollo del ensayo.

Además, en las mezclas aditivadas se observa que la mayor temperatura superficial se alcanza en los primeros 5-10 min a poca distancia del foco (punto A) cayendo bruscamente seguidamente, en mayor medida para la mezcla aditivada al 1,4%. Sin embargo, la mezcla sin aditivar mantiene la temperatura promedio de 280 °C durante más tiempo hasta unos 15 min. disminuyendo posteriormente de forma paulatina.

Si ahora analizamos los sensores de temperatura ubicados en las placas de mezcla bituminosa, se observa que se alcanzan mayores temperaturas en las mezclas aditivadas con el 1,0% (máximas de unos 550 °C a los 12 min de ensayo en el T1). Para la muestra con aditivo al 1,4% se alcanzan máxima de 470 °C a los 10 min de ensayo en el T2. Los sensores colocados en profundidad no llegan a alcanzar temperaturas superiores a los 200 °C para la muestra con el 1,4% de aditivo ni a los 160 °C para la muestra con el 1,0% de aditivo. Por lo que esto demuestra que el daño es superficial como se puede observar en la fotografías de la Figura 19.

En la Figura 19 se presenta una serie de fotografías del estado del firme antes y después del incendio.

Se observa un deterioro superficial en el foco del fuego, al no verse propagación del mismo a lo largo de la plancha de mezcla bituminosa, el resto de la superficie se encuentra en perfecto estado.

Aunque es muy difícil extraer una conclusión unívoca debido a que si bien, la carga de fuego fue la misma para las



Figura 19: Estado superficial de la mezcla bituminosa: antes del ensayo (izq.), después del ensayo de fuego, blanco (medio) y mezcla aditivada (dcha.)

tres mezclas, el comportamiento de la carga durante el desarrollo del incendio fue distinto y en consecuencia las temperaturas registradas en los termopares de las placas variaron. Se podría concluir, que fijándonos en los datos registrados en el termopar T2 (el que mayores temperaturas registró), el orden de las temperaturas alcanzadas fue el siguiente: blanco > mezcla aditivada al 1,0% > mezcla aditivada al 1,4%. Estos resultados no se corresponden con los obtenidos a escala media de laboratorio, sin embargo los resultados aportados por el cono calorimétrico nos indicaban un mejor comportamiento de las mezclas que contenían un 1,4% de retardante. En cuanto a los tiempos se observa que el blanco alcanza la mayor temperatura en el termopar T2 a los 3 min de inicio del ensayo, seguidamente la mezcla con el 1,0% de aditivo y en último lugar la mezcla aditivada con el 1,4%.

4.4 Resultados de los ensayos realizados con carga de fuego: neumáticos

Para este ensayo se colocaron tres torres de seis neumáticos de coche cada una y sobre éstas se apoyaron cinco ruedas de camión distribuidas de forma simétrica en cada placa, tal y como se muestra en la Figura 14 (foto dcha.). Este ensayo se realizó, al igual que el resto, con dos placas pero en este caso una de ellas era de hormigón y la otra de una mezcla bituminosa aditivada con el 1,0% de retardante.

La evolución de las temperaturas en superficie registradas con la cámara termográfica durante la prueba se pueden ver en la Figura 20a y en la Figura 20b evolución de la temperatura de los sensores colocados en la placa de mezcla bituminosa según el esquema de la Figura 13.

En la Figura 20a se observa que a poca distancia del foco de incendio las temperaturas apenas superan en algún momento los 100 °C (punto B y C) colocados en la placa de hormigón. Sin embargo en el punto A sobre la mezcla asfáltica se llegan a registrar temperaturas superficiales de hasta 500 °C.

En la Figura 20b se observa que la máxima temperatura superficial registrada en la mezcla bituminosa llega a los 800 °C, mayores temperaturas que con la carga de fuego de torres de pallets (550 °C) debido a la mayor carga de fuego del sistema de neumáticos utilizado (5-6 MW/m²). De nuevo se observa que no existe propagación de las llamas y que los sensores colocados en profundidad no llegan a alcanzar temperaturas superiores a los 250 °C. Lo que se observó en el

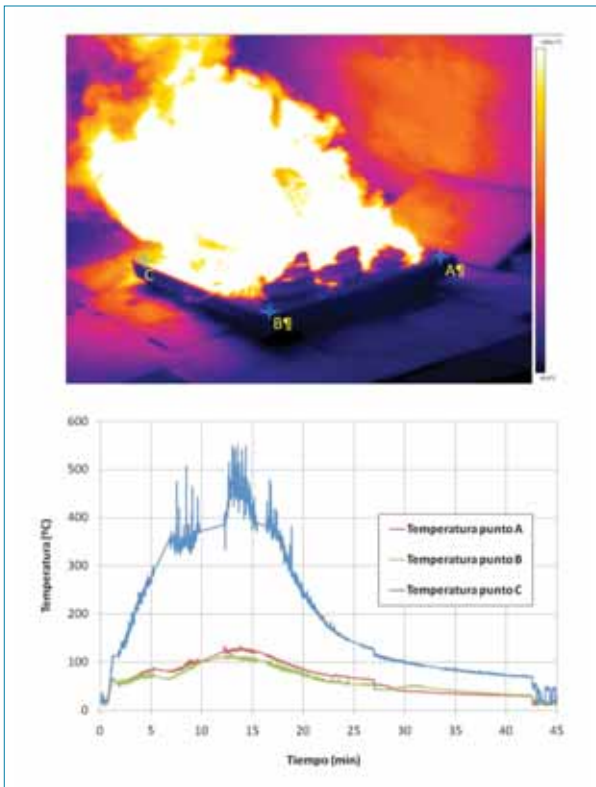


Figura 20a: Evolución de la temperatura superficial con cámara termográfica de la mezcla bituminosa AC16S aditivada con el 1,0% (placa más cercana a la pared) y hormigón (placa más alejada de la pared).

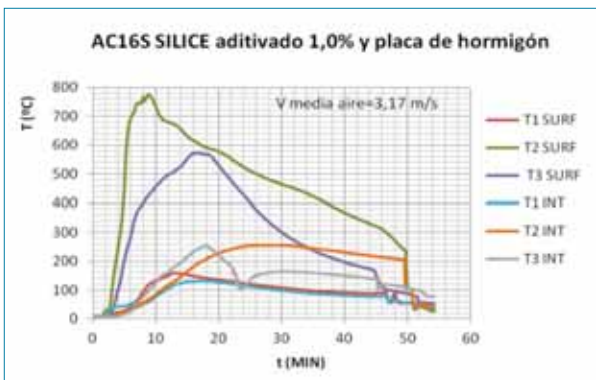


Figura 20b: Evolución de la temperatura superficial y en profundidad de la mezcla aditivada con el 1,0% y la placa de hormigón con los sensores de temperaturas ubicados en la placa de mezcla bituminosa según el esquema de la Figura 13.

ensayo fue proyecciones de pequeñas partículas de hormigón debido a la humedad interna del mismo, lo cual complicaría sustancialmente las labores de extinción del fuego.

En la Figura 21 se muestran unas fotografías del estado del hormigón y de la mezcla asfáltica después del ensayo. De nuevo el daño producido en la mezcla bituminosa es a nivel



Figura 21: Estado superficial de la mezcla bituminosa después del ensayo de fuego, mezcla aditivada (izq.) y placa de hormigón (dcha.)

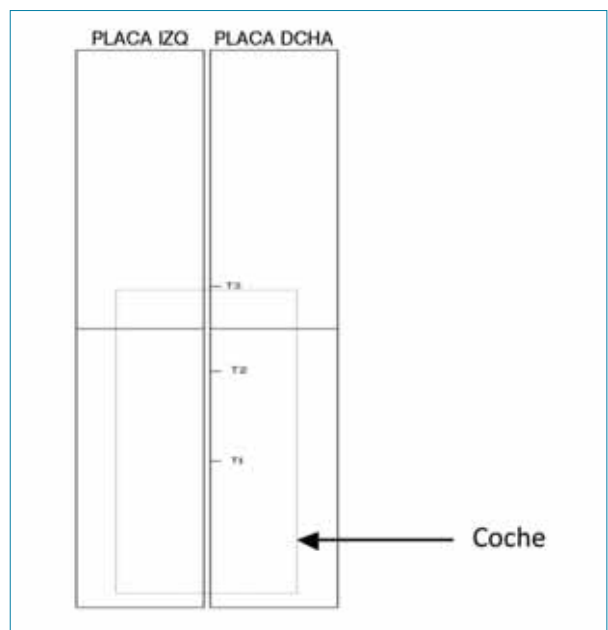


Figura 22: Esquema de la colocación de las placas de mezcla bituminosa, el coche y los sensores de temperatura.

superficial, no pudiendo decir lo mismo para el caso de la placa de hormigón ensayada.

4.5 Resultados de los ensayos realizados con carga de fuego: automóvil

La última prueba realizada consistió en la quema de un automóvil colocado sobre cuatro placas de mezcla bituminosa de 1,2 x 4 m con un porcentaje de aditivo retardante de 1,4 % cada una (véase esquema de la Figura 22). En este caso la carga de fuego estimada es de 0,5-0,8 MW/m².

Los sensores colocados en las placas de mezcla bituminosa detectaron durante la quema del coche los valores representados en la Figura 23. Como se puede ver la temperatura

Comportamiento al fuego de mezclas bituminosas a escala real: Proyecto Pavirex

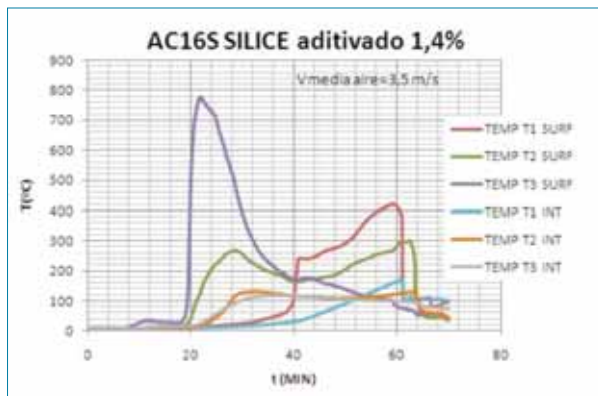


Figura 23: Sensores de temperatura en las placas de mezcla bituminosa o según la disposición de la Figura 22 en el ensayo con incendio de un coche.

máxima (casi 800 °C) se alcanza en el sensor T3 en superficie, aunque después la temperatura de este sensor baja muy bruscamente hasta unos 150 °C. Esto se debe a que el sensor T3 se encontraba colocado junto a la zona delantera del coche, cuyos neumáticos fueron los primeros en empezar a arder e incluso a explotar. El resto de sensores evolucionan de forma diferente entre sí a medida que se va quemando

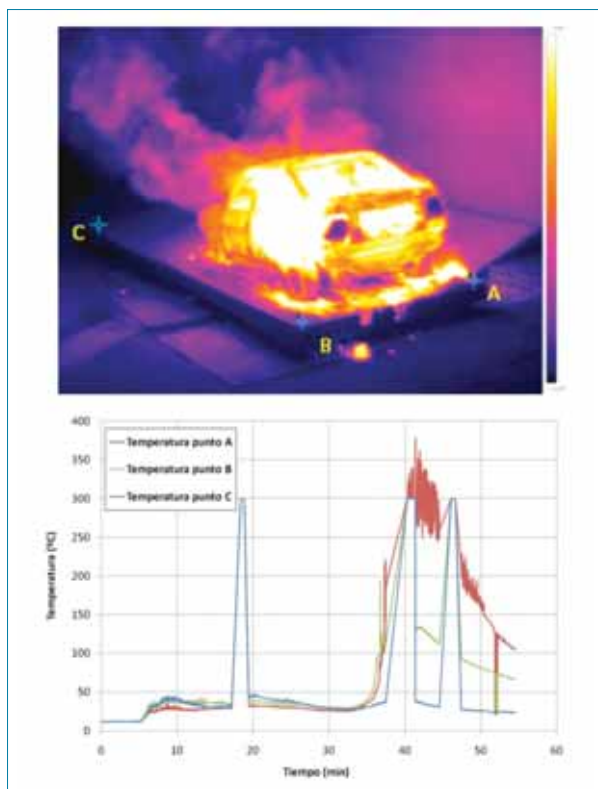


Figura 24:- Evolución de la temperatura superficial de la mezcla bituminosa AC16S aditivada con el 1,4% en el ensayo con incendio de un coche.

todo el coche, aunque sin alcanzar en ningún caso temperaturas tan altas como al principio.

En cuanto a las temperaturas registradas en los puntos de control de la cámara termográfica (Figura 24), en éstas puede observarse como inicialmente, todos presentan valores bajos, de menos de 50 °C, y solo el punto C tiene un pico en un determinado momento, debido seguramente a la caída cerca del mismo de algún trozo de material ardiendo. A partir de los 35 minutos de ensayo, tanto el punto A como el B presentan temperaturas de hasta 350 °C, mientras que el punto C presenta algún pico aislado de esta temperatura (se supone que por el mismo motivo antes comentado).

En la Figura 25 se muestran unas fotografías del estado de firme una vez realizado el ensayo. Como se puede observar de nuevo, el daño es superficial y además no se aprecia ningún hundimiento en la mezcla bituminosa debido al peso del vehículo.

5. Conclusiones

Tras la realización de todas las pruebas descritas, se pueden obtener una serie de conclusiones importantes en lo que se refiere a la interacción fuego-mezcla bituminosa:

- En cuanto a la opacidad de los humos medida en laboratorio, se puede concluir que la muestra sin retardante a tiempos bajos (a los 4 min de combustión) es la mezcla que emite menor cantidad de humos durante la combustión (menor valor de D_{s4min}) y la adición de retardantes tipo fosfinato estudiados inciden negativamente en este aspecto a tiempos bajos. Por el contrario, la mezclas con un 0,7% y 1,4% de retardante presentan un valor menor de densidad óptica máxima (D_{smax}), es decir, emiten menor cantidad de humos a partir de los 10 min de combustión.
- Aunque ninguna de las formulaciones alcanza un valor de Índice Convencional de Toxicidad, CITg, igual a uno (indicando peligrosidad), es la fórmula de referencia (sin llama) y la que contiene un 1% de retardante (con llama) las que presentan un peor comportamiento a tiempos largos de ensayo (20 minutos). Siendo los valores de CITg, así como las diferencias existentes entre las formulaciones muy pequeñas a tiempos cortos (4 y 8 minutos).
- Cuando a nivel de laboratorio se han realizado los ensayos con soplete con potencia de fuego de hasta 0,8



Figura 25:- Estado del firme superficial de la mezcla bituminosa AC16S aditivada con el 1,4% después del ensayo con incendio de un coche.

MW/m², se han alcanzado temperaturas de hasta 900 °C y en ningún caso se ha observado que la mezcla bituminosa llegue a incendiarse y mucho menos que el fuego se propague por ella, independientemente de la cantidad de aditivo en la mezcla ensayada.

- Finalmente, resulta sorprendente comprobar que se alcanzan mayores temperaturas de fuego en el laboratorio aún con cargas de fuego inferiores que en los ensayos piloto realizados en TST quemando pallets, neumáticos y un coche. Esto es debido a que las condiciones ambientales y externas son diferentes. En laboratorio se tiene una llama directa durante varias horas (hasta 8 horas) lo que facilita que toda la muestra de la mezcla bituminosa, y por extensión sus sensores, alcancen una temperatura estable. Sin embargo, en el ensayo del coche, la potencia de fuego no está igualmente repartida en toda la superficie, ni del coche ni en la placa de mezcla bituminosa, y además tampoco se puede mantener a lo largo del tiempo, lo que hace que las temperaturas en los sensores y su efecto en la mezcla bituminosa no sea estable.
- De nuevo en estos ensayos se comprueba que no existe en ningún caso una propagación del fuego tras el incendio a través de la mezcla bituminosa, únicamente se puede decir que la mezcla en función de su contenido en aditivo sufre una serie de transformaciones que van degradándolo superficialmente. Así mismo, no se ha detectado ningún hundimiento en la mezcla bituminosa a consecuencia de la carga, como puede ser el propio vehículo incendiado.

6. Agradecimientos

Proyecto financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad MINECO, así como por el Fondo Europeo de Des-

arrollo Regional, FEDER. Convocatoria INNPACTO (IPT-2011-1380-370000).

7. Referencias bibliográficas

- (1) Norma ISO 5660-1: 2002. Reaction to fire tests-Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)
- (2) "New bituminous mastics for pavements with improved fire performance" M. Barral, P.Garmendia, M.E. Muñoz, Z.Palmillas, R. Romera, A.Santamaría, S.Villanueva. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS 30, 650-656 (2012)]
- (3) Investigation into the properties of asphalt mixtures containing magnesium hydroxide flame retardant" T.Xu, X.Huang, Y.Zhao. FIRE SAFETY JOURNAL 46,330-334 (2011)]
- (4) "Flammability and rheological behavior of mixed flame retardant modified asphalt binder" S.Wu, L.Mo, P.Cong, J.Yu, X Luo. FUEL 87, 120-124 (2008)]
- (5) "Las Euroclases: Clasificación de la reacción al fuego de mezclas bituminosas" M.Barral, R.Romera, C.Lorenzo, P.Garmendia, I.Martínez, M.E. Muñoz, A. Santamaría. OBRAS URBANAS p. 94 Febrero 2010]
- (6) Norma ISO 554:1976 Standard atmospheres for conditioning and/or testing – Specifications.