

ESTUDIO DE LA REACCIÓN AL FUEGO DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CLIENTE MEDIANTE EL CONO CALORIMÉTRICO

Pablo Garmendia, Izaskun Martínez

Fundación CIDEMCO.

Marisol Barral, Ramón Romera

Grupo Campezo S.L

Carmelo Lorenzo

Oscal S.L.U

Zita Palmilla, M^a Eugenia Muñoz

Instituto Universitario POLYMAT (UPV)

Introducción

Los túneles constituyen zonas de riesgo especial en la infraestructura vial, de forma que la seguridad debe ser la premisa principal en su diseño y construcción. Uno de los mayores riesgos en el interior del túnel es un accidente con resultado de incendio, es por ello que un túnel debe estar equipado con todas la medidas de seguridad tanto activa como pasiva frente a incendio.

Dentro de la seguridad pasiva frente a incendio, una posible línea de investigación es estudiar la reacción al fuego de mezclas bituminosas convencionales para la pavimentación de carreteras con especial atención a túneles.

Una primera fase de este estudio se ha publicado en la IV Jornada Nacional de ASEFMA en Madrid (2009), donde se ha comprobado que las mezclas bituminosas convencionales en el dispositivo del panel radiante (UNE EN ISO 9239-2), al ser expuestas a flujos de calor iguales o inferiores a $10,9 \pm 0,4$ kW/m² no implican aportación extra al incendio en términos de propagación de la llama, inflamación superficial, calor generado y humos emitidos.

A la vista de los resultados obtenidos se ha optado por realizar un estudio en el equipo cono calorimétrico (ISO 5660) dada su versatilidad para simular escenarios

de incendio donde los flujos de calor aplicados sobre las mezclas bituminosas oscilan de 0 a 100 kW/m². Para el estudio se eligió un flujo de calor de 50 kW/m² con objeto de provocar la ignición de las mezclas bituminosas y así estudiar los factores que influyen en la ignición como por ejemplo tipos de betún y mezclas, aditivos, etc. y su posterior diseño.

En esta comunicación se presentan los resultados obtenidos en el cono calorimétrico para distintos tipos de mezclas bituminosas habitualmente utilizadas en la pavimentación de túneles, aditivos y flujos de calor y además se evidencia que la reacción al fuego de las mezclas bituminosas es mejorable mediante el diseño mecánico y reológico de mezclas especiales que contengan aditivos retardantes a la llama.

Por último, comentar que todos los resultados y conclusiones que se presentan en esta comunicación han sido posibles gracias a la subvención recibida por parte del Ministerio de Fomento.

Consecuencias de incendio en un túnel

Los túneles, al ser cavidades muy aisladas del exterior, presentan el problema de la dificultad de eliminación del calor, el humo y las sobrepresiones, que se pueden llegar a generar durante un incendio. Al margen de esto, durante un incendio en un túnel se producen los siguientes fenómenos de gran riesgo:

Efecto horno:

La concentración del humo y calor que se produce en el interior de un túnel, es debida a que no existe hueco alguno por donde pueda disiparse el exceso de calor y los gases. Esto genera el denominado "efecto horno", que consiste en la acumulación progresiva del calor, que se traduce en un aumento continuado de la temperatura. Se le denomina efecto horno, porque el fenómeno es muy parecido a lo que ocurre con el horno de una cocina.

Por supuesto, el calor no tiene porque ser considerado lo más peligroso, pues como ya se sabe, el humo es un el factor de más riesgo en los primeros estadios del incendio.

Efecto cañón:

Este efecto se presentará, cuando se produzcan explosiones, debidas, por ejemplo, a un incendio. Imaginemos un camión-cisterna, que contiene un gas presurizado, que por efecto del calor del incendio explota, debido al aumento de la presión de

vapor del gas que transporta. No es difícil imaginar, que existiendo solo una cavidad lineal, esta, se comportará como si fuera el cañón de una escopeta. Ello es debido, a que la sobrepresión generada por la explosión en el interior del túnel, solo puede liberarse hacia ambos lados a partir del punto de origen de dicha explosión.

Si tal explosión se produce, la sobrepresión creada, será mayor que si nos encontráramos a cielo abierto, con lo cual, los daños para las personas, debidos a la onda expansiva, serán mayores que en un lugar a cielo abierto. También los objetos proyectados por la explosión, se concentraran, debido a que serán direccionados a través del túnel .

Desorientación de los usuarios:

Otro problema importante, es la desorientación que se produce en las personas cuando pierden la visión, debido a la acumulación del humo producido durante un incendio. Esta desorientación ocasionará, que no sepan hacia donde caminan o conducen, pudiendo generar nuevos accidentes.

Todos estos fenómenos pueden ser consecuencias directas de un accidente del túnel con resultado de incendio y pueden ocasionar graves daños materiales y personales.

Mezclas Bituminosas Estudiadas

En esta comunicación se presentan los resultados obtenidos del estudio realizado sobre la respuesta al fuego de varios tipos de mezclas bituminosas ampliamente utilizadas para la pavimentación de túneles con diversas variantes como veremos a continuación, utilizando como equipo de medida el cono calorimétrico, siguiendo el protocolo de ensayo según norma ISO 5660:2002.

A continuación, se enumeran las distintas mezclas bituminosas utilizadas y sus variantes:

Grupo 1 (mezclas bituminosas convencionales):

- M1: AC16 SURF 35/50 S OFITA (betún s/m 4,7)
- M2: AC16 SURF 50/70 S OFITA (betún s/m 4,7)
- M3: BBTM 11A 45/80-65 F OFITA (betún s/m 5,7)

Grupo 2 (mezclas bituminosas aditivadas con retardantes a la llama (RT) en diferentes proporciones):

- M4: BBTM 11A 45/80-65 F OFITA + RT 3%
- M5: BBTM 11A 45/80-65 F OFITA + RT 4%
- M6: BBTM 11A 45/80-65 F OFITA + RT 5%

Grupo 3 (mezcla bituminosa con otros aditivos que mejoran la reacción al fuego)

- M7: BBTM 11A 45/80-65 F OFITA + aditivo intumescente
- M8: BBTM 11A 45/80-65 F OFITA + fibra de celulosa
- M9: BBTM 11A 45/80-65 F OFITA + lana de roca

Todas las mezclas fueron diseñadas en el laboratorio cumpliendo las especificaciones técnicas del PG-3.

Cono Calorimétrico (ISO 5660-1)

El cono calorimétrico es un equipamiento científico que se utiliza fundamentalmente para investigación y desarrollo de productos. A nivel internacional su uso está muy extendido ya que permite desarrollar y optimizar formulaciones con respecto a sus propiedades frente al fuego, es decir, podemos llegar a un balance entre propiedades precio, con lo cual las empresas obtienen un producto con, básicamente las mismas prestaciones, pero con un coste de fabricación inferior.

Otra importante ventaja del cono calorimétrico es que es una herramienta que caracteriza un material en un espectro más amplio, bajo diferentes flujos de calor, por lo que se puede obtener información sobre el comportamiento frente al fuego en diferentes escenarios de incendio, lo que cada vez es más solicitado en términos de Ingeniería de Seguridad ante incendio.

El cono calorimétrico es un ensayo que simula diferentes escenarios de incendio a escala de laboratorio. Este dispositivo tiene la capacidad de exponer a la muestra a una radiación externa que se encuentra en el intervalo de 0 a 100 kW/m². Las medidas se realizaron con un flujo de calor de 50 kW/m² y se colocaron a la misma distancia de la resistencia del cono (25 mm).

Las muestras a ensayo soportadas horizontalmente se exponen al flujo de calor producido por una resistencia contenida en un cono y se queman bajo condiciones ambientales. La emisión de calor se mide mediante la detección del consumo de oxígeno durante el proceso de la combustión de la muestra a lo largo del ensayo.



Figura 1. (Izq.) Dispositivo del cono calorimétrico, (dcha) Muestra de 10x10 cm para el cono calorimétrico.

Las muestras tienen las dimensiones de 10 x 10 cm. El espesor máximo de la muestra es de 50mm. Debido al elevado peso de las probetas de mezclas bituminosas, estas han sido cortadas a espesores menores ya que sus pesos superaban el límite máximo de la balanza del dispositivo del cono calorimétrico.

Todas las muestras fueron acondicionadas previamente al ensayo hasta masa constante a una temperatura de 23 °C y una humedad relativa de 50%. La colocación de la muestra implica que la distancia entre la misma y el fondo del cono ha de ser de 25 mm.

La norma ISO 5660-1:2002 del cono calorimétrico nos indica los parámetros que se recogen del ensayo. Y estos son:

- Tiempo al que se produce llama sostenida expresados en segundos (tig)
- Tiempo al que se extingue la llama sostenida expresados en segundos (tfo)
- Pérdida de masa, expresado en gramos por superficie (g/m^2) y la velocidad de pérdida de masa de la muestra calculada desde el periodo en que se da la ignición y el final del ensayo expresado en gm-2s-1 (MLR). También se anotan la masa inicial y la masa final (m_i y m_f).
- Calor de combustión neto o calor total emitido (THR) expresados en megajulios por kilogramo (MJ/kg). En los resultados aparece tabulado a distintos tiempos en segundos, (THR 0-300, THR 0-600), THR 0-1200). Estos parámetros nos muestran en que tiempo la muestra emite una mayor cantidad de calor.
- Velocidad de emisión de calor (HRR) por unidad de área expresado en (Kw/m^2). En los resultados aparece tabulado a distintos tiempos en

segundos, 60,180 y 300 s. HRR (peak) corresponde a la máxima velocidad de emisión de calor.

- SPR o velocidad de generación de humo expresado en (m²/s).

En la figura 2 se muestra el equipo calorimétrico ensayando una mezcla bituminosa tipo y el resultado de la misma tras el ensayo.



Figura 2. (izq.) Muestra AC16 S en plena ignición durante el ensayo del cono calorimétrico, ((dcha) Muestra antes del ensayo y después del ensayo en el cono calorimétrico.

Reacción al fuego de las Mezclas Bituminosas Tipo (GRUPO 1)

El objetivo de esta primera parte del estudio ha sido analizar la reacción al fuego de mezclas bituminosas en caliente convencionales constituidas a partir de árido ofítico y betún asfáltico convencional y modificado con polímeros sin ningún tipo de aditivo adicional.

En la tabla 1 que se presentan los resultados obtenidos en el cono calorimétrico a un flujo de calor de 50 kW/m². A lo largo del estudio se ha comprobado que todas las muestras han sufrido ignición superficial con resultado de llama sostenida.

MEZCLA BITUMINOSA TIPO	PARAMETROS						
	t _{ig} (s)	t _{to} (s)	t _{to} - t _{ig} (s)	HRR (peak) kW/m ² (t _{peak})	THR MJ/m ²	SPR m ² /s	Δm (g)
AC16 SURF 35/50 S OFITA (B s/m 4,7)	177.7	1184.3	1006.6	87.80 (585 s)	67.59	0.0025	14.7
AC16 SURF 50/70 S OFITA (B s/m 4,7)	182.3	1036.7	854.4	86.07 (435 s)	46.88	0.0027	13.1
BBTM 11A 45/80-65 F OFITA (B s/m 5,7)	113.7	1921.0	1807.3	86.69 (226.7 s)	87.89	0.0048	21.5

ESTUDIO DE LA REACCIÓN AL FUEGO DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CLIENTE MEDIANTE EL CONO CALORIMÉTRICO

MEZCLA BITUMINOSA TIPO			
	HRR(60)(Kw/m ²)	HRR(180) (Kw/m ²)	HRR(300) (Kw/m ²)
AC16 SURF 35/50 S OFITA (B s/m 4,7)	46.25	64.28	67.50
AC16 SURF 50/70 S OFITA (B s/m 4,7)	52.77	66.13	70.10
BBTM 11A 45/80-65 F OFITA (B s/m 5,7)	29.69	63.92	70.36

Tabla 1 : Resultados del cono calorimétrico para las mezclas bituminosas del grupo 1.

A la vista de los resultados de la tabla 1 se extraen la siguientes conclusiones:

En lo que respecta a los tiempos de ignición (tig) observamos que la mezcla que “arde” primero es la mezcla que contiene betún modificado, además también ha sido la que más ha tardado en apagarse durante el ensayo de cono calorimétrico. Hay que tener en cuenta que la mezcla bituminosa BBTM 11 A se trata de la mezcla que contiene una mayor cantidad de materia orgánica por ser la mezcla con mayor contenido de ligante.

La tasa total de calor emitido (THR) sigue el siguiente orden decreciente Mezclas BBTM 11A > Ac16 S 35/50 > AC16 S 50/70. Por tanto, la mezcla BBTM 11 A es la que genera una tasa más alta de calor emitido, y en contraposición estaría la AC 16 S fabricada con betún 50/70. En términos de reacción al fuego la muestra BBTM 11 A es el que peores resultados otorga.

En lo que a velocidad de emisión de calor (t_{Peak}) se refiere (parámetro muy importante en el desarrollo de un incendio) observamos que la muestra BBTM 11 A sería la más peligrosa debido a que ha emitido calor con mayor celeridad que el resto de las mezclas. En esta mezcla, su máxima velocidad de emisión de calor llega antes que en el resto siendo estas velocidades máximas muy parejas para las tres mezclas bituminosas. A pesar de ello las mezclas AC16 S comienzan con una velocidad de emisión de calor considerablemente más alta en el primer minuto de ensayo HRR(60) pero posteriormente dicha velocidad es superada en su máximo por la mezcla BBTM 11 A. Es decir un pavimento constituido por una capa de rodadura que contuviera este tipo de mezcla bituminosa sería algo más peligrosa en lo que respecta a la acumulación de calor en los primeros estadios del incendio.

Para el caso de los humos encontramos que la fracción bituminosa de la mezcla BBTM 11 A emite humos con mayor rapidez tal y como lo indica el parámetro SPR (m²/s). Esta mezcla bituminosa demuestra ser casi el doble más rápida en emitir humos que las mezclas AC16 S. La importancia de la acumulación de humos es un factor que afecta a la evacuación de personas en caso de incendio. Por ello el factor tiempo es vital.

La principal diferencia entre las mezclas bituminosas AC 16 S reside en el patrón de emisión de calor. Las mezclas compuestas por el betún más blando 50/70 emiten calor considerablemente más rápido que las mezclas bituminosas compuestas por betún 35/50. Esto se refleja en los datos de HRR (60)(KW/m²), HRR (180) (KW/m²) y HRR(300) (KW/m²). Este fenómeno puede ser debido al mayor contenido de compuestos orgánicos de menor peso molecular del betún 50/70.

Los tiempos de ignición t_{ig} son similares en ambos casos no así el tiempo total que la muestra permanece en ignición que es sensiblemente más alto en el caso de las mezclas de betún más blando. (AC 16 SURF 50/70 S). Este hecho es acorde con el patrón de emisión de calor de la muestra comentada anteriormente.

Reacción al fuego de las Mezclas Bituminosas modificadas con Aditivo Retardante a la llama (Grupo 2)

Tras el análisis de los resultados obtenidos en el cono calorimétrico a 50 kW/m² con las mezclas bituminosas convencionales, se procedió a realizar cambios en el diseño de mezcla para incorporar aditivos retardantes a la llama que pudieran influenciar positivamente en la evolución de la reacción al fuego de dichas mezclas.

A continuación en la tabla 2 se presentan los resultados de las mezclas bituminosas aditivadas con retardante a la llama a distintas concentraciones.

MEZCLA BITUMINOSA	PARAMETROS					
	t_{ig} (s)	t_{f0} (s)	$t_{f0} - t_{ig}$ (s)	HRR (peak) (kW/m ²)	THR MJ/m ²	SPR m ² /s
BBTM 11A OFITA + 3% RT s/a	123,0	1609,0	1486	89.11	86.13	0.0026
BBTM 11A OFITA + 4% RT s/a	112.7	1486.7	1374	77.90	69.15	0.0029
BBTM 11A OFITA + 5% RT s/a	123.7	1133.0	1009.3	61.24	78.25	0.0010
BBTM 11A OFITA	113,7	1921,0	1807,3	86,69	87,89	0,0048

MEZCLA BITUMINOSA	HRR(60)(Kw/m ²)	HRR(180) (Kw/m ²)	HRR(300) (Kw/m ²)
BBTM 11A OFITA + 3% RT s/a	67.25	76.28	74.33
BBTM 11A OFITA + 4% RT s/a	46.51	57.39	61.81
BBTM 11A OFITA + 5% RT s/a	24.06	38.97	43.64
BBTM 11A OFITA	29.69	63.92	70.36

Tabla 2 : Resultados del cono calorimétrico para todas las mezclas del grupo 2 aditivadas con retardante a la llama.



Figura 3: BBTM11A 45/80-65 F OFITA después del ensayo del cono calorimétrico. (izq.) con aditivo retardante a la llama, (dcha.) sin aditivo. llama, (dcha.) sin aditivo. a la llama.

En la figura 3 se muestra la barrera carbonosa generada como consecuencia de la combustión de la mezcla con retardante a la llama. Dicha barrera carbonosa actúa protegiendo a la muestra de los procesos que tienen lugar en la degradación de la muestra.

Teóricamente una mayor concentración del aditivo retardante supondría una mayor efectividad en su acción como retardante a la llama. Vamos a ver que nos dicen los parámetros estudiados resumidos en la tabla 2.

- La acción del retardante a la llama se hace patente en todos los parámetros presentados.
- Una mayor concentración de retardante a la llama produce el efecto esperado en el parámetro de máxima velocidad de emisión de calor HRR (peak). Este parámetro disminuye a medida que se aumenta la concentración de retardante a la llama en la mezcla bituminosa.
- Una mayor concentración de aditivo retardante a la llama ralentiza de manera muy significativa el patrón de emisión de calor. Esto queda patente en la disminución de los parámetros de HRR (180)(Kw/m²) y HRR (300)(Kw/m²).
- El retardo que la muestra presenta, a lo largo del ensayo, en la emisión de humos queda patente y aumenta con la concentración de aditivo retardante a la llama como se observa en el parámetro SPR (m² /s).
- El tiempo total en que las mezclas bituminosas permanecen en ignición aumenta a medida que la concentración de retardante a la llama disminuye.

Otras alternativas de mejora de Reacción al fuego de Mezclas Bituminosas

1. Aditivos Intumescentes

La INTUMESCENCIA es un caso especial de mecanismo de fase condensada. La intumescencia consiste en un conjunto de reacciones químicas capaces de provocar un importante incremento del espesor del material, de manera que en caso de incendio el material intumescente desarrolla un importante volumen de espuma carbonosa sin que afecte al elemento protegido o sustrato.

Un ejemplo de producto intumescente son las pinturas protectoras de estructuras de acero. El acero pierde su resistencia estructural alrededor de los 500°C, pero una pintura intumescente correctamente formulada y aplicada puede ser capaz de mantener la temperatura del acero por debajo de esa temperatura durante 120 minutos.

Se necesitan 3 agentes básicos: un catalizador, que libera ácido fosfórico (se suelen emplear polifosfatos de amonio de reducida solubilidad en agua), un agente carbonaceo (se seleccionan polialcoholes de elevado peso molecular que generan una capa carbonacea aislante, como el pentaeritritol) y un agente espumante (como la melamina).

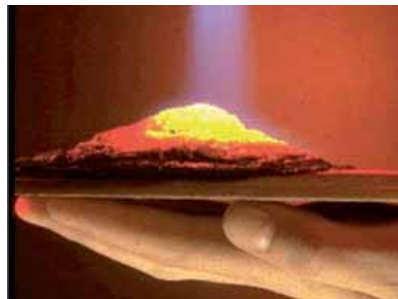


Figura 4. Fenómeno de intumescencia durante la combustión de una matriz polimérica.

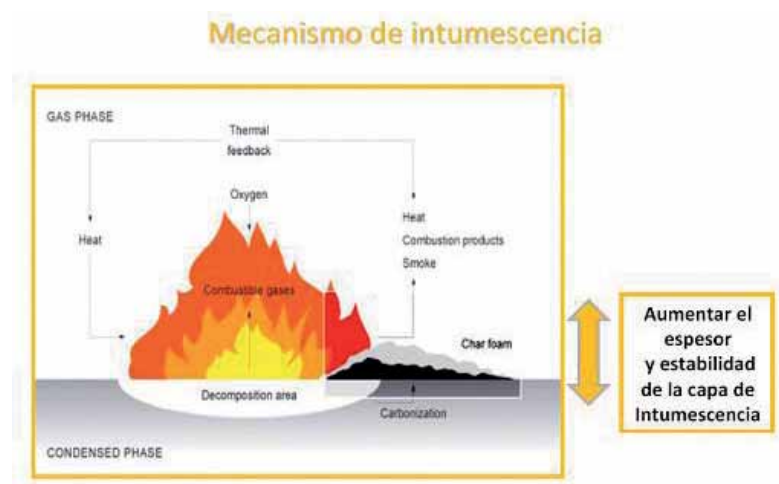


Figura 5. Resumen gráfico de los fenómenos que dan lugar a la intumescencia.

A continuación en la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos para una mezcla bituminosa aditiva con un aditivo intumescente.

MEZCLA BITUMINOSA	t_{ig} (s)	t_{f0} (s)	$t_{f0} - t_{ig}$ (s)	HRR (peak) kW/m^2	THR MJ/m^2	SPR m^2/s
BBTM 11A OFITA + (intumescente)	129.3	1378.7	1249.4	98.09	88.61	0.0029

MEZCLA BITUMINOSA TIPO	HRR(60) (Kw/m^2)	HRR(180) (Kw/m^2)	HRR(300) (Kw/m^2)
BBTM 11A OFITA + intumescente	56.58	77.35	83.11

Tabla 3. Resultados al cono calorimétrico de la mezcla bituminosa intumescente.

De la tabla 3 se observa que:

- Durante la combustión de las mezclas bituminosas diseñadas con aditivo intumescente no se ha producido un aumento considerable de volumen de la muestra. Solamente se ha producido un ligero hinchamiento superficial de unos 3 mm de espesor, en nada comparado a las capas protectoras formadas por sistemas de aditivos intumescentes que forman parte de pinturas y otras matrices poliméricas (ver figura 6).
- El ligero hinchamiento producido no es suficiente para proteger a la superficie de las mezclas bituminosas. Esta delgada barrera protectora no produce la mejora de los resultados de reacción al fuego de las mezclas bituminosas ensayadas en el cono calorimétrico.
- La ausencia de un suficiente aumento de volumen puede deberse a que en la matriz bituminosa los aditivos no se comportan de la misma manera que en otras matrices, de manera que no se haya constituido al mismo tiempo la barrera carbonosa y la emisión de gas nitrógeno (gas de expansión para la barrera). Una muestra de ello es el “flashing” o llamaradas intermitentes observadas durante el ensayo que nos hacen sospechar que la emisión de nitrógeno se ha producido en primer lugar, antes de la formación de la barrera carbonosa.



Figura 6. Capa carbonosa creada por la acción del aditivo intumescente

2. Lana de Roca y Fibra de Celulosa

Otra de las alternativas posibles para la mejora de la reacción al fuego de las mezcla bituminosas estudiadas sería la inclusión de algún aditivo en el diseño de mezcla que disminuyera el contenido de material orgánica combustible (betún) de la misma sin comprometer con ello las propiedades mecánicas y de cohesión de la mezcla final.

Desde hace algunos años las fibras de celulosa han sido utilizadas en el diseño de mezclas bituminosas. Este aditivo no modifica químicamente la mezcla pero actúa de “extender” del propio betún aumentando el contenido del mismo.

La adición de fibras fija una cantidad considerable de betún, lo que permite fabricar mezclas de alto contenido en ligante, teniendo al mismo tiempo excelentes estabilidades mecánicas y con una elevada resistencia a fluencia.

El empleo de un alto contenido en ligante conlleva flexibilidad, resistencia a fatiga y durabilidad, frente al agua y al envejecimiento.

Las fibras ejercen, además, una acción de microarmaduras y confieren al mástico una cohesión elevada y una fuerte resistencia mecánica, en particular a tracción y a cizallamiento.

En general las propiedades que se obtienen del empleo de las fibras dependen del área superficial y de la distribución de tamaño de las mismas.

En cuanto a la reacción al fuego la inclusión de fibras de celulosa supondría un aporte adicional de material orgánico combustible, Por esta razón se ha querido experimentar y comparar los resultados de reacción al fuego con mezclas bituminosas con fibras de lana de roca en su diseño. La lana de roca es ampliamente utilizada en la construcción con propósitos de aislamiento térmico, acústico y tiene como ventaja su bajísimo índice de combustibilidad debido a su origen casi exclusivamente inorgánico – mineral.

En la tabla 4 se presentan los resultados de las mezclas bituminosas aditivadas con fibras de celulosa y lana de roca a un flujo de calor de 50 kW/m².

MEZCLA BITUMINOSA						
	t _{ig} (s)	t _{f0} (s)	t _{f0} - t _{ig} (s)	HRR (peak) kW/m ²	THR MJ/m ²	SPR m ² /s
BBTM 11A OFITA	113,7	1921,0	1807,3	86,69	87,89	0,0048
BBTM 11A OFITA +fibra de celulosa (0,3 %)	119,0	1410,0	1291,0	104,7	65,39	0,0031
BBTM 11A OFITA + lana de roca (0,3%)	121,0	1583,0	1462,0	100,21	63,78	0,0035

ESTUDIO DE LA REACCIÓN AL FUEGO DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CLIENTE MEDIANTE EL CONO CALORIMÉTRICO

MEZCLA BITUMINOSA	HRR (Kw/m ²)		
	HRR(60)	HRR(180)	HRR(300)
BBTM 11A OFITA (mezcla tipo)	24.06	38.97	43.64
BBTM 11A OFITA +fibras de celulosa (0,3 %)	36.03	76.18	74.94
BBTM 11A OFITA + lana de roca (0,3%)	22.06	68.35	71.09

Tabla 4. Resultados al cono calorimétrico, mezclas convencional, lana de roca y fibra de celulosa

De la tabla 4 se extraen las siguientes conclusiones:

- En primer lugar destacar que los resultados para la misma concentración de aditivo de fibra de celulosa y lana de roca han otorgado resultados muy similares entre sí. Ambas mezclas bituminosas han otorgado valores para el calor total emitido, THR (MJ/m²) más bajos que la mezcla tipo convencional.
- Los resultados ligeramente peores, en cuanto a su reacción al fuego, lo da la mezcla aditivada con fibras de celulosa y esto se debe a que estas fibras son también combustibles. De ahí sus valores ligeramente más elevados en el pico máximo de emisión de calor (HRR peak), además de un patrón de emisión ligeramente más rápido en el tiempo.
- La inclusión de fibras podrían tener grandes beneficios como “extender” de la mezcla y podrían influir positivamente en su resistencia mecánica pero su influencia en la reacción al fuego no es significativa.

Flujo crítico de Ignición para las Mezclas Bituminosas Estudiadas

El flujo crítico de ignición de las mezclas bituminosas es un factor de gran peso en el conocimiento del virtual aporte de la capa de rodadura del pavimento en el caso de declararse un incendio en el interior de un túnel.

El objetivo es conocer exactamente el flujo crítico y en definitiva que carga de fuego supondría la ignición de la capa de rodadura convencional para la pavimentación de túneles.

Es posible definir el flujo de calor radiante crítico como el crítico límite para que se de la formación de una llama piloto en un material. Por debajo de este flujo de calor radiante la ignición no es posible. Los factores que afecta a este flujo de calor crítico o límite serían las pérdidas de calor de la superficie del material y por lo tanto la geometría y superficie del material.

Numerosos estudios del comportamiento del fenómeno de la ignición han intentado relacionar el tiempo en el que dicho fenómeno ocurre en relación a un flujo de calor dado incidente.

Basándose en las diferentes teorías sobre la transferencia de calor y asumiendo que el flujo incidente sobre un material es constante y despreciando las pérdidas de calor se afirma que, para un sólido térmico grueso (donde el grosor del sólido $L > 4\sqrt{(\alpha t)}$) el calor radiante incidente sobre la muestra es proporcional a $1/\sqrt{t_{ig}}$ donde t_{ig} se trata del tiempo de ignición, L es el espesor del material en metros y la expresión $\sqrt{(\alpha t)}$ resume las características térmicas a lo largo de la sección del material.

De esta forma, podemos realizar una estimación del flujo de calor crítico para que se de el fenómeno de la ignición, representando los resultados de tiempos de ignición para diferentes mezclas bituminosas obtenidos en el cono calorimétrico bajo el protocolo de ensayo ISO 5660 a diferentes flujos de calor radiante.

A continuación en la figura 7 se presentan las gráficas $1/\sqrt{t_{ig}}$ vs Flujo de calor (kW/m^2) resultado de los datos obtenidos en el cono calorimétrico. También se presenta la consiguiente ecuación lineal que nos permitirá establecer una estimación del flujo de calor crítico para la ignición en la superficie de las mezclas bituminosas empleadas.

Para este estudio se analizaron las mezclas bituminosas siguientes:

- AC 16 surf 50-70 S Ofita
- AC 16 surf 45/80-65 S Ofita
- BBTM 11 A 45/80-65 F Ofita + 3% RT
- BBTM 11 A 45/80-65 F Ofita

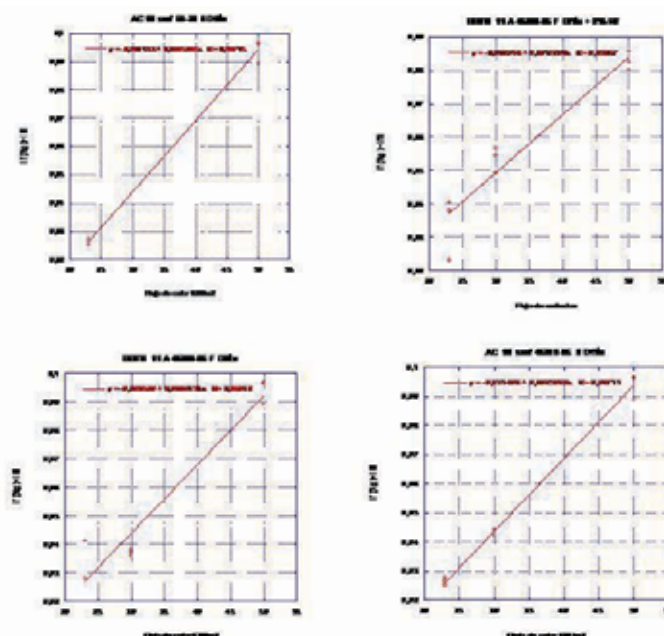


Figura 7. Representaciones graficas $1/\sqrt{t_{ig}}$ vs Flujo de calor (kW/m^2) obtenidos en el cono calorimétrico para las mezclas estudiadas.

A partir de los gráficos de la figura 7 se estima el flujo de calor crítico y que se presentan en la tabla 5 para todas las mezclas estudiadas.

MEZCLA BITUMINOSA	Flujo de calor crítico (kW/m ²)	Regresión lineal
AC 16 surf 50/70 S Ofita	12.44	0.99715
BBTM 11 A 45/80-65 F Ofita + 3% RT	-	-
BBTM 11 A 45/80-65 F Ofita	11.81	0.95867
AC 16 surf 45/80-65 S Ofita	12.60	0.9971

Tabla 5: Flujos de calor crítico para las distintas mezclas estudiadas.

A partir de los resultados de la tabla 5 se puede decir que:

- En el caso concreto de la mezcla bituminosa BBTM 11 A con un 7% de retardante a la llama, la predicción de su flujo de calor crítico es erróneo ya que otorga valores en contradicción con otras observaciones experimentales, como los ensayos de panel radiante realizados a un flujo de calor de 11,9 KW/m² donde la mezcla no sufría ignición. Creemos que ha podido existir algún error en las medidas o en la muestras preparadas por lo que se repetirá este ensayo para dilucidar el error cometido y determinar el flujo de calor crítico real.
- Todas las muestras presentan un flujo de calor crítico similar, de manera que en un virtual incendio en túnel el flujo de calor necesario en su superficie para que se diera lugar a ignición y presencia de llamas es similar. En este sentido las mezcla bituminosas estudiadas presentarían el mismo nivel de peligro bajo las mismas condiciones de incendio, entendido desde el punto de vista de propagación superficial de las llamas.
- Es necesario estudiar las mezclas bituminosas propuesta a un mayor número de flujo de calor en el cono calorimétrico para obtener resultados con mayor fiabilidad así como comprobar experimentalmente si los flujos de calor críticos predichos por el modelo aplicado son reales.

Conclusiones

Las conclusiones finales que se obtienen de este estudio se enumeran a continuación:

- En lo que respecta a las mezclas bituminosas modificados con retardante a la llama se observa que la mezcla bituminosa BBTM 11 A OFITA con un 5% de aditivo es la que aporta mayor efectividad en cuanto a la reacción al fuego ya que retarda el tiempo de ignición y provoca una emisión de calor más pausada y lenta.
- La velocidad de emisión de humos (HRR), factor muy importante en la peligrosidad de un incendio, es considerablemente menor en las mezclas

bituminosas aditivadas con retardante a la llama en lugar de las mezclas aditivadas con fibras de celulosa o lana de roca.

- La utilización de fibras de celulosa y fibras de lana de roca no han dado como resultado cambios significativos en la reacción al fuego de las mezclas bituminosas BBTM 11 A convencionales. Únicamente ligeras disminuciones en la tasa total de calor emitido THR (MJ/m²).
- La utilización de aditivos intumescentes no ha resultado significativa en la mejora de la reacción al fuego de las mezclas bituminosas estudiadas. La razón es la ausencia de hinchamiento y capa carbonosa protectora, quizás porque la formulación no ha sido la más adecuada, por ello se sigue analizando este tipo de aditivos.
- En cuanto a la determinación del flujo de calor crítico de las mezclas bituminosas propuestas además de ser necesario realizar nuevos ensayos a diferentes flujos de calor en el cono calorimétrico, los datos obtenidos nos arrojan que no existen diferencias significativas entre las mezclas AC16 y BBTM 11A estudiadas.
- La influencia de la dureza del ligante en la reacción al fuego utilizado en las mezclas bituminosas tipo AC16 S no es significativa. Pero podemos concluir que la mezcla AC 16 Surf 50/70 S (con betún más blando) contiene un patrón de emisión de calor donde éste se emite de manera más rápida. Esta ligera diferencia podría ser debida a la mayor concentración de compuestos de menor peso molecular de los betunes de mayor penetración. La mayor concentración de compuestos de menor peso molecular provocaría el paso más rápido a la fase gaseosa durante la combustión de las mezclas bituminosas, de ahí la mayor celeridad en la emisión de calor por parte de las mezclas bituminosas más blandas.

Bibliografía

1. Colwell, S., Nicholls, J.C., Torero, L., "Test Methodologies for Reaction to Fire of Pavement Materials" Sustainable and Advanced materials for road Infrastructure, 2005.
2. "Asphalt pavements in tunnels", EAPA, European Asphalt pavement association, 2008
3. Haack, Alfred., "Fire in tunnels, Design Fire scenarios, part 1" European Thematic Network Fire in tunnels, 2004
4. Bruno, Brousse., Lacroix, Didier., "Fire in tunnels, Fire safe design, part 2" European Thematic Network Fire in tunnels, 2004.
5. Carvel, R. O., Torero, J. L., "The contribution of asphalt road surfaces to FIRE

risk in tunnel fires: Preliminary findings”, Tunnel management international, 2006.

6. Jofré Ibañez, C., “Optimización de las características de los pavimentos para túneles”, VIII Congreso Nacional FIRMES, 2008

7. Colwell, S., Nicholls, J.C., Torero, L.,”Test Methodologies for Reaction to Fire of Pavement Materials” Sustainable and Advanced materials for road Infrastructure, 2005.

8. “Asphalt pavements in tunnels”, EAPA, European Asphalt pavement association, 2008

9. Haack, Alfred., “Fire in tunnels, Design Fire scenarios, part 1” European Thematic Network Fire in tunnels,2004

10. Bruno, Brousse., Lacroix, Didier., “Fire in tunnels, Fire safe design, part 2” European Thematic Network Fire in tunnels, 2004.

11. “Influencia de la mezcla asfáltica en la seguridad de los túneles”, Carreteras, N° 155/Sep-Oct 07.

12. Paap.F., TNO Building Construction Research. Private Communication.2004.

13. Lathawer W., Effects of pavement on fires in oad tunnels, Routes Roads, n° 334 (2007).