

## **ANEJO Nº 08. FIRMES Y PAVIMENTOS**



## INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3	6. SECCIONES TIPO ADOPTADAS EN NUEVO TRAZADO DE CARRETERA .....	14
2. CATEGORÍAS DE TRÁFICO .....	3	6.1 TRONCO CARRETERA N-260 .....	14
2.1 CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO EN TRONCO .....	3	6.2 RAMAL UNIDIRECCIONAL Y GLORIETAS .....	14
2.1.1 Tronco.....	3	6.3 FIRME EN ESTRUCTURAS.....	14
2.2 CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO EN ENLACES.....	4	6.4 FIRME EN TÚNELES .....	15
2.3 CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO EN DESVÍOS PROVISIONALES DE CARRETERAS.....	5	6.5 DESVÍOS PROVISIONALES DE CARRETERAS .....	18
2.4 RESUMEN DE CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO .....	5	6.6 CAMINOS AGRÍCOLAS Y CAMINOS DE OBRA Y DESVIOS PROVISIONALES DE CAMINOS.....	18
3. EXPLANADA.....	5	6.7 CAMINOS ASFALTADOS.....	18
3.1 EXPLANADA EN TRONCO.....	5	7. REFUERZO DE FIRME SOBRE FIRME EXISTENTE.....	18
3.2 RESUMEN DE EXPLANADAS ADOPTADAS.....	6	7.1 TRONCO CARRETERA EXISTENTE N-260.....	18
4. CUMPLIMIENTO CON LA ORDEN CIRCULAR 21/2007 SOBRE EL USO Y ESPECIFICACIONES QUE DEBEN CUMPLIR LOS LIGANTES Y MEZCLAS BITUMINOSAS QUE INCORPOREN CAUCHO (NFU).....	7	7.2 TRAVESÍA.....	20
4.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA.....	7	8. DEMOLICIONES.....	21
4.2 JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA.....	7	9. MATERIALES PARA LA SECCIÓN DE FIRME.....	21
5. SECCIONES TIPO ESTUDIADAS. COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA.....	8	10. CARACTERÍSTICAS DE LAS CAPAS DE FIRME .....	22
5.1 COMPARACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA PARA TRÁFICO T32 .....	8	11. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LA SECCIÓN DE FIRME.....	23
5.1.1 Costes de construcción y primer establecimiento (C1).....	8	12. ÁRIDOS ADOPTADOS PARA CAPA DE RODADURA.....	23
5.1.2 Costes de conservación y rehabilitación (C2).....	11	APÉNDICE 1.- EFFETS DE LA CHAUSSEE SUR LES INCENDIES DANS LES TUNNELS ROUTIERS (PIARC)	
5.1.3 Otros costes (C3 y C4).....	13	APÉNDICE 2.- MANUAL SOBRE PAVIMENTOS EN TÚNELES	
5.1.4 Coste total.....	13	APÉNDICE 3.- ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO PAVIREX	
		APÉNDICE 4.- CIENCIA Y TÉCNICA DE LA INGENIERÍA CIVIL	
		APÉNDICE 5.- CATAS FIRME EXISTENTE 26/05/2016	



## 1. INTRODUCCIÓN

Para el proyecto de los firmes del **Proyecto de Trazado Acondicionamiento de la Carretera N-260. Eje Pirenaico, P.K. 449,600 al P.K. 463,600. Tramo: Túnel de Balupor – Fiscal**, se ha tenido en cuenta la **norma 6.1-IC “Secciones de firme”, de la Instrucción de Carreteras para el proyecto de firmes de nueva construcción**, aprobada por Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, la **Norma 6.3-IC sobre Rehabilitación de firmes**, la Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3), relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos, la Nota de servicio 5/2006 sobre Explanaciones y Capas de Firme tratadas con cemento, la Orden Circular 20/06 sobre Recepción de obras de carreteras que incluyan firmes y pavimentos y la Orden Circular 21bis/2009 sobre betunes mejorados y betunes modificados de alta viscosidad con caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) y criterios a tener en cuenta para su fabricación in situ y almacenamiento en obra, aprobada el 23 de marzo de 2009, que complementa a la Orden Circular 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho (NFU).

## 2. CATEGORÍAS DE TRÁFICO

En el anejo nº 6, “Tráfico”, se determinan las IMD en el año de puesta en servicio del tramo objeto de estudio, considerando como tal el año 2022.

La Norma 6.1.-IC “Secciones de Firme” establece las siguientes categorías de tráfico pesado a efectos de dimensionamiento del firme:

CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO	IMD <sub>p</sub> (Vehículos pesados /día)
T00	IMD <sub>p</sub> ≥ 4.000
T0	4.000 > IMD <sub>p</sub> ≥ 2.000
T1	2.000 > IMD <sub>p</sub> ≥ 800
T2	800 > IMD <sub>p</sub> ≥ 200
T31	200 > IMD <sub>p</sub> ≥ 100
T32	100 > IMD <sub>p</sub> ≥ 50

T41	50 > IMD <sub>p</sub> ≥ 25
T42	25 > IMD <sub>p</sub>

siendo IMD<sub>p</sub> la intensidad media diaria de vehículos pesados en el año de puesta de servicio.

### 2.1 CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO EN TRONCO

#### 2.1.1 Tronco

En el año de puesta en servicio, en el año 2022, se considerarán tres escenarios de crecimiento 1,5%, 2,5% y 3,5% según se recoge en el pliego de condiciones técnicas del proyecto y otro más conservador compuesto por los crecimientos recogidos en la Orden circular del Ministerio (OM).

En la siguiente tabla se muestra la prognosis de tráfico en el tronco para la variante en los tramos a los que se refiere este documento.

**Prognosis de tráfico. Escenarios de crecimiento**

Año	Escenario 1,5%		Escenario 2,5%		Escenario 3,5%		Escenario OM	
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 1	Tramo 2
2016	973	956	973	956	973	956	973	956
2017	1.008	990	1.008	990	1.008	990	987	970
2018	1.044	1.026	1.044	1.026	1.044	1.026	1.001	984
2019	1.082	1.063	1.082	1.063	1.082	1.063	1.016	998
2020	1.121	1.101	1.121	1.101	1.121	1.101	1.030	1.012
2021	1.161	1.141	1.161	1.141	1.161	1.141	1.045	1.027
2022	1.226	1.204	1.238	1.216	1.250	1.228	1.103	1.083
2023	1.280	1.258	1.305	1.283	1.331	1.308	1.151	1.131
2024	1.336	1.312	1.376	1.352	1.416	1.391	1.200	1.179
2025	1.356	1.332	1.410	1.385	1.466	1.440	1.217	1.196
2026	1.376	1.352	1.445	1.420	1.517	1.491	1.235	1.213
2027	1.397	1.372	1.481	1.455	1.570	1.543	1.253	1.231
2028	1.418	1.393	1.518	1.492	1.625	1.597	1.271	1.248
2029	1.439	1.414	1.556	1.529	1.682	1.653	1.289	1.266
2030	1.460	1.435	1.595	1.567	1.741	1.710	1.307	1.285
2031	1.482	1.456	1.635	1.607	1.802	1.770	1.326	1.303
2032	1.505	1.478	1.676	1.647	1.865	1.832	1.345	1.322
2033	1.527	1.501	1.718	1.688	1.930	1.896	1.365	1.341
2034	1.550	1.523	1.761	1.730	1.998	1.963	1.384	1.360
2035	1.573	1.546	1.805	1.773	2.068	2.031	1.404	1.380
2036	1.597	1.569	1.850	1.818	2.140	2.103	1.425	1.400
2037	1.621	1.593	1.896	1.863	2.215	2.176	1.445	1.420
2038	1.645	1.616	1.944	1.910	2.292	2.252	1.466	1.440
2039	1.670	1.641	1.992	1.957	2.373	2.331	1.487	1.461
2040	1.695	1.665	2.042	2.006	2.456	2.413	1.508	1.482
2041	1.720	1.690	2.093	2.056	2.542	2.497	1.530	1.503

Considerando las IMD del año de puesta en servicio 2022 del tronco, correspondientes al escenario de crecimiento propuesto por la Orden Ministerial, con un porcentaje de pesados 7,03% observado en los aforos realizados en el trabajo de campo. En carreteras convencionales de un carril por sentido, incide sobre cada carril el 50% de los vehículos pesados que circulan por la vía.

Se tiene la siguiente IMDpesados y categoría de tráfico pesado:

Tramo 1: IMDpesados = 39 - Categoría T41.

Tramo 2: IMDpesados = 38 - Categoría T41.

Aunque se obtenga una IMDp media igual a 39 veh/día (lo que equivaldría a una categoría de tráfico T41) se adopta una categoría de tráfico T32 para todo el tronco, teniendo en cuenta:

- Que la IMD de 39 veh/día **se acerca mucho al límite inferior de la categoría de tráfico T32**, que son 50 veh/día
- La diferencia entre la sección de firme con tráfico T41 y la sección con tráfico T32 son 5 cm de mezcla bituminosa únicamente, lo cual implica un **menor coste de mantenimiento** y una reducción de las afecciones al tráfico de la sección con tráfico T32
- El Manual sobre pavimentos en Túneles, redactado por Dña. Dolores Cancela Rey de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, indica:
  - Para aquellos firmes que apoyen sobre explanada E3 dimensionar con la Norma 6.1 IC, **incrementando en una categoría de tráfico el firme**, de tal manera que se reduzcan en lo posible los deterioros de tipo estructural y se prolongue la vida útil.
  - Para las explanadas en roca el Manual recomienda adoptar el firme indicado en la Tabla 1 del mismo, que para tráfico T3 son **12 cm de mezcla bituminosa**, mayor que los 10 cm que indica la norma para tráfico T41 y explanada E2.

Por todo esto y de acuerdo a criterio de Director de Proyecto se adopta una **categoría de tráfico T32 para tronco de la carretera de Balupor**.

## 2.2 CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO EN ENLACES.

En cuanto a las intersecciones, se ha considerado en general tráfico T32, igual que en el tronco, pues se han diseñado como glorietas partidas y como tales, son de radio reducido, y los ramales de acceso a las mismas se encuentran muy cercanos al tronco, y por homogeneidad con el mismo, y facilidad de construcción se han diseñado con este criterio.

Por tanto se dimensiona la sección estructural de firme con **categoría de tráfico pesado T32**.

### 2.3 CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO EN DESVÍOS PROVISIONALES DE CARRETERAS.

Por economía y dado el escaso periodo de servicio de estos desvíos, y de acuerdo a lo que se establece en la *Norma 6.1-IC* para vías de servicio no agrícolas en carreteras de calzadas separadas, se considera dos categorías de tráfico pesado menos que la que corresponde a la calzada principal, que es T32, por tanto se dimensiona la sección estructural de firme con **categoría de tráfico pesado T42**.

### 2.4 RESUMEN DE CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO

De los apartados anteriores se obtiene que las categorías de tráfico pesado adoptadas son:

- Tronco carretera N-260: **T32**
- Ramales unidireccionales y glorietas: **T32**
- Desvíos provisionales de carreteras: **T42**

## 3. EXPLANADA

La *Norma 6.1-IC* considera tres categorías de explanada definidas según el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (Ev2), obtenido de acuerdo con la NTL-357

“Ensayo de carga con placa”:

Categoría de explanada	Ev2 (MPa)
E1	≥ 60
E2	≥ 120
E3	≥ 300

La explanada deberá cumplir una deflexión patrón máxima:

Categoría de explanada	Deflexión patrón (10-2 mm)
E1	≤ 250
E2	≤ 200
E3	≤ 125

### 3.1 EXPLANADA EN TRONCO

Siguiendo la norma 6.1-IC “Secciones de firme” se ha seleccionado la explanada más adecuada teniendo en cuenta la categoría de tráfico pesado adoptada para el tronco (T32), así como el tipo de suelo de la explanación (en los desmontes) o de la obra de tierra subyacente (en los terraplenes o rellenos todo-uno) de acuerdo con lo establecido en el Anejo nº 7. “Estudio Geotécnico del corredor”.

La carretera objeto de este estudio va a media ladera, en una zona montañosa con un espacio mínimo para el trabajo de las máquinas que vayan a ejecutar la explanada. Además deberá mantenerse el tráfico en una de las calzadas existentes de la carretera. No hay espacio físico disponible para disponer la maquinaria para ejecución de suelos estabilizados con cemento en la zona objeto de estudio, es por tanto, y por criterio del Director de Proyecto por lo que se dispondrán **materiales granulares** para ejecución de la explanada.

Las explanadas tipo E3 se constituyen con materiales estabilizados con cemento, por lo que quedan descartadas para la ejecución de explanada, según se ha indicado en el apartado anterior.

Por tanto para categoría de tráfico pesado **T32 y Suelo Tolerable deberá disponerse una categoría de explanada tipo E2**, con materiales granulares no estabilizados con cemento, teniendo en cuenta lo siguiente:

- **Tráfico:** No se puede construir los dos carriles con suelos estabilizados porque hay que mantener el tráfico en uno de los dos carriles existentes y quedaría muy justo el espacio necesario para las máquinas de fabricación de suelo estabilizado, por lo que resulta más conveniente una solución de explanada formada por suelos granulares.

- **Junta Longitudinal:** Quedaría una junta entre los materiales granulares existentes y la calzada proyectada nueva con suelo estabilizado (en el caso de que se proyectara una explanada estabilizada o explanada tipo E3), por lo que se producirían futuros asentamientos en la junta de ambas explanadas.

Dentro de las explanadas que indica la 6.1. IC para Explanada E2 y Suelo Tolerable se escoge aquella que se constituya por materiales granulares no estabilizados (como se ha indicado en los párrafos anteriores), y aquella de menor espesor, teniendo en cuenta que el material vendrá de cantera y que no se aprovecha material existente en la traza.

Siendo el coste de la explanada E2 el siguiente, para tolerables (0):

SUELOS TOLERABLES (0):

		ESPESOR m	PRECIO €/m <sup>3</sup>	EXPLANADA E2
E2 (TIPO 1)	SUELO SELECCIONADO (tipo 2)	0,75	6,67	45,02
TOTAL COSTE/ML CALZADA €				45,02

Explanada E2 (TIPO 1): 75 cm Suelo seleccionado (tipo 2)= 9,00 m x 0,75 m x 6,67 €/m<sup>3</sup>

		ESPESOR m	PRECIO €/m <sup>3</sup>	EXPLANADA E2
E2 (TIPO 2)	SUELO SELECCIONADO (tipo 2)	0,40	6,67	24,01
	SUELO ADECUADO (tipo 1)	0,50	5,87	26,42
TOTAL COSTE/ML CALZADA €				50,43

Explanada E2 (TIPO 2): 40 cm Suelo seleccionado (tipo 2) + 50 cm Suelo adecuado (tipo 1)= 9,00 m x 0,40 m x 6,67 €/m<sup>3</sup> + 9,00 m x 0,50 m x 5,87 €/m<sup>3</sup>

**DIFERENCIA (€/ml de calzada) RESPECTO A LA EXPLANADA E2 (TIPO 1): 5,40**

Por tanto la sección adoptada para ejecución de explanada será la Explanada E2, tipo 1, que resulta ser la más económica:

### 75 cm de Suelo Seleccionado (Explanada E2)

Con el fin de unificar secciones y homogeneizar la puesta en obra de la unidad de firmes, se decide dar una solución conjunta de explanada para todos los elementos de trazado.

### 3.2 RESUMEN DE EXPLANADAS ADOPTADAS

Por tanto, la explanada a disponer en tronco de carreteras, ramales, glorietas, desvíos y resto de secciones, será una categoría tipo E2:

- En fondo de desmonte de categoría tolerable deberá disponerse **75 cm de suelo seleccionado** en formación de explanada.
- En coronación de terraplén de tipo tolerable deberá disponerse **75 cm de suelo seleccionado** en formación de explanada.

#### 4. CUMPLIMIENTO CON LA ORDEN CIRCULAR 21/2007 SOBRE EL USO Y ESPECIFICACIONES QUE DEBEN CUMPLIR LOS LIGANTES Y MEZCLAS BITUMINOSAS QUE INCORPOREN CAUCHO (NFU).

##### 4.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

Se debe señalar dos aspectos fundamentales de carácter técnico a la hora de determinar la conveniencia de su empleo:

- Existen pocos tramos de nueva construcción, realizados con betún modificado con caucho procedente de neumáticos fuera de uso, ejecutados por el Ministerio de Fomento.
- En aquellos tramos en los que se ha utilizado este tipo de betún en España, han sido tramos de rehabilitación de la capa de rodadura en su mayoría, realizados con una antigüedad inferior a 14 años, tiempo que se considera insuficiente para la comprobación real de su correcto funcionamiento. Se considera que es demasiado pronto para saber si en un futuro supondrá una mejora de durabilidad respecto a un firme con otro betún de características similares. Dado que apenas existe experiencia en España, las publicaciones sobre su comportamiento a lo largo de la vida útil recurren a Estados Unidos, donde las condiciones climáticas y de materiales no son exactamente extrapolables.
- No podrán proyectarse mezclas bituminosas con caucho dentro del túnel, al resultar más combustibles que una mezcla bituminosa sin caucho. Teniendo en cuenta que resultará más conveniente poner un mismo firme en toda la longitud de la carretera resultará más conveniente la no disposición de caucho en el acondicionamiento de la carretera N-260.

##### 4.2 JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

En cumplimiento con la Orden Circular 21/2007 se realiza una comparación económica entre el Betún tipo PMB 45/80-60 a utilizar en capa de rodadura según indica la Orden

FOM/2523/2014, de 12 de diciembre (PG-3), y el Betún Modificado con Caucho procedente de neumáticos fuera de uso, a utilizar en dicha capa, según se indica en la Orden Circular 21/2007.

Se considera para realizar la comparación la extensión completa, incluido betún y filler de aportación, de una sección calzada de autovía por m<sup>2</sup> de la capa de rodadura con mezcla bituminosa discontinua tipo BBTM 11B, de 3 cm de espesor.

La comparación económica se muestra a continuación:

Comparación económica de la capa de rodadura con betún PMB 45/80-60 con caucho (NFU) y PMB 45/80-60					
Sin caucho			Con caucho		
Usando betún PMB 45/80-60			Usando betún PMB 45/80-60 caucho		
<b>Medición:</b>			<b>Medición:</b>		
M.B. tipo BBTM 11B:	1,00 x 0,03 x 2,33 =	0,0699 t/m	M.B. tipo BBTM 11B:	1,00 x 0,03 x 2,33 =	0,0699 t/m
Betún PMB 45/80-60:	0,0699 x 0,048 =	0,0034 t/m	Betún PMB 45/80-60 caucho:	0,0699 x 0,051 =	0,0036 t/m
Filler de aportación:	1,2 x 0,0033 =	0,0040 t/m	Filler de aportación:	1,2 x 0,0036 =	0,0043 t/m
<b>Coste:</b>			<b>Coste:</b>		
M.B. tipo BBTM 11B:	0,0699 x 31,70 =	2,22 €	M.B. tipo BBTM 11B:	0,0699 x 31,70 =	2,22 €
Betún PMB 45/80-60:	0,0034 x 530 =	1,78 €	Betún PMB 45/80-60 caucho:	0,0036 x 530 =	1,89 €
Filler de aportación:	0,0040 x 49,27 =	0,20 €	Filler de aportación:	0,0043 x 49,27 =	0,21 €
<b>Total sección con betún PMB 45/80-60: = 4,19 €</b>			<b>Total sección con betún PMB 45/80-60 caucho: = 4,32 €</b>		
El incremento de coste por m <sup>2</sup> de sección capa de rodadura por empleo del Betún modificado con Caucho procedente de neumáticos fuera de uso es de 0,12 €/m <sup>2</sup> .					

El incremento de coste por m<sup>2</sup> de sección capa de rodadura por empleo del Betún modificado con Caucho procedente de neumáticos fuera de uso es de 0,12 €/m<sup>2</sup>.

Debido al incremento económico que supone, teniendo en cuenta la coyuntura económica actual, así como por homogeneidad con el pavimento del túnel y cumpliendo con la Orden Circular 21/2007, se considera conveniente el **no uso del Betún modificado con Caucho procedente de neumáticos fuera de uso**, en este proyecto.

**5. SECCIONES TIPO ESTUDIADAS. COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA**

El aprovechamiento óptimo de los recursos económicos exige una cuidadosa selección y estudio de los elementos que suelen intervenir en el análisis de rentabilidad económica, y que son:

- Costes de construcción y primer establecimiento (C1).
- Costes de conservación y rehabilitación durante el período del análisis, actualizados al año de construcción (C2).
- Valor residual de la sección al final del período de análisis (C3).
- Costes energéticos, de usuarios, de demoras durante la conservación, sociales, etc.(C4).

por lo que el coste total de una sección será:

$$C=C_1+C_2+C_3+C_4$$

Como método de análisis económico se usa el denominado "costes durante el ciclo vital", basado en que al tener la inversión de un firme el carácter de inversión a largo plazo, el valor de los costes de primer establecimiento no debe ser determinante de la elección, ya que durante su vida de servicio los firmes requieren distintos niveles de inversión en conservación ordinaria como en rehabilitación.

**5.1 COMPARACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA PARA TRÁFICO T32**

**5.1.1 Costes de construcción y primer establecimiento (C1)**

De los apartados anteriores se deduce que, para el dimensionamiento del firme en el tronco de la carretera N-260, debe considerarse explanada E2 y categoría de tráfico T32.

En función de esto deberá escogerse una sección estructural del firme de entre las que propone en la **Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre por la que se aprueba la norma 6.1-IC "Secciones de firme"**.

Estas secciones son las siguientes:

Explanada E2 y Tráfico T32:

Según la **Orden FOM/3460/2003** sobre secciones de firme.

		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO											
		T31			T32			T41			T42		
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	3111	3112	3114	3211	3212	3214	4111	4112	4114	4211	4212	4214
	E2	3121	3122	3124	3221	3222	3224	4121	4122	4124	4221	4222	4224
	E3	3131	3132	3134	3231	3232	3234	4131	4132	4134	4231	4232	4234

MB Mezclas bituminosas   
 HF Hormigón de firme   
 SC Suelcemento   
 ZA Zahara artificial

Espeores mínimos en cm

(1) Estas capas bituminosas podrán ser proyectadas con mezclas bituminosas en caliente muy flexibles, gravimetración sellada con un tratamiento superficial o mezcla bituminosa abierta en frío sellada con un tratamiento superficial.

**Nota 1:** Para las categorías de tráfico pesado T3 (T31 y T32) las capas tratadas con cemento deberán prefisurarse con espaciadores de 3 a 4 m, de acuerdo con el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3).

**Nota 2:** En la categoría de tráfico pesado T42 con tráficos de intensidad reducida (menor que 100 vehículos/camión/día) podrá disponerse un riego con gránula bicapa como sustitución de los 5 cm de mezcla bituminosa.

Firmes flexibles: 3221

Firmes semirrígidos: 3222

Firme rígido: Sección 3224

Para el resto de secciones se propondrán las homólogas a la que resulte elegida, en función de la categoría de tráfico de cada de una de ellas.

Según la **Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre** por la que se aprueba la norma 6.1-IC “Secciones de firme” para tráfico pesado T32 **podrán emplearse mezclas bituminosas densas tipo D o semidensas tipo S**, así como discontinuas tip M ó F.

Teniendo en cuenta el *Manual sobre pavimentos en Túneles* redactado por Dña. Dolores Cancela Rey de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, **no deberán utilizarse mezclas drenantes ni discontinuas tipo M**, por su gran contenido en huecos que facilitan la propagación del fuego en caso de incendio ya que permiten que los combustibles o líquidos inflamables vertidos se desplacen por su interior. Para tráfico inferiores a T2 dicho Manual indica utilizar rodaduras tipo mezcla semidensa. Por otro lado, el Director del presente Proyecto, Rafael López Guarga, en el artículo de la revista Rutas, de Octubre 2008 reflejaba un estudio (redactado conjuntamente por el Comité C3.3 (WG-6) y la ITA, relativo al “Efecto del firme y pavimento en los incendios en túneles de carretera”, firmado por Willy DE LATHAWER y publicado en el número 334 de la revista ROUTES/ROADS, donde se analizaba los firmes de hormigón y las **mezclas asfálticas densas**, en el mismo no se consideran las mezclas porosas, ya que la AIPCR continúa recomendando que no se utilicen estos materiales en túneles de carretera. El estudio estuvo dirigido a la verificación de si siguen siendo válidas las recomendaciones hechas en 1999 en el informe técnico “Control del fuego y los humos en túneles de carretera” (referencia 1), de la AIPCR. Los resultados de dicho estudio indicaban que no hay un riesgo significativo, si se usan mezclas asfálticas; una mezcla asfáltica no afectaría a las fases de evacuación y rescate de un incendio en túneles, por lo que su contribución al incendio y su propagación es marginal. Se concluye que las mezclas bituminosas, como material del firme, no constituyen una contribución significativa al tamaño del incendio (tanto en lo referente a la tasa de emisión de calor como a la carga total de fuego) en caso de un incendio en un túnel de carretera. Esto es especialmente cierto en la fase inicial del incendio, cuando la auto evacuación y la evacuación deben tener lugar. La posición de la AIPCR en su informe de 1999 (referencia 1) resulta todavía plenamente válida: las mezclas bituminosas convencionales (no porosas) no tienen un impacto significativo adverso en la seguridad durante el incendio y pueden ser empleadas en túneles de carretera.

Por todo ello se ha dispuesto en capa de rodadura una mezcla bituminosa densa en caliente tipo D, por tanto **se utilizará una mezcla para rodadura tipo AC16 surf B50/70 D**.

Dicha mezcla densa (tipo AC 16 surf B 50/70 D) se situará en el tronco de la carretera N-260, enlaces, estructuras en tronco, estructuras fuera de tronco, caminos asfaltados y desvíos de carretera, como capa de rodadura.

El período de análisis económico alcanza a 30 años, conforme al criterio expuesto en la publicación "Recomendaciones para la Evaluación Económica, Coste - Beneficio, de Estudios y Proyectos de Carreteras. MOPT, 1992", aunque el período de estudio de la futura carretera en el apartado de tráfico abarca un período de solamente 20 años, según el Pliego del Proyecto.

Para la comparación económica de las diversas secciones estructurales hay que tener en cuenta que la Orden Circular considera, para las secciones con firme flexible, un período de servicio de veinte años y, para las secciones con firme rígido, el período es de treinta años.

En los arcenes menores de 1,25 m, de acuerdo a la norma 6.1-IC “Secciones de firme”, se extenderán todas las capas del firme que consta en cada una de las secciones.

Para estas valoraciones se han tomado los precios empleados en el proyecto.

A la hora de realizar la composición de cada una de las secciones escogidas se ha tenido en cuenta las siguientes densidades y dotaciones:

Densidades

Mezcla	Densidad (t/m <sup>3</sup> )
AC 16 surf B50/70 D	2,44
AC 22 bin B 50/70 S	2,42

Dotaciones de los riegos:

Riegos	Dotaciones (t/m <sup>2</sup> )
Riego de adherencia entre capas	0,0004
Riego de adherencia sobre suelo cemento	0,0005
Riego de curado	0,0006
Riego de imprimación	0,0013

A continuación se presenta su medición por metro lineal de calzada y un cuadro resumen con su valoración.



**TRÁFICO T32 Y CATEGORÍA DE EXPLANADA E2**

**SECCION ESTRUCTURAL 3222**

**Suelocemento**

(9,50 + 10,10)/2 x 0,30                      **2,940 m3/m**

**Mezcla bituminosa en capa intermedia AC 22 bin B50/70 S**

(9,20+9,30)/2 x 0,05 x 2,42                      **1,119 t/m**

**Mezcla bituminosa en capa de rodadura AC16 surf B 50/70 D**

(9,00+9,10)/2 x 0,05 x 2,44                      **1,104 t/m**

**Betún en mezclas bituminosas B50/70**

En AC 22 bin:  
1,119 x 0,040                      **0,045 t/m**

**Betún en capa de rodadura (B50/70):**

En AC16 surf:  
1,104 x 0,045                      **0,050 t/m**

**Filler de aportación**

En AC 22 bin:  
1,1 x 0,50 x 0,045                      **0,025 t/m**

En AC16 surf:  
1,2 x 0,50 x 0,05                      **0,030 t/m**

**Total: 0,054 t/m**

**Emulsión en riegos de adherencia bajo rodadura (C60B3 ADH)**

9,10 x 0,0004                      **0,004 t/m**

**Emulsión en riegos de adherencia (C60B3 ADH)**

Entre suelocemento y mezcla bituminosa  
9,30 x 0,0005                      **0,005 t/m**

**Emulsión en riegos de curado (C60B3 CUR)**

9,50 x 0,0006                      **0,006 t/m**

**TRÁFICO T32 Y CATEGORÍA DE EXPLANADA E2**

**SECCION ESTRUCTURAL 3224**

**Zahorra artificial**

0,20 x 9,00

**1,800 m3/m**

**Hormigón vibrado HF 4,0**

0,21 x 9,00

**1,890 m3/m**

COMPARACIÓN ECONÓMICA DE LAS DIVERSAS SECCIONES ESTRUCTURALES DE FIRME DE CARRETERA PARA TRÁFICO T32 Y EXPLANADA E2 (M.L. DE CALZADA)

MATERIAL	UD	PRECIO	SECCION 3221 Espesor 50 cm.		SECCION 3222 Espesor 40 cm.		SECCION 3224 Espesor 41 cm	
			Medic.	Ppto.	Medic.	Ppto.	Medic.	Ppto.
Zahorra artificial	m3	18,18	3,518	63,95	-	-	-	-
Zahorra artificial drenante	m3	18,18	-	-	-	-	1,800	32,72
Suelocemento	m3	27,37	-	-	2,940	80,47	-	-
Hormigón magro	m3	79,19	-	-	-	-	0,000	0,00
Hormigón vibrado HF- 4,5	m3	139,59	-	-	-	-	1,890	263,83
M.B. en capa de base, tipo AC 32 base B50/70 G	t	26,47	-	-	-	-	-	-
M.B. en capa intermedia, tipo AC 22 bin B50/70 S	t	26,45	2,251	59,53	1,119	29,60	-	-
M.B. discontinua en capa de rodadura, tipo AC16 surf B 50/70 D	t	36,48	1,104	40,28	1,104	40,28	-	-
Betún en M.B. (B50/70)	t	440,00	0,000	0,00	0,000	0,00	-	-
Betún modificado con caucho en capa de rodadura PMBC 45/80-60	t	530,00	0,050	26,33	0,050	26,33	-	-
Filler de aportación	t	49,27	0,079	3,91	0,054	2,68	-	-
Emulsión en riegos de adherencia bajo rodadura (C60B3 ADH)	t	447,57	0,004	1,63	0,004	1,63	-	-
Emulsión en riegos de adherencia (C60B3 ADH)	t	369,70	0,000	0,00	0,000	0,00	-	-
Emulsión en riegos de curado (C60B3 CUR)	t	369,70	-	-	0,006	2,11	0,000	0,00
Emulsión en riegos de imprimación (C50BF4 IMP)	t	379,22	0,013	4,78	-	-	-	-
		<b>TOTALES</b>		<b>200,40</b>		<b>183,10</b>		<b>296,55</b>

COSTES DE CONSERVACIÓN

INTERÉS DEL 3% ANUAL  
 DURANTE 20 AÑOS

5.1.2 Costes de conservación y rehabilitación (C2).

5.1.2.1 Conservación ordinaria o preventiva

Los costes de conservación ordinaria, o preventiva, se realizan de forma rutinaria con el objetivo de evitar que el pavimento se deteriore a velocidad superior a la prevista.

En este coste de conservación se incluyen todas aquellas operaciones menores que por su cuantía, o por su habitualidad, no pueden ser consideradas como de rehabilitación del firme. Estas operaciones son entre otras:

- Sellado de grietas.
- Fresado, abujardado o ranurado en firmes rígidos.
- Reparaciones puntuales.
- Otros.

A falta de base de datos para estimar este coste, generalmente se adopta el criterio de estimar los gastos de conservación ordinaria como un porcentaje del coste de construcción de la sección. Se considera este gasto de conservación como un 2 % de la inversión inicial, con un valor anual constante.

Así, la conservación de un año K tendrá un coste:

$$C_{21}^k = 0,02 * C_1$$

y considerando un interés anual del 3 % a fin de actualizar costes, el coste de la conservación anual será:

$$C_{21} = 0,02 * C_1 * \sum_{n=1}^{n=20} (1 + 0,03)^{-n}$$

Año	Factor	Valor
Año 0		
Año 1	1/(1+0,03)^1 = 0,971	0,971
Año 2	1/(1+0,03)^2 = 0,943	1,914
Año 3	1/(1+0,03)^3 = 0,915	2,829
Año 4	1/(1+0,03)^4 = 0,888	3,717
Año 5	1/(1+0,03)^5 = 0,863	4,58
Año 6	1/(1+0,03)^6 = 0,837	5,417
Año 7	1/(1+0,03)^7 = 0,813	6,23
Año 8	1/(1+0,03)^8 = 0,789	7,019
Año 9	1/(1+0,03)^9 = 0,766	7,785
Año 10	1/(1+0,03)^10 = 0,744	8,529
Año 11	1/(1+0,03)^11 = 0,722	9,251
Año 12	1/(1+0,03)^12 = 0,701	9,952
Año 13	1/(1+0,03)^13 = 0,681	10,633
Año 14	1/(1+0,03)^14 = 0,661	11,294
Año 15	1/(1+0,03)^15 = 0,642	11,936
Año 16	1/(1+0,03)^16 = 0,623	12,559
Año 17	1/(1+0,03)^17 = 0,605	13,164
Año 18	1/(1+0,03)^18 = 0,587	13,751
Año 19	1/(1+0,03)^19 = 0,570	14,321
Año 20	1/(1+0,03)^20 = 0,554	14,875

COSTE DE CONSERVACIÓN TOTAL EN 20 AÑOS (2% DE LA INVERSIÓN INICIAL),  
 CONSIDERANDO INTERÉS ANUAL DEL 3%

$$C2 = 0,02 * C1 * 14,875 = 0,298 * C1$$

COSTE DE CONSERVACIÓN ANUAL (2% DE LA INVERSIÓN INICIAL),  
 CONSIDERANDO INTERÉS ANUAL DEL 3%

$$0,02 * C1 * 14,875 * (1/20) = 0,015 * C1$$

5.1.2.2 Rehabilitación

Los costes de rehabilitación se realizan con una determinada periodicidad y consisten, generalmente, en un refuerzo del firme para rehabilitar su capacidad estructural, reponer el coeficiente de rozamiento superficial y la regularidad superficial.

Para la comparación económica de las diversas secciones estructurales hay que tener en cuenta que la **Norma 6.3-IC sobre rehabilitación de firmes** considera, para la categoría de tráfico T32, un período de servicio de veinte años para las secciones con firme flexible y de treinta años para las secciones con firme rígido, por lo que hay que considerar el coste del refuerzo del firme necesario para equiparar ambos periodos de servicio.

### FIRMES FLEXIBLES

Según la **Norma 6.3-IC Sobre rehabilitación de firmes**

(Tabla 5- Espesor (\*) (cm) de recrecimientos con mezcla bituminosa)

FIRMES FLEXIBLES Y SEMIFLEXIBLES						
DEFLEXIÓN DE CÁLCULO (d <sub>c</sub> ) (10 <sup>-2</sup> mm)	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO					
	T00	T0	T1	T2	T3	T4
0-40	10	ZONA DE ACTUACIÓN PREVENTIVA				
40-60	12	10	8			
60-80	15	12	10	8		
80-100	18	15	12	10	5	
100-125		18	15	12	8	5
125-150			18	15	10(**)	6(**)
150-200				18	12(**)	8(**)
>200	ZONA DE ESTUDIO ESPECIAL					

(\*) Valor mínimo en cualquier punto de la sección transversal del carril de proyecto

(\*\*) Ver apartado 9.7 de la Norma 6.3-IC Sobre rehabilitación de firmes

El espesor del refuerzo, para un tráfico T32 y en función del estudio de deflexiones que se realice, varía entre 5 y 12 cm. de mezclas bituminosas. Se toma un valor intermedio de 9 cm., distribuido en una capa de rodadura tipo M.B. tipo AC16 surf B50/70 D de 5 cm y otra intermedia de 4 cm. de M.B. tipo AC22 bin B50/70 S, siendo el coste adicional del firme flexible de **42,56 €**. Dicho coste se justifica en el cuadro presentado a continuación.

Esta inversión se realizaría dentro de veinte años, por lo que actualizamos dicha cantidad con una tasa de crecimiento del 4 %, para obtener euros constantes del año en curso, con lo que la inversión por refuerzo del firme quedaría como sigue:

93,26 €

————— = 42,56 € (FIRMES FLEXIBLES)

(1+0,04)<sup>20</sup>

### FIRMES SEMIRÍGIDOS

Según la **Norma 6.3-IC Sobre rehabilitación de firmes**

(Tabla 5- Espesor (\*) (cm) de recrecimientos con mezcla bituminosa)

FIRMES SEMIRÍGIDOS						
DEFLEXIÓN DE CÁLCULO (d <sub>c</sub> ) (10 <sup>-2</sup> mm)	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO					
	T00	T0	T1	T2	T3	T4
0-40	8	6	ZONA DE ACTUACIÓN PREVENTIVA			
40-50	15	12	10			
50-80	18	15	12	10	8	
80-125			15	12	8	5
125-150			18	15	10(**)	6(**)
150-200				18	12(**)	8(**)
>200	ZONA DE ESTUDIO ESPECIAL					

(\*) Valor mínimo en cualquier punto de la sección transversal del carril de proyecto

(\*\*) Ver apartado 9.7 de la Norma 6.3-IC Sobre rehabilitación de firmes

El espesor del refuerzo, para un tráfico T32 y en función del estudio de deflexiones que se realice, varía entre 8 y 12 cm. de mezclas bituminosas. Se toma un valor intermedio de 10 cm., distribuido en una capa de rodadura tipo M.B. tipo AC16 surf B50/70 D de 5 cm y otra intermedia de 5 cm. de M.B. tipo AC22 bin B50/70 S, siendo el coste adicional del firme sería de **47,05 €**. Dicho coste se justifica en el cuadro presentado a continuación.

Esta inversión se realizaría dentro de veinte años, por lo que actualizamos dicha cantidad con una tasa de crecimiento del 4 %, para obtener euros constantes del año en curso, con lo que la inversión por refuerzo del firme quedaría como sigue:

103,09 €

————— = 47,05 € (FIRMES SEMIRÍGIDOS)

(1+0,04)<sup>20</sup>

### 5.1.3 Otros costes (C3 y C4)

Además de los estimados en apartados anteriores existen otra serie de costes que se refieren a los usuarios. Entre ellos se encuentran los de explotación (consumo de combustible, mantenimiento del vehículo, etc.), las demoras debidas a operaciones de mantenimiento o reparación y otras sociales.

Los costes anteriormente citados son difícilmente cuantificables y se estiman muy similares para las distintas soluciones. Además, las Administraciones Públicas no suelen incluirlos en sus estudios de rentabilidad.

Por todo ello se ha estimado que considerar nula la diferencia relativa entre estos costes en todas las alternativas no dará lugar a errores en la cuantificación de las soluciones planteadas. Por consiguiente:

$$\Delta C_4 = 0$$

En cuanto al valor residual considerando que la rehabilitación tiene una vida útil de 10 años y la última se efectúa en el año 10º, su valor residual es nulo en todos los casos.

### 5.1.4 Coste total

En función de los datos anteriores, el coste total de una sección por metro lineal de calzada es el que se indica en la tabla adjunta:

SECCIÓN DE FIRME	EXPLANADA E2 - TRÁFICO T32		
	3221	3222	3224
COSTE CONSTRUCCIÓN	200,40	183,10	296,55
COSTE REHABILITACIÓN	42,56	47,05	-
COSTE CONSERVACIÓN	59,62	54,47	88,22
<b>COSTE TOTAL FIRME</b>	<b>302,59</b>	<b>284,62</b>	<b>384,77</b>
DIFERENCIA CON LA SECC. 3221 (€)	0,00	-17,97	82,18
DIFERENCIA CON LA SECC. 3221 (%)	0,00%	-5,94%	78,64%

Resultando más económica, como solución para el firme de las calzadas del tronco de la autovía, la sección estructural 3222 con subbase de suelocemento, de la *Norma 6.1-IC "Secciones de firme"*, no obstante por criterio del Director de Proyecto, y teniendo en cuenta:

- **Tráfico:** No se puede construir los dos carriles con Suelocemento porque hay que mantener el tráfico en uno de los dos carriles existentes y quedaría muy justo el espacio necesario para las máquinas de fabricación de suelocemento, por lo que resulta más conveniente una solución de firme con subbase de zahorra artificial.
- **Junta Longitudinal:** Quedaría una junta entre la zahorra existente y la calzada proyectada nueva con suelocemento, por lo que se producirían futuros asientos y se rompería el firme en la junta.
- **Vida útil:** Según experiencia del Director de Proyecto, terminada su vida útil (30 años) el cemento envejece más y su capacidad estructural se agota peor que la zahorra, porque cuesta más repararlo cuando se agota. Al estar encajonada la zona del Proyecto tendría un coste mayor su reparación.

, se adopta la **sección estructural 3221** con subbase de zahorra artificial, **de la Norma 6.1-IC "Secciones de firme"**.

**6. SECCIONES TIPO ADOPTADAS EN NUEVO TRAZADO DE CARRETERA**

**6.1 TRONCO CARRETERA N-260**

**Sección 3221 (Tráfico T32 y Explanada E2)**

Capa de rodadura	5 cm de mezcla bituminosa tipo AC16 surf B50/70 D
Riego de adherencia	(Emulsión C60B3 ADH)
Capa intermedia	10 cm. de mezcla bituminosa tipo AC 22 bin B 50/70 S
Riego de imprimación	(Emulsión C60BF4 IMP)
Capa de sub base	35 cm. de zahorra artificial

En arcenes de anchura superior a 1,25 m el arcén, se dispondrá un pavimento constituido por simple tratamiento superficial, el resto hasta la explanada será zahorra artificial. Se dispondrán 50 cm de zahorra artificial, distribuidos en dos capas, una primera capa de 15 cm y otra capa de 35 cm. Entre el simple tratamiento superficial y la zahorra artificial se dispondrá un riego de imprimación (C60BF4 IMP).

En los arcenes de longitud menor de 1,25 m, el firme será prolongación del firme de la calzada adyacente. Su ejecución será simultánea, sin junta longitudinal entre la calzada y el arcén.

**6.2 RAMAL UNIDIRECCIONAL Y GLORIETAS**

**Sección 3221 (Tráfico T32 y Explanada E2)**

Capa de rodadura	5 cm de mezcla bituminosa tipo AC16 surf B50/70 D
Riego de adherencia	(Emulsión C60B3 ADH)
Capa intermedia	10 cm. de mezcla bituminosa tipo AC 22 bin B 50/70 S
Riego de imprimación	(Emulsión C60BF4 IMP)

Capa de sub base	35 cm. de zahorra artificial
------------------	------------------------------

En arcenes de anchura superior a 1,25 m el arcén, se dispondrá un pavimento constituido por simple tratamiento superficial, el resto hasta la explanada será zahorra artificial. Se dispondrán 50 cm de zahorra artificial, distribuidos en dos capas, una primera capa de 15 cm y otra capa de 35 cm. Entre el simple tratamiento superficial y la zahorra artificial se dispondrá un riego de imprimación (C60BF4 IMP).

En los arcenes de longitud menor de 1,25 m, el firme será prolongación del firme de la calzada adyacente. Su ejecución será simultánea, sin junta longitudinal entre la calzada y el arcén.

**6.3 FIRME EN ESTRUCTURAS**

La Norma 6.1.-IC "Secciones de Firme" no es aplicable a los pavimentos sobre puentes ni en túneles, por lo que se adoptan las secciones estructurales adecuadas que garanticen la eliminación de irregularidades de la capa de hormigón, presenten una superficie de rodadura segura y cómoda y garanticen así mismo la continuidad con el pavimento del resto de viales.

Para ello se ha aplicado el apartado 3.2.1. "Acciones permanentes (G)" de la "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-98)" en el que se indica, en lo relativo a espesores de pavimento de mezcla bituminosa: "el espesor máximo del pavimento bituminoso proyectado y construido sobre tablero de losa de hormigón no será en ningún caso superior a diez centímetros (10 cm) incluida la eventual capa de regularización". Teniendo en cuenta este apartado y las dimensiones sobre los espesores de las mezclas indicadas en el PG-3 de enero 2015 se ha dimensionado la siguiente sección de firme en estructuras:

**Sección de firme de las estructuras**

Capa de rodadura	5 cm de mezcla bituminosa tipo AC16 surf B50/70 D
Riego de adherencia	(Emulsión C60B3 ADH)

Impermeabilización (monocapa constituida por: imprimación asfáltica, lámina asfáltica de betún modificado con elastómeros totalmente adherida al soporte con soplete).

#### Tablero de hormigón

La impermeabilización se realizará con solución monocapa constituida por imprimación asfáltica, lámina asfáltica de betún modificado con elastómeros totalmente adherida al soporte con soplete. La emulsión bituminosa será tipo C60BF5 IMP, el oxiasfalto se suministrará en sacos tipo OA 80/25 de aplicación en caliente y la lámina de impermeabilización será de betún asfáltico de 4 kg/m<sup>2</sup>.

#### 6.4 FIRME EN TÚNELES

La sección de firme en el tronco de carretera proyectado en túnel será análoga a la definida en los tramos de cielo abierto.

De acuerdo al Real Decreto 635/2006 de 26 de mayo de 2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en túneles de Carreteras del Estado publicado en BOE número 126 de 27 de mayo de 2006, dentro del Anexo I Medidas de Seguridad a que se refiere el artículo 4, en su apartado 2.3 Pavimento y revestimientos de hormigón proyectado se indica que “Salvo razones debidamente justificadas, en túneles de más de 1.000 metros se empleará pavimento con hormigón con aditivos coloreantes para que proporcionen suficiente contraste con las marcas viales”.

Este sería el caso del túnel de Balupor, cuya longitud es de 1.740 m.

No obstante, en el Túnel de Balupor se ha optado mantener la misma sección de firme dentro del túnel por Criterio del Director de Proyecto, en este caso en concreto. El firme bituminoso es una solución que debe contemplarse como alternativa al firme de hormigón por las siguientes razones que se justifican:

- ✓ *La necesidad de minimizar las actuaciones de conservación y rehabilitación en el interior de los mismos por la afección al tráfico que conllevan y a la necesidad de mantenerlos en servicio.*

En este apartado debe indicarse que aunque la durabilidad de los pavimentos de hormigón es mayor que los de mezclas bituminosas en caliente, debe tenerse en cuenta que al no estar expuestos a las variaciones climáticas del exterior, ambos tipos de firmes presentan una durabilidad mayor frente a una disposición exterior. Al ser un túnel de dos carriles y una única calzada se hace necesario que las operaciones de conservación y mantenimiento sean mínimas, para interrumpir el tráfico lo mínimo posible, es por tanto que se opta por un firme de mezclas bituminosas en lugar de un firme de hormigón, teniendo en cuenta que las mezclas bituminosas tienen menores gastos de conservación y mantenimiento.

1. La prohibición del uso de mezclas bituminosas en Austria, Eslovaquia y Eslovenia se basa en consideraciones de explotación y no por razones ligadas a incendios y a la propagación de humos. Entre las ventajas que normalmente se atribuyen a los pavimentos de hormigón está su mayor durabilidad y que las actuaciones de reparación son menos frecuentes que en un firme bituminoso. Sin embargo es indudable que cuando es necesario hacerlas son de mayor complejidad y duración, incrementándose esta dificultad por el carácter montañoso del túnel. En algunos casos puede obligar al cierre del túnel derivando todo el tráfico por la antigua carretera, que queda como vía de escape del túnel.

- ✓ *Minimizar el riesgo de incendio dentro del túnel.*

En el caso de la utilización en túneles de los firmes asfálticos se ha planteado si el ligante de betún podría ser el causante de una potencial carga de fuego añadida, lo que justificaría limitar o abandonar esta forma de construir por causas de seguridad.

Con objeto de evaluar mejor el efecto del fuego sobre los aglomerados asfálticos y de su comportamiento frente a las altas temperaturas generadas por un incendio, ya desde el inicio de los años sesenta se han llevado a cabo múltiples ensayos. Las conclusiones de todos estos estudios se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. La posición de la AIPCR: “las mezclas bituminosas normales (densas) no tienen ningún efecto adverso significativo sobre la seguridad en caso de incendio y pueden ser utilizados en los túneles carreteros” (Routes/Roads nº334-2007 “Effets de la chaussée sur les incendies dans les tunnels

routiers”). Los últimos estudios realizados desde 1999 llegan a las mismas conclusiones: no existe riesgo significativo ligado a la utilización de firmes bituminosos, teniendo en cuenta el carácter marginal de su contribución al fuego y a su propagación.

2. En la ponencia presentada en el IV Simposio de Túneles (Andorra 2005) “Manual sobre pavimentos en túneles” por María Dolores Cancela Rey se recogen los problemas asociados a la seguridad en caso de incendio indicándose que aunque los pavimentos bituminosos producen llamas a 450°C, no se propagan y únicamente afecta en superficie. El criterio que se recogía en la propuesta de Manual era aceptar los firmes bituminosos, restringiendo la utilización de mezclas drenantes y mezclas discontinuas tipo M.
3. En la Revista de Obras Públicas (febrero 2007 nº 3474) “Una propuesta para el proyecto de firmes y pavimentos de túneles” (Del Val, Romana García y Galvis) que incide en los aspectos señalados más arriba: posibilidad de utilización de pavimentos bituminosos o de hormigón en función de diferentes factores: terreno de excavación, entorno, longitud del túnel, desvíos alternativos, espacio en el tubo, tipo de firme del resto de la vía y “comprensión” del usuario. Se añade, de forma muy razonable, que los factores no son independientes y que además son todos relativos, siendo posible encontrar ejemplos y contraejemplos.
4. Según el Manual sobre pavimentos de túneles redactado por Dña. María Dolores Cancela Rey de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, en Europa no se ha tomado ninguna decisión al respecto, y en la Directiva 2004/C E/05 del Parlamento y del Consejo de la Unión Europea, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras no se incluyen requisitos sobre la resistencia al fuego de los materiales empleados en los firmes. Hay algún país (Austria) que ha optado por construir pavimentos de hormigón en todos sus túneles de longitud superior a 1000 m, pero el resto de los países admiten ambos tipos de superficies, y ese es el criterio que se ha seguido en las recomendaciones.
5. El hormigón es un material incombustible pero con temperaturas altas (mayores de 400°C) se puede producir el efecto “spalling” o lajeo con desprendimientos bruscos de pequeños trozos de espesor reducido del hormigón en contacto con el fuego. La reparación del firme en caso de incendio y “spalling” asociado sería delicada y obligaría al cierre del túnel.
6. El firme bituminoso permite la continuidad de firme con el situado fuera del túnel y la uniformidad con el resto de túneles ubicados en la zona.
7. Los áridos de la zona de naturaleza offítica cumplen los requisitos de CRT recogido en el Decreto.
8. Las condiciones locales de la vía, principalmente las condiciones climáticas (con gradientes de 20°C entre la noche y el día) y de orientación, son más adecuadas para el firme bituminoso, de hecho.
9. Las marcas viales resultan mucho más visibles y funcionales con la utilización de un pavimento a base de materiales bituminosos, aun cuando en el caso de pavimento rígido se apliquen aditivos colorantes.
10. Una mezcla asfáltica no se enciende fácilmente y se necesita una gran energía térmica para llegar al fenómeno de la autoinflamación. Se comprueba que este nivel de sollicitación sólo se encuentra en los lugares donde se sitúan los focos del incendio (vehículos ardiendo, sustancias combustibles incendiadas, etc). Este nivel, por otra parte, es incompatible con la presencia de usuarios o de los servicios de socorro ya que coincide con el lugar donde se produce la inflamación.
11. Los ensayos muestran que durante la inflamación del aglomerado, sólo la parte superficial del mismo participa en el incendio, ya que se forma una cáscara inerte en la superficie de la calzada, formada por los residuos de la combustión del betún, que protege al resto del material.
12. Los caudales medidos de los productos de la combustión generados son los débiles, comparados con los implicados por la combustión que ha generado el incendio en el túnel. La cantidad de gas producida y el caudal calorífico generado por la combustión del firme no tienden, pues, a agravar

significativamente la situación para los usuarios durante la fase de evaluación. Los gases emitidos son fundamentalmente CO<sub>2</sub> y CO. Gases tóxicos, como pueden ser hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) sólo aparecen en trazas.

13. Los diferentes ensayos realizados han mostrado que no se produce propagación del fuego a través de la capa.

Como resumen a todo lo expuesto, se puede afirmar que en la elección de un pavimento para un túnel, ya sea de hormigón o asfáltico, la problemática de su respuesta en caso de incendio no se debe utilizar como argumento fundamental decisorio, porque, después de la realización de gran cantidad de ensayos con incendios y de su conocimiento derivado, se puede constatar que, en el caso de catástrofes debidas a incendios, la aplicación de firmes asfálticos en los túneles no implica más peligro que el uso de calzadas de hormigón.

Además de estas dos razones, hay que tener en cuenta particularizando para este proyecto que la característica fundamental del túnel proyectado es que es un túnel de pequeña longitud con calzadas al aire libre antes y después del mismo. De esta manera, la longitud de calzada situada al aire libre es mucho mayor que la situada dentro de túnel. A esto hay que añadir que el firme de la calzada proyectado es un firme flexible, en el que se colocan mezclas asfálticas sobre subbase de zahorra artificial.

La decisión de empleo de un firme rígido en el túnel lleva aparejada que se cambia de tipo de firme en determinados puntos, que hay que definir, y cuya definición ya es delicada en sí. Este cambio de firme presenta una serie de problemas en cuanto a ejecución:

- El pavimento de hormigón armado continuo que, de acuerdo al RD 635/2006 sería necesario disponer a priori en el túnel de Balupor, debido a la propia concepción de la maquinaria de extendidos (medidas, gálidos, etc.) obligan a efectuar juntas longitudinales laterales, en situación no deseada. Estas juntas pueden hacer peligrar, en primer lugar, las condiciones exigidas de regularidad superficial y, en segundo lugar, pueden propiciar un deterioro prematuro del firme en las zonas donde se sitúan.
- En el caso de firmes armados continuos, la disposición de armaduras transversales y longitudinales dificulta, con los condicionantes de ejecución, la obtención de los

parámetros de acabado requeridos que sí pueden obtenerse con las mezclas bituminosas en caliente.

- El Proyecto de Trazado entregado previamente diseña un firme de mezclas bituminosas en caliente para todo el tramo por lo que, de realizarse el pavimento de hormigón en el túnel se producirán discontinuidades localizadas en las zonas de unión de ambos pavimentos. En estas zonas sería necesario estudiar, con sumo cuidado, las juntas de conexión de ambos firmes, estableciendo las transiciones oportunas, bien diseñadas, para conseguir un cambio gradual en las condiciones de circulación y de estructura resistente del firme.

Por último, hay que añadir que en el resto de la obra, el firme se ejecutara con mezclas bituminosas en caliente por lo que parece razonable la adopción de este firme en aras a la homogeneidad en el tramo.

Por ello, en base a todo lo expuesto anteriormente, se puede concluir que existen razones técnicas debidamente justificadas para la utilización de firme bituminoso en el Túnel de Balupor, quedando la sección de firme en calzada y arceñas, en definitiva, del siguiente modo:

#### **Sección 3221 (Tráfico T32 y Explanada E2)**

Capa de rodadura	5 cm de mezcla bituminosa tipo AC16 surf B50/70 D (*)
Riego de adherencia	(Emulsión C60B3 ADH)
Capa intermedia	10 cm. de mezcla bituminosa tipo AC 22 bin B 50/70 S
Riego de imprimación	(Emulsión C60BF4 IMP)
Capa de sub base	35 cm. de zahorra artificial

(\*) Se adoptará de acuerdo al Manual sobre pavimentos en Túneles redactado por Dña. Dolores Cancela Rey de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, un alto contenido de ligante, para conseguir mezclas más cerradas y duraderas que en las carreteras en campo abierto, teniendo en cuenta además que en los túneles, dada la escasa presencia de agua en superficie, es más importante la microtextura que la macrotextura.

## 6.5 DESVÍOS PROVISIONALES DE CARRETERAS

Por economía y dado el escaso periodo de servicio de estos desvíos, y de acuerdo a lo que se establece en la Norma 6.1-IC para vías de servicio no agrícolas en carreteras de calzadas separadas, se considera dos categorías de tráfico pesado menos que la que corresponde a la calzada principal, que es T32, por tanto se dimensiona la sección estructural de firme con categoría de tráfico T42, cuya distribución de capas y espesores es:

### Sección 4221 (Tráfico T42 y Explanada E2)

Capa de rodadura	5 cm de mezcla bituminosa tipo AC16 surf B50/70 D
Riego de imprimación	(Emulsión C60BF4 IMP)
Capa de sub base	25 cm. de zahorra artificial

En arcenes de anchura superior a 1,25 m el arcén, se dispondrá un pavimento constituido por simple tratamiento superficial, el resto hasta la explanada será zahorra artificial. Se dispondrán 30 cm de zahorra artificial en una única capa. Entre el simple tratamiento superficial y la zahorra artificial se dispondrá un riego de imprimación (C60BF4 IMP).

En los arcenes de longitud menor de 1,25 m, el firme será prolongación del firme de la calzada adyacente. Su ejecución será simultánea, sin junta longitudinal entre la calzada y el arcén.

## 6.6 CAMINOS AGRÍCOLAS Y CAMINOS DE OBRA Y DESVÍOS PROVISIONALES DE CAMINOS.

Los caminos agrícolas, caminos de obra, y desvíos provisionales de caminos estarán compuestos por 30 cm. de zahorra artificial sobre 30 cm. de suelo adecuado, según la *O.M. 16 de diciembre de 1997 por la que se regulan los accesos a las carreteras del Estado, las vías de servicio y la construcción de instalaciones de servicios*. Sobre la zahorra artificial se extenderá un riego de imprimación, y un simple tratamiento superficial.

El acceso a caminos se afirmará en una longitud mínima de 25m a medir desde la arista exterior de la calzada de la carretera o desde la estructura.

## 6.7 CAMINOS ASFALTADOS

Los entronques de los caminos con viales asfaltados dispondrán de mezcla bituminosa en rodadura en sus últimos 20 m de longitud para evitar la contaminación con arenas de la carretera a la que acceden. Con ello se consigue un mayor agarre de los neumáticos de los vehículos que ingresan en la carretera desde el camino, en el momento de incorporación al mismo desde posición de parada.

Además se asfaltarán los siguientes caminos: C.S. 2.0-2.4; C.S. 2.4-2.8; C.S. 4.1-4.3; C.S. 4.7-4.8; C.S. 4.8 M.I.; C.S. 8.2; Conexión a Ligüerre de Ara y C.S. 9.3-9.5 .

Se ha previsto mezcla bituminosa en rodadura en tramos de inclinación de la rasante elevada que supere el 5% (accesos a Pasos Superiores).

En los caminos asfaltados se sustituye el simple tratamiento superficial por 5 cm de mezcla bituminosa AC16 surf D.

Estarán compuestos por 30 cm de zahorra artificial sobre 30 cm de suelo adecuado, según la *O.M. 16 de diciembre de 1997* por la que se regulan los accesos a las carreteras del Estado, las vías de servicio y la construcción de instalaciones de servicios, y sobre la zahorra artificial se extenderá un riego de imprimación, un riego de adherencia y a continuación una capa de 5 cm de mezcla bituminosa AC16 surf B 50/70 D.

## 7. REFUERZO DE FIRME SOBRE FIRME EXISTENTE

### 7.1 TRONCO CARRETERA EXISTENTE N-260

En aquellos casos en los que haya que mantenerse el gálibo deberá proyectarse una solución de demolición de firme existente y reposición del mismo. En el proyecto objeto de este estudio no es necesario mantener el gálibo por lo que podría, a priori, recrecerse el firme correspondiente al refuerzo proyectado, ya que dicha solución conlleva un menor perjuicio para los usuarios y menores cortes de circulación.

En el apéndice 4 se incluyen fotos de las catas de firme realizadas en la carretera existente con fecha 26/05/2016. De las mismas se obtienen los siguientes datos:

- CF-1 (x740405,y4707171)
  - 0,00-0,16 m. Aglomerado asfáltico (0,16 cm de espesor)
  - 0,16-0,26 m. Zahorra artificial (0,10 cm de espesor)
  - 0,26-0,50 m. Q5 Conos de deyección (0,24 cm de espesor)
- CF-2 (x743682, y4706487)
  - 0,00-0,16 m. Aglomerado asfáltico (0,16 cm de espesor)
  - 0,16-0,20 m. Zahorra artificial (0,04 cm de espesor)
  - 0,20-0,50 m. Suelo seleccionado (Terraplén) (0,30 cm de espesor)
- CF-3 (x745728, y4706800)
  - 0,00-0,20 m. Aglomerado asfáltico (0,20 cm de espesor)
  - 0,20-0,28 m. Zahorra artificial (0,08 cm de espesor)
  - 0,28-0,50 m. Suelo seleccionado (Terraplén) (0,22 cm de espesor)

Se obtiene que la mezcla bituminosa existente varía entre 16 y 20 cm, es decir 18 cm de media. La zahorra artificial existente tiene un espesor entre 4 y 10 cm, con una media de 7 cm. El suelo seleccionado varía 22 y 30 cm, con una media de 26 cm.

En el ensanche y mejora de la plataforma se opta por materiales similares a los existentes para evitar futuros asentamientos. El firme del ensanche se diseñará con una rigidez similar a la del firme existente, para evitar que se pudieran producir posibles deterioros por asentamientos diferenciales en la junta longitudinal.

Se procurará **enrasar los planos de explanada del firme existente y del ensanche**. En casos especiales se puede proyectar el plano de explanada del ensanche por debajo del existente, pero nunca por encima.

No será necesario mantener los mismos materiales de la explanada antigua, pero si materiales similares, por lo que la explanada existente estará constituida por los materiales existentes, y la explanada nueva estará constituida por 75 cm de suelo seleccionado.

En cualquier caso la cota de la explanada nueva estará por debajo de la existente y su capacidad portante ( $E_v \geq 120$  para explanada E2, según norma 6.1 IC) será mayor que la explanada existente. La cota de la explanada nueva estará a  $15+35+75 = 125$  m.

No obstante, casi todo el trazado proyectado es de nueva construcción y no apoyamos sobre carretera existente prácticamente, únicamente en los trazos que vamos sobre la carretera existente a veces apoyamos sobre carretera existente. Teniendo en cuenta que se está tratando de aprovechar la carretera existente N-260 de 5 m de ancho para constituir la futura calzada de carretera de ancho 10 m, y para evitar asentamientos entre ambos cimientos que constituyen la explanada de dicha carretera deberá asegurarse:

- Que la capacidad portante de la explanada nueva será  $\geq 120$  para explanada E2 y en todo caso será mayor que la de la explanada existente
- Que la cota de la explanada nueva estará por debajo de la existente
- Que deberán realizarse estudios de deflexiones para dimensionar el refuerzo a realizar
- Se procurará que enrasen la capa de explanada del ensanche con la superficie de la explanada existente

En aquellos casos en que la necesidad de elevar la rasante implique la aportación de suelos sobre el firme existente de la carretera existente N-260, deberán eliminarse previamente las capas tratadas, es decir, las mezclas bituminosas, y dicho firme existente se considerará como el terreno natural subyacente sobre el que se apoyarán los suelos de terraplén, en su caso, y las capas de asiento del nuevo cimiento de firme:



Esquema de incorporación de cuñas laterales al firme existente en acondicionamientos con elevación importante de la rasante

En el año 2015 se terminó la obra de rehabilitación de la N-260. En el tramo Balupor – Fiscal se realizó un recrecido con mezcla S (entre 5 y 6 cm según la zona) en los siguientes tramos:

TRAMO 2.1 (TÚNEL BALUPOR – FISCAL)	
451+300	451+900
452+900	453+300
453+900	454+300
454+500	455+100
455+300	460+000

Los espesores de refuerzo proyectados, en el Proyecto objeto de este estudio, estarán constituidos por la misma sección de firme en nuevo trazado de autovía, teniendo en cuenta los mínimos establecidos en la Tabla 5 de la Norma 6.3-IC sobre Rehabilitación de firmes, para firmes flexibles, en función de la deflexión de cálculo y del tráfico (T32).

DEFLEXIÓN DE CÁLCULO ( $d_f$ ) (10 <sup>-2</sup> mm)	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO					
	T00	T0	T1	T2	T3	T4
0-40	10	ZONA DE ACTUACIÓN PREVENTIVA				
40-60	12	10	8			
60-80	15	12	10	8		
80-100	18	15	12	10	5	
100-125		18	15	12	8	5
125-150			18	15	10 <sup>(**)</sup>	6 <sup>(**)</sup>
150-200				18	12 <sup>(**)</sup>	8 <sup>(**)</sup>
> 200	ZONA DE ESTUDIO ESPECIAL					

El espesor del refuerzo, para un tráfico T32 y en función del estudio de deflexiones que se realice, varía entre 5 y 12 cm. de mezclas bituminosas.

Según la Norma 6.3-IC sobre Rehabilitación de firmes, además se deberá cumplir que el espesor total de mezclas bituminosas nuevas sea, como mínimo, el indicado en la Tabla 4, es decir, 15 cm para tráfico T32. Para calcular dicho espesor total se tendrá en cuenta el

de las capas de mezcla bituminosa del firme existente, que computará aplicándole el coeficiente de equivalencia 0,75. De este modo se obtiene, al aplicar el coeficiente de equivalencia, un espesor de mezcla bituminosa del firme existente de 11 cm (16 cm de media de MB según catas realizadas incluidas en apéndice 4 – 1 cm de escarificado a realizar = 15 cm x 0,75 coef. equivalencia = 11 cm), por lo que el espesor mínimo de refuerzo será, en todos los casos, de 4 cm (15 - 11 cm = 4 cm).

El refuerzo de la autovía existente se realizará, previa regularización de la superficie existente, teniendo en cuenta el Criterio de la Diputación sobre el estado del firme actual de la N-260, con **5 cm de mezcla bituminosa**, a falta del estudio de deflexiones que se realizará en la siguiente fase de proyecto:

Capa de rodadura                    5 cm de mezcla bituminosa tipo AC16 surf B50/70 D

Riego de adherencia            (Emulsión C60B3 ADH)

Escarificado de 1 cm sobre firme existente

Se eliminará la parte superior del firme existente (1 cm), para garantizar una buena adherencia con el material de reposición.

## 7.2 TRAVESÍA

En la travesía de Fiscal se ha realizado recientemente un fresado y reposición de firme. En la totalidad del tramo se extendió una capa de microaglomerado en frío MICROF-8.

Los espesores de refuerzo proyectados, en el Proyecto objeto de este estudio, estarán constituidos por la misma sección de firme en nuevo trazado de autovía, teniendo en cuenta los mínimos establecidos en la Tabla 5 de la Norma 6.3-IC sobre Rehabilitación de firmes, para firmes flexibles, en función de la deflexión de cálculo y del tráfico (T32).

DEFLEXIÓN DE CÁLCULO ( $d_j$ ) ( $10^{-2}$ mm)	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO					
	T00	T0	T1	T2	T3	T4
0-40	10	ZONA DE ACTUACIÓN PREVENTIVA				
40-60	12	10	8			
60-80	15	12	10	8		
80-100	18	15	12	10	5	
100-125		18	15	12	8	5
125-150			18	15	10 <sup>(**)</sup>	6 <sup>(**)</sup>
150-200				18	12 <sup>(**)</sup>	8 <sup>(**)</sup>
> 200	ZONA DE ESTUDIO ESPECIAL					

El espesor del refuerzo, para un tráfico T32 y en función del estudio de deflexiones que se realice, varía entre 5 y 12 cm. de mezclas bituminosas.

Según la Norma 6.3-IC sobre Rehabilitación de firmes, además se deberá cumplir que el espesor total de mezclas bituminosas nuevas sea, como mínimo, el indicado en la Tabla 4, es decir, 15 cm para tráfico T32. Para calcular dicho espesor total se tendrá en cuenta el de las capas de mezcla bituminosa del firme existente, que computará aplicándole el coeficiente de equivalencia 0,75. De este modo se obtiene, al aplicar el coeficiente de equivalencia, un espesor de mezcla bituminosa del firme existente de 11 cm (16 cm de media de MB según catas realizadas incluidas en apéndice 4 – 1 cm de escarificado a realizar = 15 cm x 0,75 coef. equivalencia = 11 cm), por lo que el espesor mínimo de refuerzo será, en todos los casos, de 4 cm (15 - 11 cm = 4 cm).

El refuerzo de la autovía existente se realizará, previa regularización de la superficie existente, teniendo en cuenta el Criterio del Director de Proyecto sobre el estado del firme actual de la N-260 en el tramo de variante, con **5 cm de mezcla bituminosa**:

Capa de rodadura            5 cm de mezcla bituminosa tipo AC16 surf B50/70 D

Riego de adherencia        (Emulsión C60B3 ADH)

Escarificado de 1 cm sobre firme existente

Se eliminará la parte superior del firme existente (1 cm), para garantizar una buena adherencia con el material de reposición.

## 8. DEMOLICIONES

Se demuele el tramo correspondiente a las carreteras afectadas por los ejes proyectados con el siguiente criterio:

- Debido a la ampliación de calzada de la Carretera N-260, se demolerán los arcenes actuales ya que no sirven para alojar los carriles futuros, aprovechándose la parte de la calzada coincidente con los carriles existentes.
- También dentro de la Carretera N-260 se demolerán aquellas zonas de la misma que queden sin uso.
- Siempre que el eje proyectado discurra bajo o sobre la rasante de la carretera existente.
- Siempre que el nuevo trazado de la carretera afectada provoque la existencia de tramos sin servicio.

Se debe tener en cuenta el Real Decreto 105/2008 de 1 de Febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición (BOE N<sup>o</sup> 38, 13/02/2008).

## 9. MATERIALES PARA LA SECCIÓN DE FIRME

Para la elección de las mezclas bituminosas en caliente que formarán parte de cada una de las capas de la sección estructural deben fijarse previamente los siguientes parámetros:

- Tipo de betún asfáltico.
- Relación ponderal entre la dosificación del betún y la de los áridos.
- Relación ponderal entre la dosificación del betún y la del polvo mineral.

La determinación de estos parámetros debe fundamentarse en el hecho de que el presente proyecto se encuentra en una zona térmica estival media.

- **Capa de rodadura.** Mezcla bituminosa en caliente de tipo denso AC 16 surf B50/70 D. Betún 50/70 con una dotación mínima de 4,5% de betún sobre áridos. Polvo mineral de aportación 50% para tráfico T32 y 0% para tráfico T41. Relación polvo mineral-ligante de

1,2 para tráfico T32 y 1,1 para tráfico T41. Huecos de la mezcla entre 3% y 6% y mayor del 90 % de partículas fracturadas para tráfico T32 y mayor de 70% para tráfico T41.

- **Capa intermedia.** Mezcla bituminosa en caliente impermeable tipo AC22 bin B50/70 S, con un 4% de ligante respecto al árido en peso. Betún B50/70. Polvo mineral de aportación 50%. Relación polvo mineral-ligante de 1,1. Huecos de la mezcla entre 4% y 7%. Y partículas fracturadas 90% para tráfico T32 y mayor del 70% para tráficos superiores a T4.

- **Capa de subbase. Zahorra artificial:** Deberá cumplir las especificaciones del artículo 510 del PG-3.

- **Capa de subbase (en arcenes). Zahorra artificial drenante:** Deberá cumplir las especificaciones del artículo 510 del PG-3.

Se realizarán en las capas juntas transversales en fresco antes iniciar su compactación, la separación entre juntas estará comprendida entre tres y cuatro metros (3 y 4 m).

- **Riegos de adherencia:** se dispondrán entre las capas de mezcla bituminosa, siguiendo las especificaciones del artículo 531 del PG-3. Como ligante se empleará la emulsión C60B3 ADH con una dotación entre 0,4 y 0,8 kilogramos por metro cuadrado de emulsión entre capas, que deberá proporcionar entre 0,20 y 0,40 kg/m<sup>2</sup> de ligante residual.

- **Riegos de imprimación:** se dispondrá sobre la capa de zahorra artificial, previa a la colocación sobre esta de una capa bituminosa o tratamiento bituminoso, siguiendo las especificaciones del artículo 530 del PG-3. Como ligante se empleará la emulsión C60BF4 IMP con una dotación de 1,3 kg/m<sup>2</sup> de emulsión, que deberán proporcionar al menos 0,5 kg/m<sup>2</sup> de ligante residual.

- **Relleno de impermeabilización de bermas:** De acuerdo a la *Orden Circular O.C. 17/2003, Recomendaciones para el proyecto y construcción del drenaje subterráneo en obras carreteras*, el material para impermeabilización de bermas será de tipo tolerable y deberá estar constituido por suelos con porcentaje que pasa por el tamiz 0,080 UNE mayor que el 25% de peso del suelo, con un contenido de sales solubles, incluido el yeso, inferior a dos décimas porcentuales.

- **Simple tratamiento superficial:** Como emulsión se empleará C65B4 TRG con una dotación de 1,10 kg/m<sup>2</sup> y árido 12/6 con dotación 10 l/m<sup>2</sup>.

## 10. CARACTERÍSTICAS DE LAS CAPAS DE FIRME

El estudio de las características de las diferentes capas de los firmes se realiza con acuerdo a la Instrucción de Carreteras y determina las proporciones en peso de cada componente de las capas de firme.

### Mezclas bituminosas.

Los betunes y mezclas adoptadas se han definido de acuerdo al PG-3 Enero 2015, teniendo en cuenta que el proyecto objeto de estudio se sitúa en una zona térmica estival media de acuerdo a la norma 6.1-IC "Secciones de firme".

A continuación se muestra un cuadro resumen de las características de las mezclas bituminosas:

Tipo de mezcla	AC 16 surf B50/70 D	AC 22 bin B50/70 S
Tipo de betún	B50/70	B50/70
% de betún sobre áridos	4,50	4,00
Densidad (t/m <sup>3</sup> )	2,44	2,42
% de polvo mineral de aportación	50 (T32) - (T41)	50 (T32) - (T41)
Relación polvo mineral/betún	1,20	1,10

### Riegos.

Las características de los riegos se indican en la tabla siguiente:

Riego	Tipo de ligante	Dotación de betún
Imprimación	C60BF4 IMP	1.300 gr/m <sup>2</sup>
Adherencia entre capas bituminosas	C60B3 ADH	400 gr/m <sup>2</sup>

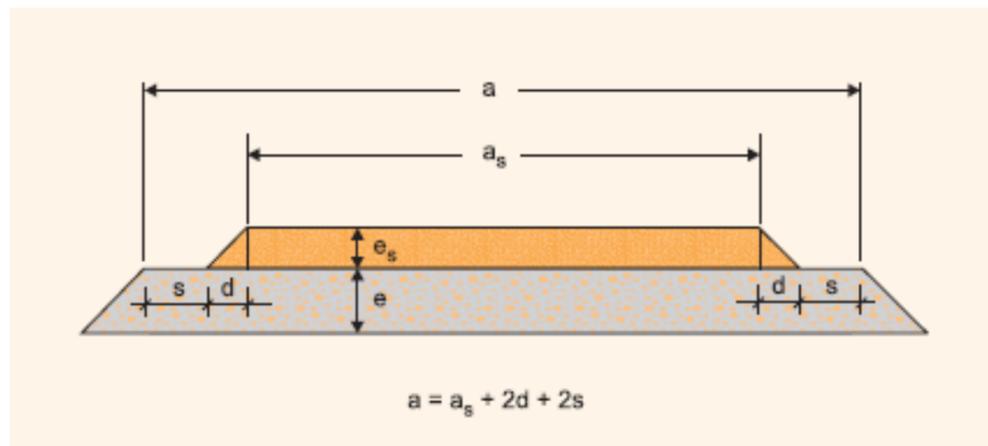
## 11. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LA SECCIÓN DE FIRME

Se definen a continuación los aspectos constructivos aplicados en las secciones de firmes del presente proyecto.

### Sobreanchos por derrames y criterios constructivos:

Cumpliendo con lo indicado en el punto 9. Aspectos constructivos de la **norma 6.1-IC “Secciones de firme”**:

- La anchura de la capa superior del pavimento de la calzada rebasa a la teórica al menos en 20 cm por cada borde.
- Cada capa del firme tiene una anchura (a) en su cara superior, igual a la de la capa inmediatamente superior ( $a_s$ ) más la suma de los sobreanchos (d) y (s) tal y como se indica en la tabla 7 de la **norma 6.1-IC “Secciones de firme”**.



Los valores de los sobreanchos utilizados en este caso son:

Por derrames (d): El valor corresponde al del espesor de la capa correspondiente, aplicado a todas las capas que componen la sección de firme.

Por criterios constructivos (s): El valor aplicado en las capas de las mezclas bituminosas es de 5 cm., mientras que en suelocemento el valor es 10 cm.

### Distribución de capas en arcenes:

Otro aspecto constructivo aplicado es la distribución de las capas del firme en los arcenes, para ello se ha aplicado lo indicado en el punto 7. Arcenes de la **norma 6.1-IC “Secciones de firme”**:

En el caso de los arcenes de longitud menor de 1,25 m, el firme es prolongación del firme de la calzada adyacente. Su ejecución será simultánea, sin junta longitudinal entre la calzada y el arcén.

## 12. ÁRIDOS ADOPTADOS PARA CAPA DE RODADURA

Para el suministro del árido que cumpla los requisitos necesarios para su empleo en capa de rodadura debe recurrirse a la Cantera de HORMISA, S.A. (HORMIGONES DEL PIRINEO, S.A.), situada a 1,5 km al norte de Aínsa, en la margen derecha de la carretera A-138, que une al poblado de Aínsa con Labuerda (Huesca), o bien a la gravera de HORMYAPA, S.A. (HORMIGONES Y ÁRIDOS PIRINEO ARAGONÉS, S.A.), situada a 1,5 km al norte de Sabiñánigo (Huesca), en la ctra. de Biescas, prácticamente en la confluencia entre las carreteras C-134 y C-136.

La gravera de HORMISA, S.A. tiene permiso para explotar el aluvial del río Cinca, dispone de planta de machaqueo, clasificación y lavado, y acopios de los áridos naturales y de las diferentes granulometrías fabricadas. Tiene unas reservas de bolos y gravas que pueden considerarse ilimitadas, las reservas se estiman claramente superiores a un millón de metros cúbicos. Los acopios de áridos naturales que la empresa tiene se estiman en unos 40.000 m<sup>3</sup>. La distancia al punto central del trazado son aproximadamente 23 km. Los áridos de la gravera se utilizan para la fabricación de áridos de hormigones, zahorra artificial y mezclas bituminosas, incluso los destinados para la capa de rodadura. Habrá que extremar las medidas de control de calidad para asegurar la ausencia total de materia orgánica en la zahorra artificial. Los áridos de la gravera se están utilizando para las obras de la nueva carretera Sabiñánigo-Fiscal, actualmente en ejecución, se utilizan para la fabricación de zahorra artificial y se prevé también su empleo para los aglomerados asfálticos.

La gravera de HORMYAPA, S.A. explota el aluvial del río Aurín en la zona situada aguas arriba de Sabiñánigo. Tiene unas reservas de bolos y gravas que pueden considerarse ilimitadas. La producción no ha sido facilitada. La gravera dispone de planta de

machaqueo, clasificación y lavado, y acopios de los áridos naturales y de las diferentes granulometrías fabricadas. También existe una planta de hormigones y otra de aglomerados asfálticos. La distancia al punto central del trazado son aproximadamente 31 km por la nueva carretera Sabiñánigo-Fiscal. Los áridos de la gravera se utilizan para la fabricación de áridos de hormigones, zahorra artificial y mezclas bituminosas, incluso los destinados para la capa de rodadura. Los ensayos realizados avalan estos usos. Los valores de Desgaste de los Ángeles y de CPA son excelentes y permiten su empleo en capa de rodadura. Los áridos de la gravera se están utilizando para las obras de la nueva carretera Sabiñánigo-Fiscal, actualmente en ejecución, se utilizan para la fabricación de zahorra artificial.

En función de los datos obtenidos por los ensayos de laboratorio, se trata de una explotación que podrá suministrar materiales para cualquiera de las unidades de obra necesarias, en concreto para áridos para capas de firme (incluido rodadura), áridos para hormigones, zehorras artificiales, núcleo de relleno, cimientto y/o coronación.

## **APÉNDICE 1.- EFFETS DE LA CHAUSSÉE SUR LES INCENDIES DANS LES TUNNELS ROUTIERS (PIARC)**



**Dossiers**

AIPCR PIARC Internet

**Effets de la chaussée sur les incendies dans les tunnels routiers**

par  
**Willy DE LATHAUWER**  
(Belgique)  
ancien secrétaire du Comité  
des Tunnels routiers AIPCR/CS,  
représentant-délégué  
de l'AITES auprès du  
CT AIPCR/CS,  
membre du Groupe de Travail 6  
"Ventilation et Désenfumage"

LES INCENDIES IMPORTANTS QUI ONT EU LIEU DANS DE LONGS TUNNELS ROUTIERS ALPINS ENTRE 1999 ET 2005 ONT PROVOQUÉ DES ÉMOSIONS INQUIÉTUDES DE LA PART DU PUBLIC ET DES PROFESSIONNELS DE L'INDUSTRIE EN CE QUI CONCERNE LA SÉCURITÉ INCENDIE DANS CES OUVRAGES. DE NOMBREUSES ENQUÊTES ADMINISTRATIVES ET JUDICIAIRES ONT ÉTÉ LANCÉES, DONT CERTAINES N'ONT PAS ENCORE ABOUTI. CES CATASTROPHES ONT ÉGALEMENT CONDUIT À LA PRÉPARATION DE NOMBREUX ARTICLES, ÉTUDES ET PROJETS DE RECHERCHE SUR LA SÉCURITÉ INCENDIE DANS LES TUNNELS ROUTIERS.

L'UNE DES QUESTIONS QUI S'EST POSÉE À LA SUITE DE CES ACCIDENTS EST CELLE DE L'IMPACT DU MATÉRIAU CONSTITUANT LA CHAUSSÉE SUR UN INCENDIE. CET ARTICLE (DONT LE CONTENU A ÉTÉ APPROUVÉ PAR LE COMITÉ TECHNIQUE C3.3 DE L' AIPCR EN OCTOBRE 2006) PRÉSENTE LES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE FAITE DE CE SUJET EN SE LIMITANT AUX CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX NORMAL (DENSE). ILL NE S'INTÉRESSE PAS AUX CHAUSSÉES EN ENROBÉ DRAINANT (OUVERT), PUISQUE L'AIPCR DÉCONSEILLE TOUJOURS L'UTILISATION DE CE TYPE DE MATÉRIAU DANS LES TUNNELS.

L'ÉTUDE VISAIT NOTAMMENT À VÉRIFIER SI LES RECOMMANDATIONS FORMULÉES EN 1999 DANS LE RAPPORT TECHNIQUE DE AIPCR « MAÎTRISE DE L'INCENDIE ET DES FUMÉES DANS LES TUNNELS ROUTIERS » (REF. 1) ÉTAIENT TOUJOURS VALABLES. CE RAPPORT AVAIT ÉTÉ PRÉPARÉ PAR LE GROUPE DE TRAVAIL 6 « INCENDIE ET DÉSENFUMAGE » DU COMITÉ TECHNIQUE CS POUR LE CONGRÈS MONDIAL DE LA ROUTE DE KUALA LUMPUR. CE RAPPORT AVAIT ÉTÉ PUBLIÉ AVANT LE PREMIER DES INCENDIES QUI SE SONT SUCCÉDÉS À PARTIR DE 1999.

**CONTEXTE**

Les incendies qui se sont produits dans les tunnels alpins ont été à l'origine de nouvelles études, dont celles menées par des groupes professionnels tels que l'AIPCR et l'AITES (Association internationale des Travaux en Souterrain). Ils ont aussi incité à la mise en route de réseaux thématiques et de projets de recherche européens tels que FIT, Safe-T, UPTUN, DARTS, Safe Tunnel, Virtual Fires, Sirtaki (ref. 2), L-Surf et Eurotap.

Une coopération a ainsi été mise en place entre l'AIPCR et l'AITES dans le domaine de la résistance au feu de la structure des tunnels. Cette activité a été conduite par le Comité technique C3.3 de l'AIPCR « Exploitation des tunnels routiers » par le biais de son groupe de travail 6 et par le groupe de travail 6 « Entretien et Réparation » de l'AITES. Cette coopération s'est traduite par la production de plusieurs publications :

- un document AITES « Recommandations pour la résistance structurelle au feu des tunnels routiers » (ref. 3 et 4),
- un numéro spécial de Routes-Roads (n° 324, octobre 2004), consacré intégralement à la sécurité incendie dans les tunnels (ref. 5),
- et un rapport technique de l'AIPCR qui reste à publier intitulé « Systèmes et équipements pour l'incendie et le désenfumage dans les tunnels routiers » (ref. 6).

Un aspect de la sécurité peu abordé dans ces documents était la contribution éventuelle du matériau constituant la chaussée à un incendie survenant en tunnel. Sur suggestion de l'AITES, soutenue par un certain nombre de pays souhaitant vérifier ou modifier les recommandations formulées antérieurement, le Comité technique C3.3 de l'AIPCR a constitué en décembre 2004 dans le groupe de travail n° 6 « Ventilation et Désenfumage », un sous-groupe en charge de ce sujet. Ce sous-groupe était animé par M. W. DE LATHAUWER (Belgique) et comprenait MM. R. ARDITI (Italie), A. BENDELIUS (États-Unis), P. CARLOTTI (France) et A. HAACK (Allemagne). Des observateurs étaient tenus informés au sein des industries du bitume et du béton, mais n'ont pris aucune part active à l'étude menée par le sous-groupe, ni à la préparation du présent article qui la conclut.

Il a été spécifié par le C3.3 que cette étude serait limitée aux effets de la chaussée sur un incendie en tunnel, et n'inclurait pas les dégâts causés par l'incendie à la chaussée. En effet, ceci ne relève pas de la sécurité mais est à prendre en considération d'un point de vue économique.

**ANTÉCÉDENTS**

Pour mémoire, le rapport « Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers » (ref. 1) au chapitre VII.3.4 « Incendie et effet sur la chaussée » indique que :

WWW.PIARC.ORG

**Features**

**EFFECTS OF PAVEMENT ON FIRES IN ROAD TUNNELS**

THE SIGNIFICANT FIRES THAT OCCURRED IN LONG ALPINE ROAD TUNNELS BETWEEN 1999 AND 2005 HAVE PROVOKED SERIOUS CONCERNS, ON THE PART OF THE PUBLIC AND THE INDUSTRY PROFESSIONALS, REGARDING FIRE SAFETY IN ROAD TUNNELS. NUMEROUS ADMINISTRATIVE AND JUDICIAL INQUIRIES WERE UNDERTAKEN, SOME OF WHICH ARE NOT YET RESOLVED. THESE CATASTROPHES ALSO LED TO THE DEVELOPMENT OF A SERIES OF ARTICLES, STUDIES, REPORTS AND RESEARCH PROJECTS ADDRESSING FIRE SAFETY IN ROAD TUNNELS.

ONE OF THE UNCERTAINTIES THAT DEVELOPED AFTER THE OCCURRENCE OF THESE ACCIDENTS IS THE IMPACT OF PAVEMENT MATERIAL ON A FIRE. THE CONTENTS OF THIS ARTICLE (APPROVED BY PIARC TECHNICAL COMMITTEE C3.3 IN OCTOBER 2006) PRESENTS THE RESULTS OF A STUDY LIMITED TO CONCRETE AND STANDARD (DENSE) ASPHALT PAVEMENTS. IT DOES NOT CONSIDER POROUS ASPHALT (OPEN) PAVEMENTS, AS PIARC CONTINUES TO RECOMMEND AGAINST THE USE SUCH MATERIAL IN ROAD TUNNELS.

THE STUDY AIMED AT VERIFYING IF THE RECOMMENDATIONS MADE IN 1999 IN PIARC TECHNICAL REPORT "FIRE AND SMOKE CONTROL IN ROAD TUNNELS" (REF. 1) WERE STILL VALID. THIS REPORT WAS PREPARED BY WORKING GROUP 6 "FIRE AND SMOKE CONTROL" OF TECHNICAL COMMITTEE CS FOR THE WORLD ROAD CONGRESS HELD IN KUALA LUMPUR. IT WAS PUBLISHED BEFORE THE FIRST SERIES OF FIRES THAT BEGAN IN 1999.

by  
**Willy DE LATHAUWER**  
(Belgium)  
former French-speaking  
Secretary of PIARC/CS  
"Road Tunnels Committee",  
Standing ITA representative  
to PIARC TC 3.3,  
and member of  
Working Group 6  
"Ventilation  
and Smoke Control"

**CONTEXT**

The fires that occurred in road tunnels generated new studies including those conducted by professional groups such as PIARC and ITA (International Tunnelling Association). They also fostered the establishment of European thematic networks and research projects such as FIT, Safe-T, UPTUN, DARTS, Safe Tunnel, Virtual Fires, Sirtaki (ref. 2), L-Surf and Eurotap.

PIARC and ITA jointly formed a working relationship in the area of tunnel structure resistance to fire. This effort was handled by PIARC's Technical Committee C3.3 on "Road Tunnel Operations" through its Working Group 6 and by ITA's Working Group 6 "Maintenance and Repair". This resulted in several publications:

- an ITA document "Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels" (ref. 3 and 4),

- a special issue of Routes-Roads (n° 324 dated October 2004) fully devoted to fire safety in tunnels (ref. 5),
- and a PIARC technical report entitled "Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels" (ref. 6) (yet to be published).

An aspect of road tunnel fire safety, which was not addressed in any great extent in these various documents, is the possible contribution of the pavement material to a fire occurring in a tunnel. In December 2004, PIARC Technical Committee 3.3 set up a task-group inside its working group 6 "Ventilation and smoke control" to address this issue. This was a suggestion of ITA which was supported by a number of countries wishing to verify or modify the previous formulated recommendations. The task group was led by W. DE LATHAUWER (Belgium) and consisted of R. ARDITI (Italy), A. BENDELIUS (United States), P. CARLOTTI (France) and

A. HAACK (Germany). Observers from the asphalt and concrete industries were kept informed, but took no active part in the study conducted by the task group, nor in the preparation of this concluding paper.

It was specified by TC 3.3 that the work effort would be limited to the effects of the pavement on tunnel fires, and would not include the damage caused by the fire on the pavement, which is not a safety issue but should be considered from an economic point of view.

**BACKGROUND**

As a reminder, the report "Fire and Smoke Control in Road Tunnels" (ref. 1) in Chapter VII.3.4 - Fire and the effects on / of the road surface - provides that:

"The pavement of the tunnel can consist of three materials:

Routes-Roads 2007 - N° 324

33

## Dossiers

AIPCR PLARC Internet

« Trois matériaux peuvent être utilisés pour la chaussée d'un tunnel :

- béton de ciment,
- enrobé bitumineux dense classique,
- enrobé drainant, qui est utilisé pour stocker l'eau de pluie sous la surface afin de réduire les éclaboussures et/ou de réduire le bruit.

Le béton de ciment est le seul qui ne soit pas combustible et qui ne présente aucune difficulté d'utilisation dans les tunnels.

L'enrobé bitumineux classique peut s'enflammer à de très fortes températures. Il produit également des fumées et des gaz chauds dangereux et la quantité d'enrobé en feu augmente la production de chaleur de l'incendie. Cependant, comparativement au feu d'origine, ces productions supplémentaires sont la plupart du temps ignorées; l'enrobé bitumineux classique peut donc être utilisé.

L'enrobé drainant n'est pas recommandé dans les tunnels car une fuite de carburant, que ce soit en conditions normales de circulation ou lors d'accidents ou d'incendies, sera stockée sous la surface. Ce stockage entraînera une plus large propagation de l'incendie, et il faudra plus de temps pour pomper le carburant... »

Certains pays sont depuis allés au-delà de ces recommandations (Autriche, Espagne, Slovaquie et Slovénie) et ont interdit les chaussées bitumineuses dans les nouveaux tunnels routiers de plus de 1000 m de longueur. En Autriche, Slovaquie et Slovénie, il a toutefois été déclaré que cette interdiction était basée sur des considérations d'exploitation, plutôt que sur des inquiétudes en ce qui concerne les incendies et les fumées.

## RÉSULTATS DES ÉTUDES

Malgré la difficulté du sujet, quelques études ont été effectuées après 1999 dans un certain nombre de pays; elles sont reprises dans la bibliographie sous les références 7 à 14 et constituent la base du présent article.

Il est à noter en revanche que ni la Directive 2004/54/CE de l'Union européenne concernant les exigences de sécurité minimales applicables aux tunnels routiers du réseau routier trans-européen (réf. 7), ni aucun des réseaux thématiques ou projets de recherche européens qui ont été cités ci-dessus sur le thème général de la sécurité dans les tunnels, ne traitent de ce point spécifique ni ne l'incluent. Seul le projet de recherche européen Samaris lui accorde une certaine attention dans son

rapport (réf. 8). De plus, peu a été révisé dans le domaine de la quantification de ces phénomènes dans les stades ultérieurs d'un incendie.

Les études effectuées aboutissent toutes à des conclusions similaires qui sont les suivantes :

- Les recommandations contenues dans le rapport technique AIPCR de 1999 « Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers » (réf. 1) sont encore valables;
- Les études précitées sont unanimes pour conclure en outre : qu'il n'y a pas de problème pour l'utilisation de chaussées en béton de ciment, que l'information provenant des récents accidents montre qu'il y n'a pas de risque significatif lié à l'utilisation de chaussées bitumineuses, qu'une chaussée bitumineuse n'affecte pas les phases d'évacuation et de sauvetage lors d'un incendie, compte tenu du caractère marginal de la contribution au feu et à sa propagation de l'enrobé bitumineux.

Chacune des études porte également un regard sur certains points particuliers. Les conclusions spécifiques correspondantes tirées des notes et rapports sont reproduites ci-dessous :

- "Comportement des chaussées bitumineuses et en béton dans les tunnels, en particulier en cas d'incendie", Allemagne (réf. 9).

Il n'y a aucune raison de suivre en Allemagne la décision autrichienne de ne plus utiliser de chaussée bitumineuse pour les nouveaux tunnels de plus de 1000 m de longueur.

- "Améliorer la sécurité incendie en tunnel : la solution chaussée en béton", Belgique (réf. 10).

Cette note technique se base en grande partie sur les résultats d'essais effectués par l'Université de Cergy-Fontaine (France), qui comportait une analyse comparative de deux échantillons identiques en béton et en enrobé bitumineux portés à haute température selon une progression identique. L'infiamation de l'échantillon en enrobé bitumineux a eu lieu vers 480° C. La note a été réalisée par l'industrie du béton et promeut fortement la solution « béton ».

- "Samaris (Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure: examen de la réaction au feu des matériaux de chaussée)", projet de recherche européen du 5<sup>e</sup> programme-cadre recherche et développement (réf. 8). Un questionnaire international (ayant conduit à trois réponses) et un examen des incendies ne montrent pas de risque additionnel dû au type de chaussée utilisé, même dans le cas d'un incendie catastrophique, comme démontré par le cas du tunnel du St. Gotthard.

WWW.PLARC.ORG

## Features

- cement concrete,
- common compact asphalt,
- very open asphalt which is used to store the rain below the road surface in order to reduce the splashing effect on the traffic, and/or to reduce noise.

Of these, cement concrete is the only one which is not combustible and does not raise any question as to its use in tunnels.

The normal asphalt can be ignited by a high temperature fire. Some additional dangerous smoke and hot gases will be produced as the amount of burning asphalt will increase the burning rate of the fire. However, in comparison with the initial fire, additional outputs are generally ignored, so that normal asphalt can be used in any case.

Porous asphalt is not advisable in tunnels, as a fuel spillage occurring during normal traffic, accident or fire situations, will be stored below the road surface. The fire area will be increased by the volume of fuel storage, which also takes more time to be removed... »

Several countries (Austria, Slovakia, Slovenia and Spain) went beyond these recommendations and banned asphalt pavement from new motorway tunnels longer than 1,000 m. However, in Austria, Slovakia and Slovenia the ban was said to be based on operational issues rather than on concerns regarding fire and smoke.

## STUDY RESULTS

Despite the difficulty of the subject, a few studies were carried out after 1999 in a number of countries; they are listed in the Reference section under references 7 to 14 and constitute the basis of this paper.

It is important to note that neither the Directive 2004/54/EC of the European Union on minimum requirements for tunnels in the Trans-European Road Network (ref. 7), nor any of the European thematic networks and research projects listed above in the general field of tunnel safety, deal with or even include this topic. Only the European research project, Samaris, gave it some consideration in its report (ref. 8). In addition, little has been accomplished regarding the quantification of this phenomena in the later stages of a fire.

All studies carried out came to the following similar conclusions:

- The recommendations contained in the PLARC technical report "Fire and Smoke Control in Road Tunnels" of 1999 (ref. 1) are still valid;

The referenced studies unanimously concluded, in addition, that there are no problems associated with the use of concrete pavements, the information gathered from the recent accidents shows that there is no significant risk in using asphalt pavements, an asphalt pavement would not affect the escape and rescue phases of a tunnel fire incident, because of its marginal contribution to the fire and its propagation.

Each of the studies also brings a viewpoint on some detailed aspects. The corresponding specific conclusions drawn in these notes and reports are reproduced below:

- "Performance of pavements in asphalt and in concrete in tunnels, particularly in case of fire", Germany (ref. 9). There is no reason for Germany to follow the Austrian decision not to use any asphalt pavement in new tunnels longer than 1,000 m.

- "Improving Fire Safety in Tunnels: The concrete pavement solution", Belgium (ref. 10).

This technical note is based largely on the results of studies carried out by the University of Cergy-Fontaine (France) including a comparative analysis of two identical samples of cement-concrete and asphalt-concrete brought to high temperature following an identical progression. Ignition of the asphalt sample occurred around 480° C. The note is produced by the concrete industry and strongly promotes the use of concrete roadway pavement in tunnels.

- "Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure: Review on Reaction to Fire of Pavement Materials", (Samaris), research project of the 5th research and development framework programme (ref. 8).

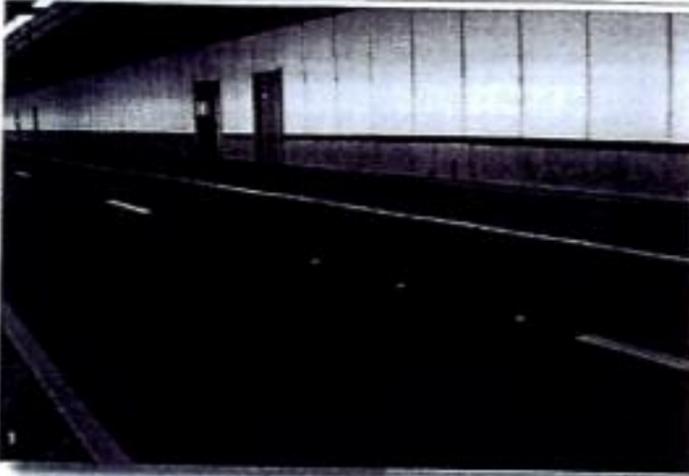
An international questionnaire (resulting in 3 responses) and an examination of incidents show no additional risk is created by the type of pavement installed, even in the case of a catastrophic fire, as demonstrated in the case of the St. Gotthard tunnel fire.

- "Fire behaviour of asphalt pavement in case of a road tunnel fire", France (ref. 11).

During the fire in the Mont Blanc tunnel, and according to the temperatures estimated from investigations, the asphalt roadway pavement seems not to have been at the origin of the propagation of the fire.

It is noted that the above mentioned tests at the University of Cergy-Fontaine (documented in reference 10) were carried out in unusual conditions (dimensions of the samples and of the oven, temperature increase curve), thus not allowing external comparison.

**Dossiers** AIPCR PIARC Internet



**Photo 1a**  
Chaussées bitumineuses dans le tunnel routier de Balupor à Bruxelles, Belgique

**Photo 2a**  
Asphalt Pavement in the Balupor Road Tunnel in Brussels, Belgium

**« Comportement au feu des chaussées bitume en cas d'incendie en tunnel routier », France (réf. 11).**  
Lors de l'incendie dans le tunnel du Mont Blanc, et en tenant compte des températures estimées à la suite des recherches, le revêtement ne semble pas avoir été à l'origine de la propagation du feu. Il est noté par ailleurs que les essais cités ci-dessus de l'Université de Cergy-Pontoise (réf. 10) ont été effectués dans des conditions non usuelles (dimensions des échantillons et du four, courbe de montée de la température) ne permettant pas de comparaison externe.

**« Comportement au feu des tunnels routiers », France (réf. 12).**  
La règle générale (circulaire française 2000-63) recommande l'utilisation de matériaux incombustibles pour le plafond, peu combustibles pour les parois, et ne prévoit pas de prescription pour les composants de la route; elle recommande également qu'une attention soit portée aux ouvrages annexes éventuels (ventilation, galeries techniques, etc.) sous le revêtement routier.

**« Commentaires à la tâche 5 - Effets de la chaussée sur l'incendie », Pays-Bas, (réf. 13).**  
Rappel d'un certain nombre de notions théoriques, concernant essentiellement l'influence de l'incendie sur la chaussée (bitumineuse) : confirmation de l'impact réduit de la chaussée sur le développement et la durée de l'incendie (des calculs montrent que pour une voiture comportant 400 kg de matériaux combustibles et la combustion d'une épaisseur de 10 mm de chaussée sur 2 x 5 m, la masse de bitume susceptible de brûler est de 10 kg, soit 2,5 % de la masse combustible de la voiture; pour un camion ces chiffres seraient respectivement de 40 000 kg, 25 mm, 10 x 50 m, 1 875 kg et 4,7 % de la masse combustible du camion).

**« Courte Introduction aux technologies des chaussées en tunnel », Chine, (réf. 14).**  
Présentation de la possibilité d'une application d'une pellicule époxy sur une chaussée en enrobé bitumineux ou en béton de ciment, présentant en particulier la caractéristique d'être incombustible.

**« Comportement au feu des enrobés bitumineux », France (réf. 15).**  
Les essais effectués par le CSTB permettent d'avancer les conclusions suivantes :

- Un enrobé bitumineux ne prend pas facilement feu, et un niveau de sollicitation thermique important est nécessaire pour conduire à l'auto-inflammation. Il est vraisemblable qu'un tel niveau de sollicitation ne peut être rencontré qu'au voisinage immédiat des véhicules déjà en feu. Ce niveau de sollicitation est incompatible avec la présence d'usagers ou de services de secours dans la zone de l'incendie.
- Les résultats des essais ont montré que, lors d'une inflammation de l'enrobé, seule la partie superficielle de la chaussée participera à l'incendie du fait de la formation

**www.piarcd.org** **Features**



**Photo 2**  
Concrete Pavement in the Coire Road Tunnel in Liège, Belgium

**Photo 2**  
Chaussées en béton de ciment dans le tunnel routier de Coire à Liège, Belgique

**« Fire performance of road tunnels », France (ref. 12).**  
The general rule (French circular 2000-63) recommends the use of non-combustible materials for the ceiling, of low combustible materials for lateral linings, and provides no prescription for road components; it also recommends that attention should be given to the possible existence of galleries (ventilation ducts, utilities galleries) underneath the pavement.

**« Comments to Task 5 - Effects of pavement on fire », the Netherlands (ref. 13).**  
This is a reminder of a number of theoretical notions, concerning mainly the influence of fire on (asphalt) pavement; confirmation of the low impact of this pavement on the development and the duration of the fire (calculation show that for a car with 400kg of combustible material, burning of 10 mm depth of the pavement over 2 x 5 m corresponds to a potential burning of asphalt mass of 10 kg, or 2.5% of the burning car material; for a truck these figures can respectively be 40,000 kg, 25 mm, 10 x 50 m, 1,875 kg and 4.7 % of the burning truck material).

**« Brief Introduction to Tunnel Pavements Technologies », China (ref. 14).**  
This is a presentation of the possibility of applying a layer of epoxy on a pavement in asphalt or in concrete, presenting among others the characteristic of non-combustion.

**« Fire performance of asphalt concrete », France (ref. 15).**  
The tests carried out by the CSTB (France) allow formulation of the following conclusions:

- A bituminous pavement does not easily catch fire, and a significant level of thermal exposure is needed to lead to self-ignition. It is likely that such a level of exposure can only occur in the immediate vicinity of vehicles that are already on fire. This level of exposure is not compatible with the presence of tunnel users or rescue service personnel in the fire zone.
- The results of the tests provide that; when there is ignition of the bituminous pavement, only the superficial part of the pavement will contribute to the fire, because there is the creation of an "inert cake" on the surface of the pavement, made of the remnants of the burnt bitumen.
- The measured mean pyrolysis flows are very low in comparison with those caused by the combustion of the vehicles already on fire in the tunnel. The quantity of gas produced and the calorific flow produced by the pyrolysis of the pavement seem not to be such that they could significantly worsen the situation for the users during their evacuation phase.
- The various tests carried out showed no propagation of the fire.

Revue Road 2007 - N° 134 EFFECTS OF PAVEMENT ON FIRE IN ROAD TUNNELS

**Dossiers** AIPCR PIARC Internet

d'une « croûte inerte » à la surface de la chaussée, formée par les résidus de la combustion du bitume.

- Les débits de pyrolyse moyens mesurés sont très faibles comparés à ceux créés par la combustion des véhicules déjà en feu dans le tunnel. La quantité de gaz produit et le débit calorifique produit par la pyrolyse de la chaussée semblent ne pas être de nature à pouvoir aggraver significativement la situation pour les usagers pendant leur phase d'évacuation.
- Les différents essais réalisés ont montré une absence de propagation du feu.

**CONCLUSIONS**

Il ressort clairement de l'ensemble des études et recherches précitées que l'enrobé bitumineux, en tant que matériau de chaussée, n'augmente pas significativement l'importance d'un incendie en tunnel (à la fois quant à la puissance thermique et à la charge combustible totale). Ceci est tout particulièrement vrai pendant la phase initiale où l'auto-évacuation doit avoir lieu.

La position de l'AIPCR dans son rapport de 1999 (réf. 1) reste entièrement valable : les enrobés bitumineux normaux (denses) n'ont pas d'effet adverse significatif sur la sécurité en cas d'incendie et peuvent être utilisés dans les tunnels routiers.

**BIBLIOGRAPHIE**

1. Association mondiale de la Route (AIPCR), « Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers », 1999 (en français et anglais).
2. Association mondiale de la Route (AIPCR), « La sécurité incendie dans les tunnels progresse rapidement grâce à la mise en commun des efforts », A. Haack, D. Lacroix, Routes/Roads, n° 124, octobre 2004 (en français et en anglais).
3. Association internationale des Travaux en Souterrain (AITES), « Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels », Mai 2004 (en anglais, résumé en français dans [4]).
4. Association mondiale de la Route (AIPCR), « Recommandations AITES pour la résistance structurelle au feu des tunnels routiers », H.A. Russell, Routes/Roads, n° 124, octobre 2004 (en français et en anglais).
5. Association mondiale de la Route (AIPCR), Routes/Roads, n° 124, octobre 2004 (en français et anglais).
6. Association mondiale de la Route (AIPCR), « Systèmes et équipements pour l'incendie et le désenfumage dans les tunnels routiers », 2006 (en français et anglais).
7. Union européenne, « Directive 2004/54/CE du Parlement européen et du Conseil concernant les exigences de sécurité minimales applicables aux tunnels du réseau routier trans-européen », Parlement européen et Conseil, 29 avril 2004 (en toutes les langues officielles de l'UE).
8. Recherche « Samaris (Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure: Review on Reaction to Fire of Pavement Materials) » projet du 5ème PCRD de l'Union Européenne, avril 2004 (en anglais).
9. Brochure « Verhalten von Asphalt- und Betonbelägen bei Tunnelbauwerken insbesondere in Brandfall » (= Comportement chaussées bitumineuses et en béton de ciment dans les tunnels, en particulier en cas d'incendie », BAST, Allemagne, octobre 2003 (en allemand).
10. Notice technique « Improving Fire Safety in Tunnels: The concrete pavement solution » préparée par Combureau à Bruxelles, Belgique, avril 2004 (en anglais).
11. Rapport d'étude bibliographique « Comportement au feu des chaussées bitumineuses en cas d'incendie en tunnel routier » pour l'USRIF (Union des Syndicats de l'industrie routière française), effectuée par le CSTB, France, septembre 2004 (en français).
12. Guide du CETU « Comportement au feu des tunnels routiers », France, mars 2005 (en français).
13. Note technique « Comments to Task 5 – Effects of pavement on fire » par J.W. Huijben, Pays-Bas, non datée, reçue en septembre 2005 (en anglais).
14. Note technique « Brief Introduction to Tunnel Pavements Technologies » de la Chine, non datée, reçue en octobre 2005 (en anglais).
15. Rapport provisoire du volet expérimental de l'étude « Comportement au feu des enrobés bitumineux » pour l'USRIF (Union des Syndicats de l'industrie routière française), effectuée par le CSTB, France, juin 2006 (en français).

**CONCLUSIONS**

It is clear from all the studies and research efforts documented above, that asphalt, as a pavement material, does not add significantly to the fire size (both heat release rate and total fire load) in the case of a road tunnel fire. This is primarily true in the initial phase when (self-) evacuation must take place.

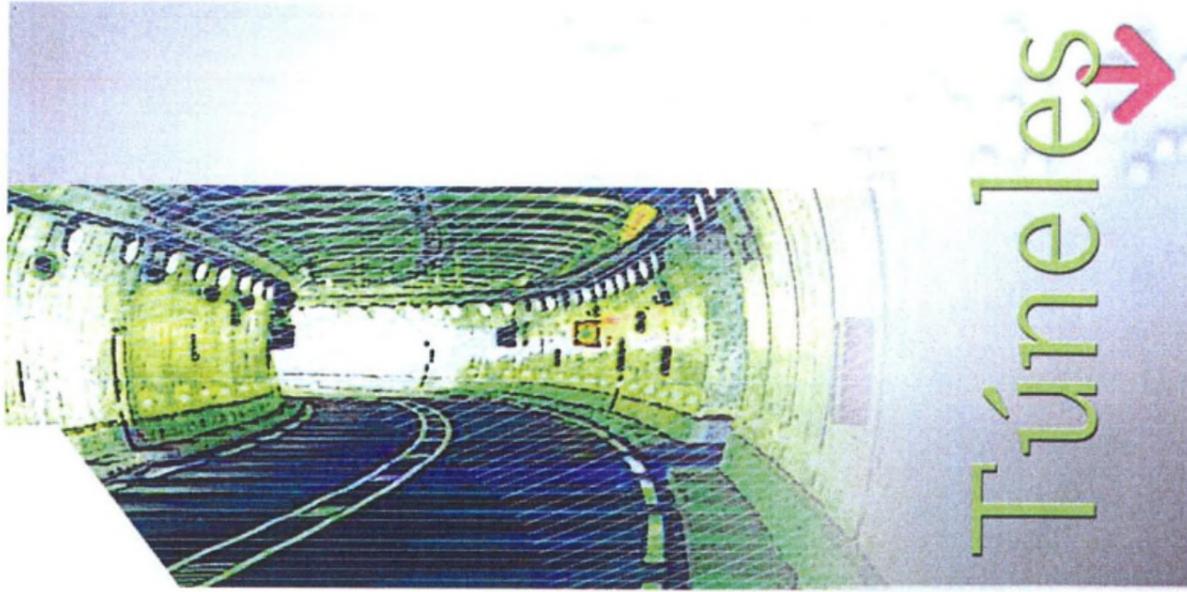
The position of PIARC in its report of 1999 (ref. 1) still remains fully valid: standard (dense) asphalt pavements do not have any significant adverse impact on safety during a fire and can be used in road tunnels.

**REFERENCES**

1. World Road Association (PIARC), "Fire and Smoke Control in Road Tunnels", 1999 (in English and French).
2. World Road Association (PIARC), "Tunnel Fire Safety is Quickly Progressing thanks to Cooperative Efforts", A. Haack, D. Lacroix, Routes/Roads, N°124, October 2004 (in English and French).
3. International Tunneling Association (ITA), "Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels", May 2004 (in English, summarized in French in Reference 4).
4. World Road Association (PIARC), "ITA Guidelines for Structural Fire Resistance in Tunnels", H.A. Russell, Routes/Roads, N°124, October 2004 (in English and French).
5. World Road Association (PIARC), Routes/Roads, N°124, October 2004 (in English and French).
6. World Road Association (PIARC), "Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels", 2006. (in English and French).
7. European Union, "Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network", European Parliament and of the Council, 2004. (in all official languages of the EU).
8. Research "Samaris (Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure: Review on Reaction to Fire of Pavement Materials)", 5th RDEF European Union, April 2004. (in English).
9. Brochure "Verhalten von Asphalt- und Betonbelägen bei Tunnelbauwerken insbesondere in Brandfall" ("Performance of pavements in asphalt and in concrete in tunnels, particularly in case of fire"), BAST, Germany, October 2003. (in German).
10. Technical note "Improving Fire Safety in Tunnels: The concrete pavement solution" prepared by Combureau in Brussels, Belgium, April 2004 (in English), based on a study report "Revêtements de chaussée en enrobé hydrocarboné ou en béton en situation d'incendie", Université de Cergy-Pontoise, France, 2003. (in French).
11. Report of bibliographical study "Comportement au feu des chaussées bitumineuses en cas d'incendie en tunnel routier" for USIRIF (Professional Union of the French Road Industry), carried out by CSTB (Centre scientifique et technique du Bâtiment), France, September 2004. (in French).
12. Guide of CETU "Comportement au feu des tunnels routiers", France, March 2005. (in French).
13. Technical note "Comments to Task 5 – Effects of pavement on fire", by J.W. Huijben, the Netherlands, not dated, received September 2005 (in English).
14. Technical note "Brief Introduction to Tunnel Pavements Technologies", from China, not dated, received October 2005 (in English).
15. Study report "Comportement au feu des enrobés bitumineux – volet expérimental – partie 1" for USIRIF, carried out by CSTB, France, June 2006. (in French).

## **APÉNDICE 2.- MANUAL SOBRE PAVIMENTOS EN TÚNELES**

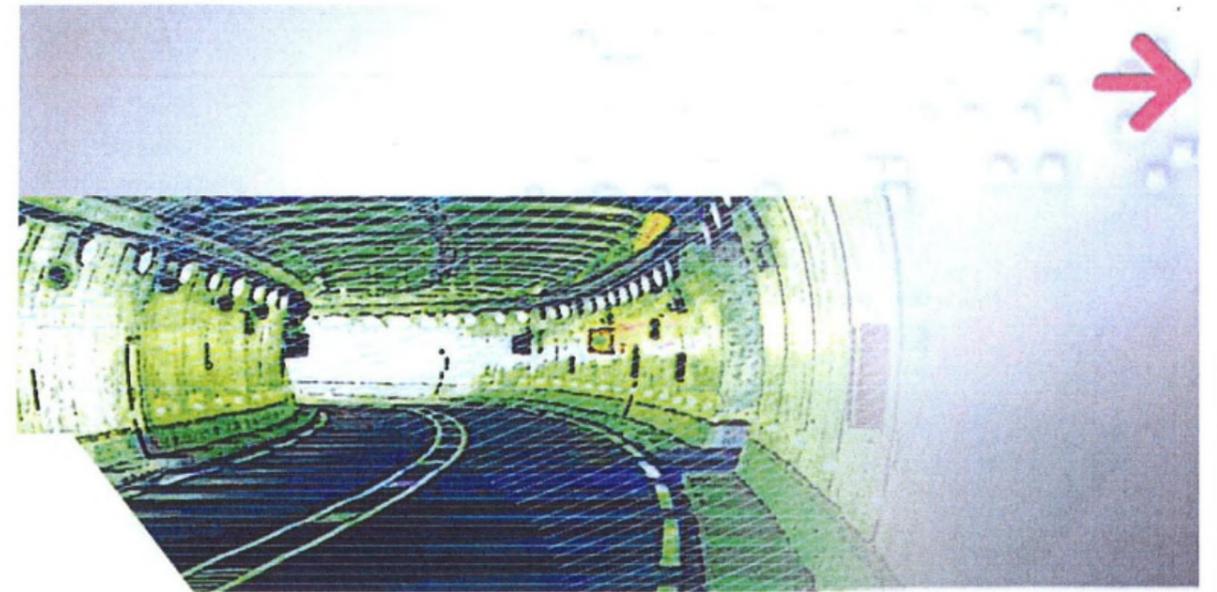




Sala 1

Actuaciones de Seguridad

IV Simposio de Túneles



Ponencia:

Manual sobre pavimentos en túneles

Por:

**Dña. María Dolores Cancela Rey**

Dirección General de Carreteras

Ministerio de Fomento

IV Simposio de Túneles

Principado de Andorra 26, 27 y 28 de octubre de 2005



# MANUAL SOBRE PAVIMENTOS EN TÚNELES

**Dña. María Dolores Cancela Rey**  
Dirección General de Carreteras  
Ministerio de Fomento

## 1. INTRODUCCION

Actualmente se está redactando un Manual de pavimentos en túneles del cual se comentarán las ideas más relevantes a lo largo de esta ponencia. La intensa actividad normalizadora de la Unión Europea en estas materias puede modificar algunos aspectos a lo largo de las fases finales del Manual.

El ámbito de aplicación del manual de pavimentos en túneles afecta a toda carretera cubierta, ya sea excavada en el terreno, en falso túnel o con cubiertas no permeables al aire, o que presente una superficie abierta al exterior inferior a 1 metro cuadrado por metro lineal y por carril.

Está previsto que el manual se presente en forma de catálogo de secciones de firme, recogiendo aquellas situaciones en las que no sea de aplicación la Norma 6.1-IC. Para túneles largos, de longitud superior a 500 m, se proyectarán las secciones de firme indicadas en el manual. Para túneles de longitud inferior a 500 metros alternativamente se podrá disponer el mismo firme que en las inmediaciones del túnel, con algunas restricciones que se comentarán más adelante.

## 2. ASPECTOS ESPECÍFICOS DE LOS FIRMES EN TÚNELES

Los carreteras que discurren a través de un túnel se encuentran en unas condiciones diferentes a los de las carreteras

en campo abierto, que condicionan la selección y dimensionamiento de los firmes. Los principales aspectos diferenciados que se deben tener en cuenta son los siguientes:

### 2.1 Necesidad de minimizar las actuaciones de conservación y rehabilitación

En carreteras en campo abierto cualquier obra que necesite de reducciones temporales de la sección transversal de la calzada resulta en unas condiciones de circulación más complicadas, y en un aumento de las posibilidades de que se produzcan accidentes. En los túneles las condiciones de circulación durante la ejecución de obras son más críticas debido a que la iluminación es más reducida, los humos y partículas reducen la visibilidad y la sección transversal disponible es menor. Pero además, un accidente en el interior de un túnel puede tener unas consecuencias mucho más graves que a cielo abierto y afectar a mayor número de personas.

Por otro lado, los túneles no tienen generalmente un trayecto alternativo, o si lo tienen, implica recorridos muy superiores al de atravesar el túnel.

En consecuencia, las obras de conservación o rehabilitación dentro de los túneles deben hacerse generalmente manteniendo la circulación, y tienen que prever-

se unas condiciones de circulación temporal que disminuyan al máximo posible los riesgos de accidentes, lo que aumenta el coste de estas obras, y eleva también su duración y las dificultades de realización.

Todo ello trae como consecuencia que en general se intente minimizar este tipo de operaciones, lo que significa que en los firmes para túneles se busquen diseños muy duraderos. Los firmes que se proyecten deben ser fácilmente reparables, en el sentido de que se puedan realizar las reparaciones en el mínimo tiempo posible.

### 2.2 Mayor durabilidad de los firmes por las condiciones climáticas

Al tratarse los túneles de obras enterradas, las condiciones climáticas son distintas a las de las carreteras que discurren al aire libre, lo que tiene varias implicaciones, como el menor envejecimiento de los materiales bituminosos superficiales por la ausencia de radiación solar, y el mejor comportamiento de los firmes semirrígidos o rígidos debido a las temperaturas menos extremas y la menor influencia de las variaciones térmicas. En el interior de los túneles, por ejemplo, la transmisión de grietas de retracción de los firmes semirrígidos disminuye enormemente, por lo que tienen menos limitaciones de empleo.

### 2.3 Soporte

El soporte de los firmes en túnel lo sue-

len constituir rocas de distinta calidad o en muchas ocasiones losas, armadas o no, o regularizaciones con hormigón. El buen apoyo de los firmes en túneles puede ofrecer ventajas para el dimensionamiento como se verá posteriormente.

#### 2.4 Seguridad en caso de incendio

Un aspecto muy debatido es el del papel del firme en la seguridad en caso de incendio. En los incendios se alcanzan temperaturas superiores a los 800 °C y cuando se alcanzan los 1300 °C se desintegran la mayoría de los elementos estructurales.

Los pavimentos de hormigón están constituidos por componentes minerales que son inertes, no se inflaman y por tanto no transmiten llamas ni emiten humos. En pavimentos continuos de hormigón armado las armaduras están a la mitad de la sección lo que supone un recubrimiento medio del orden de 12 cm que reduce significativamente el riesgo de estallido por temperatura.

Los pavimentos bituminosos producen llamas a 450 °C, aunque se trata de llamas superficiales y no se propagan. La incineración afecta únicamente a los últimos centímetros de la rodadura y teniendo en cuenta el porcentaje de betún de los materiales bituminosos (5% del total de la mezcla), y la relación entre este humo y el que producen vehículos y combustibles se

entiende que la contribución es muy pequeña.

En cualquier caso, en Europa no se ha tomado ninguna decisión al respecto, y en la Directiva 2004/C E/05 del Parlamento y del Consejo de la Unión Europea, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras no se incluyen requisitos sobre la resistencia al fuego de los materiales empleados en los firmes. Hay algún país (Austria) que ha optado por construir pavimentos de hormigón en todos sus túneles de longitud superior a 1000 m, pero el resto de los países admiten ambos tipos de superficies, y ese es el criterio que se ha seguido en las recomendaciones.

La única excepción es la restricción al empleo de las mezclas drenantes, que también debe extenderse a las mezclas discontinuas tipo M con gran contenido de huecos (por encima del 10%), por la capacidad de permitir que los combustibles o líquidos inflamables vertidos se desplacen por su interior, lo que facilitaría la propagación del fuego en caso de incendio. Las mezclas discontinuas tipo F, en cambio, ofrecen una superficie óptima por sus propiedades de reflexión difusa de la luz, baja sonoridad y excelente superficie de rodadura. En el documento se restringe el uso de estos materiales bituminosos en túneles de longitud superior a 500 m. Si este tipo de mezcla se utiliza en los accesos al túnel, el cambio de superficie de rodadura

se efectuará en el interior a más de 50 m de la embocadura, con el fin de evitar la creación de un punto singular en caso de lluvia a la entrada o salida del túnel.

### 3. FACTORES DE DIMENSIONAMIENTO

En el dimensionamiento de los firmes en túneles, las categorías de tráfico se definen de igual manera que en carreteras en campo abierto, siguiendo la Norma 6.1 IC.

En el caso de las explanadas el apoyo lo constituye la solera del túnel, y se pueden dar terminaciones en roca, suelo, solera de hormigón o losas armadas o pretensadas, para las que se definen las siguientes prescripciones, que a continuación se comentan.

La división se ha fijado a través del RMR (Rock Mass Rating) de Bieniaswki, establecida en 1979, que considera una serie de factores relativos a la calidad de la roca. Se ha fijado el valor  $RMR > 30$  para considerar apoyo en roca y para valores menores de 30 se aplican los criterios de explanada de la norma 6.1 IC.

-Túneles con apoyo en roca

En los túneles excavados en roca el apoyo tiene como principales características una mayor homogeneidad que en campo abierto, una gran capacidad de soporte, y una mayor irregularidad de ter-

minación debido al empleo de explosivos y a los procedimientos de destroza.

En los apoyos las operaciones previas a realizar son las siguientes:

- a) Tratamiento de zonas diferenciadas (zonas arcillosas o de rocas alteradas).
- b) Drenaje de los puntos bajos mediante ranurado, de manera que las aguas acumuladas viertan hacia el drenaje longitudinal lateral.
- c) Saneamiento del fondo, eliminando los elementos sueltos o que se desprendan con facilidad.
- d) Limpieza por barrido y aire comprimido.

Siempre que las condiciones de la obra lo permitan, y especialmente con tráfico T1 y superiores, el fondo de la excavación debe regularizarse con hormigón y a la regularización se le dará un sobreespesor sobre las crestas de la excavación de 15 cm con roca sana y 20 cm con roca blanda o alterable.

-Túneles con terminación en suelo

Aunque no es una situación usual en carretera, puede darse en algunos túneles urbanos. En estos casos, la formación de explanadas sigue los mismos criterios que se definen en la Norma 6.1-IC, y la cate-

goría mínima de explanada a utilizar es la E3.

#### 4. FIRMES

Los firmes a utilizar en túneles se pueden apoyar en explanadas E3 o roca. Para aquellos que se apoyen en explanadas tipo E3, se utilizará para el dimensionamiento la Norma 6.1 IC, con la única modificación de que el firme se proyectará para un Tráfico de Proyecto incrementado en una categoría, o subcategoría, en su caso, de manera que se reduzcan en lo posible los deterioros de tipo estructural y se prolongue la vida útil. En el caso de tráfico T00 el espesor de los firmes de tipo bituminoso apoyados sobre zahorras se aumentará en 4 cm, y en los semirrígidos en 2 cm. Los firmes de hormigón se aumentarán en 1 cm.

Para las explanadas en roca, en las que la solera es una losa de hormigón en masa, y con solera formada por una losa armada o pretensada, el dimensionamiento de los firmes se realizará según lo señalado en las Tablas 1 y 2.

Los firmes con rodadura bituminosa, definidos en la Tabla 1, así como los proyectados de acuerdo con la Norma 6.1 IC, se terminarán en una mezcla tipo F para tráfico T2 y superiores. Con tráfico inferiores se podrán utilizar alternativamente rodaduras tipo mezcla Semidensa. Se debe cuidar especialmente el contenido

de ligante para conseguir mezclas más cerradas y duraderas que en las carreteras en campo abierto, teniendo en cuenta además en los túneles, dada la escasa presencia de agua en superficie, es más importante la microtextura que la macrotextura.

Si la capa de rodadura en el túnel es distinta a la de los tramos de acceso, se prolongará esta última 50 m dentro del túnel. Esta medida es especialmente importante en el caso de mezclas drenantes.

MATERIALES	T00	T0	T1	T2	T3-T4
	roca	roca	roca	roca	roca
MEZCLA BITUMINOSA	25	20	18	15	12

Tabla 1 Secciones de firme con mezcla bituminosa (1)

(1) Esta solución cuando se apoya sobre una losa pretensada permite una reducción de espesor en 5 cm, y es similar a la firmes sobre obras de fábrica y exige la impermeabilización de la losa. En general estará compuesto por:

- 1.Preparación de la losa.
- 2.Riego de imprimación de la losa, en su caso.
- 3.Regularización de la losa, en su caso.

4.Capa de impermeabilización.

5.Tratamiento de protección de la impermeabilización, en su caso.

La capa de impermeabilización puede estar formada por láminas de sistemas poliméricos o polimérico-bituminoso fabricadas in situ, por másticos bituminosos fabricados en frío o en caliente o por láminas asfálticas prefabricadas, de comportamiento debidamente contrastado. Cada sistema de impermeabilización tiene su forma de aplicación por lo que algunas de las actuaciones 2, 3 y 5 anteriores pueden no ser necesarias.

En túneles largos pueden utilizarse firmes rígidos, apoyados directamente sobre la losa de hormigón del túnel, de acuerdo con la Tabla 2.

#### 5. LA SECCIÓN TRANSVERSAL

En Tráficos T0 y T00, arcén y acera (0,6 m de ancho mínimo), en el resto únicamente arcén.

La sección transversal de las carreteras en túnel viene limitada por el espacio disponible y por las condiciones de explotación y seguridad necesarias. Generalmente se construyen entre bordillos y aceras para permitir el paso del personal mantenimiento y la evacuación en caso de incendio. La existencia de bordillos establece limitaciones a las operaciones de refuerzo o renovación superficial.

#### 6. DRENAJE

Existen dos orígenes distintos del agua en el interior de un túnel:

MATERIALES	T00 <sup>(2)</sup>	T0 <sup>(2)</sup>	T1 <sup>(2)</sup>	T2 <sup>(2)</sup>	T3 - T4 <sup>(2)</sup>
	roca	roca	roca	roca	roca
HORMIGÓN VIBRADO <sup>(1)</sup>	27	26	25	23	21

<sup>(1)</sup> Según art. 550 del PG-3.  
<sup>(2)</sup> El pavimento será de hormigón en masa (HP-4,5), con juntas con pasadores, u hormigón armado, en cuyo caso se reducirán 2 cm los espesores señalados.  
<sup>(3)</sup> El pavimento será de hormigón en masa (HP-4,0), con juntas sin pasadores.

Tabla 2 Secciones de firme rígido

- El agua proveniente del terreno, y
- El agua de la superficie del pavimento.

Al no ser un tramo a cielo abierto, no existe agua proveniente de la lluvia, y por lo tanto la cantidad de agua superficial resulta muy limitada, incluso inexistente, salvo en la entrada del túnel, en la que puede producirse entrada del agua de lluvia arrastrada por los vehículos y en túneles urbanos.

En ocasiones se producen filtraciones provenientes del revestimiento del túnel, por problemas en la impermeabilización del mismo, por ejemplo. Estas filtraciones de agua terminan en la superficie del pavimento, en cantidades generalmente limitadas, pero de manera continua.

Por otra parte esta agua superficial presenta con frecuencia contaminaciones, debido al depósito de los gases de escape de los vehículos, a vertidos accidentales, aceites, grasas, etc.

Por estas razones, aunque la cantidad de agua superficial a eliminar no resulta muy elevada, y siempre es muy inferior al volumen del agua proveniente del terreno, no deben mezclarse ambos tipos. Es muy conveniente realizar dos sistemas de drenaje separados, uno para evacuar el agua superficial (incluyendo los posibles vertidos), con eliminación de esa agua contaminada, y el otro para la recogida y eva-

cuación de las filtraciones provenientes del terreno. En el segundo de los casos el agua puede verterse de nuevo al terreno; en el primero, es conveniente prever su almacenamiento o eliminación controlada.

Con respecto al agua del terreno, se realiza siempre un drenaje dentro del revestimiento a un lado, y un drenaje de tipo profundo por el otro, que recojan y eliminen ese volumen de agua del entorno, que en ocasiones puede llegar a ser muy importante. Estos sistemas de drenaje suelen funcionar adecuadamente al principio del servicio del túnel, pero hay que asegurarse que siguen funcionando adecuadamente a lo largo de toda su vida de servicio.

Para tráfico T1 y superiores sistemas separados de recogida del agua superficial y de las aguas del terreno. El drenaje superficial es un canal separado de recogida superficial en combinación con el bordillo de la acera, arquetas, colector longitudinal inferior, sifones apagafuegos en las arquetas. Balsas de decantación donde desemboquen en el exterior del túnel los colectores longitudinales de recogida del agua superficial, para tráfico T0 - T00, depuración de las aguas recogidas cada cierto tiempo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CANCELA, M<sup>a</sup> D. "Sellado de juntas y grietas", Madrid, España.
- [2] CRESPO, C., 2001, "Vías de Comunicación". Monterrey, México.
- [3] DEL VAL, M. A., "Criterios para el diseño de pavimentos en túneles". CONVEAS 2006.
- [4] DEL VAL, M.A., "Pavimentos de Puentes", Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- [5] DEL VAL, M.A., "Sellado de Grietas en Pavimentos Bituminosos", Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- [6] DEL VAL, M.A., "Capas antirreflexión de grietas", Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- [7] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA) & THE FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION (FTA), 2003, "Highway and Rail Transit Tunnel Inspection Manual", Estados Unidos de Norte América
- [8] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA) & THE FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION (FTA), 2003, "Highway and Rail Transit Tunnel Maintenance and Rehabilitation Manual",

Estados Unidos de Norte América.

- [9] FUNDACIÓN LABORATORIO NACIONAL DE VIALIDAD, "Planillas de inspección de mezclas asfálticas", Venezuela.
- [10] GALVIS C., J., 2003, "Guía para el diseño de pavimentos en túneles", Universidad Politécnica de Madrid, XVII Curso Internacional de Carreteras (Trabajo final de Especialización), Madrid, España.
- [11] GEOCONSULT, 1996, "Manual de túneles interurbanos de carretera", España.
- [12] GUTIÉRREZ, O. (1999), "Evaluación del estado de los firmes I", Ministerio de Fomento, Madrid, España.
- [13] INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES, 2002, "Manual de Pavimentos de Hormigón", Madrid, España.
- [14] JOFRÉ, C., 2003, "Los Túneles de Cointe (Bélgica): Equipos y firme de hormigón armado continuo para una seguridad óptima", II Simposio Nacional de Túneles, Pamplona, España.
- [15] JOFRÉ, C., "Ejecución de Pavimentos de Hormigón", Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, Madrid, España.

[16] JOFRÉ, C., "Proyecto de Pavimentos de Hormigón", Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, Madrid, España.

[17] MINISTERIO DE FOMENTO, "Nota Informativa sobre capa drenantes", Madrid, España.

[18] MINISTERIO DE FOMENTO, 2003, "Norma 6.1 I.C. de Secciones de Firmes", Madrid, España.

[19] MINISTERIO DE FOMENTO, "Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas de transporte (IOS-98)", Madrid, España.

[20] MINISTERIO DE FOMENTO, 2004, "Artículo 512 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3: Suelos estabilizados en situ", Madrid, España.

[21] MINISTERIO DE FOMENTO, 2003, "Norma 6.3 I.C. de Rehabilitación de Firmes", Madrid, España.

[22] ORGANIZACIÓN DE ESTADOS AMERICANOS, "Manual Interamericano de Mantenimiento Vial".

[23] RICO, A. y DEL CASTILLO, H., "La ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres", México.

[24] ROMANA RUIZ, M., "DMR (Dam Mass Rating). An Adaptation of RMR Geomechanics classification for use in dam foundation", España.

[25] ROMANA GARCÍA, M.G., "Túneles de Carretera. Planificación, trazado y túneles urbanos", España.

[26] ROMANA GARCÍA, M.G., "La clasificación de suelos y rocas en España", Madrid, España.

[27] UNION EUROPEA, "COST 324. Comportamiento de firmes a largo plazo", Bruselas

## **APÉNDICE 3.- ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO PAVIREX**



# 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 5660<sup>1</sup> 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@git.uniovi.es  
Universidad de Oviedo

M<sup>a</sup> 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<sup>2,3,4</sup>.

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<sup>5</sup>.

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<sup>1</sup> 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/m<sup>2</sup>) midiendo en un sólo ensayo parámetros tales como el *tig* (segundos) *time to Ignition*, tiempo al cual tiene lugar la ignición (segundos); **HRR Heat Release Rate**, velocidad de desprendimiento de calor (kW/m<sup>2</sup>); *pHRR* máximo calor liberado (kW/m<sup>2</sup>); *t<sub>peak</sub>* (segundos) tiempo al cual tiene lugar el desprendimiento máximo de calor, *pHRR*; **THR Total Heat Release**, Calor total liberado (MJ/m<sup>2</sup>) y **MARHE Maximum Average of Heat Emission**, velocidad máxima del calor medio emitido (kW/m<sup>2</sup>), 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

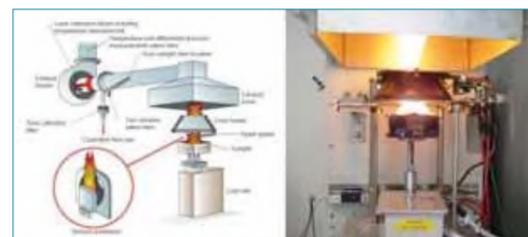


Figura 1: Representación esquemática del cono calorimétrico.

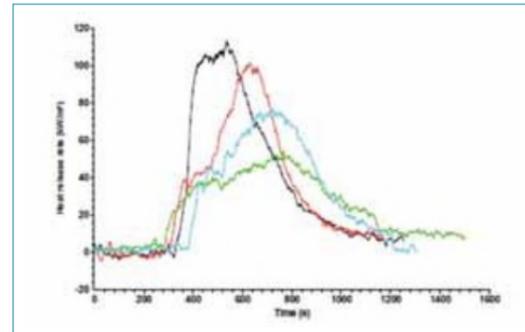


Figura 2: Evolución de la velocidad de desprendimiento de calor (HRR) frente al tiempo para el blanco (curva negra), y las aditivadas con retardante a la llama al 1,4% (curva azul), al 1,0% (curva verde) y al 0,7% (curva roja).

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 una masa constante a una temperatura de  $23 \pm 2$  °C y a una humedad relativa de  $50 \pm 5$  %, de acuerdo a la norma ISO 554<sup>6</sup>. 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/m<sup>2</sup>.
- 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/m<sup>2</sup>) es el me-



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<sup>2</sup>) 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 x 75 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<sup>2</sup> 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

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

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/m<sup>2</sup> y sin llama.

Formulación	t <sub>g</sub> (s)	t <sub>fo</sub> (s)	D <sub>s</sub> (4min)	D <sub>Smax</sub>	Tiempo D <sub>Smax</sub> (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/m<sup>2</sup>. 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, CITg, 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, Ci (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 (CO<sub>2</sub>, CO, HBr, HCl, HCN, HF, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>) e indicando peligrosidad cuando el valor de CITg es igual a 1:

$$CITg = 0,0805 \times \sum \frac{ci}{Ci}$$

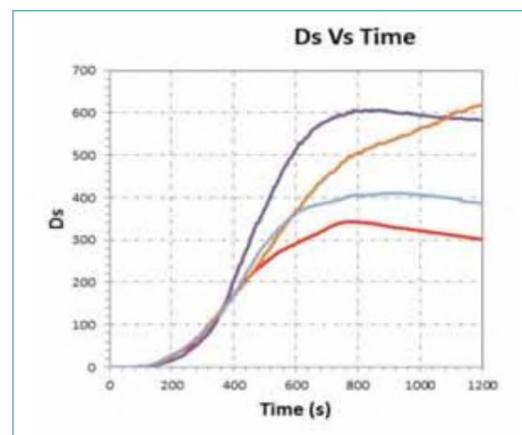


Figura 4: Evolución de la Densidad óptica específica, D<sub>s</sub>, frente al tiempo en el ensayo NBS para la mezcla bituminosa sin el aditivo ignífugo (curva morada), y las aditivadas con 0,7 % (curva roja), 1,0% (curva naranja) y 1,4% (curva azul).

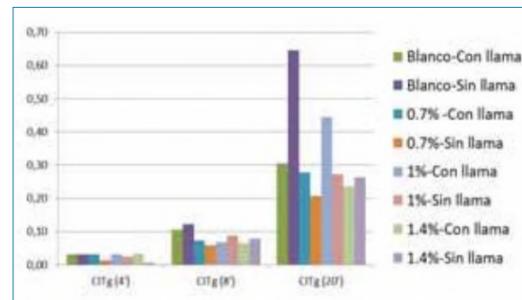


Figura 5: Valores de CITg obtenidos al combustionar en la cámara NBS+FTIR a un flujo de 50 kW/m<sup>2</sup> con y sin llama las mezclas bituminosas sin el aditivo ignífugo, y las aditivadas con 1,4, 1,0 y 0,7 % de retardante a la llama.

- En todos los casos se observa que el Índice Convencional de toxicidad (CITg) es inferior a la unidad (situación de peligrosidad).
- En nuestro caso, los gases que mayor contribución han tenido al valor de CITg han sido: CO<sub>2</sub>, CO y SO<sub>2</sub>.
- El valor de CITg 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 CITg 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 CITg 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, CITg, igual a uno (indicando peligrosidad), es la

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/m<sup>2</sup>.
- 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,

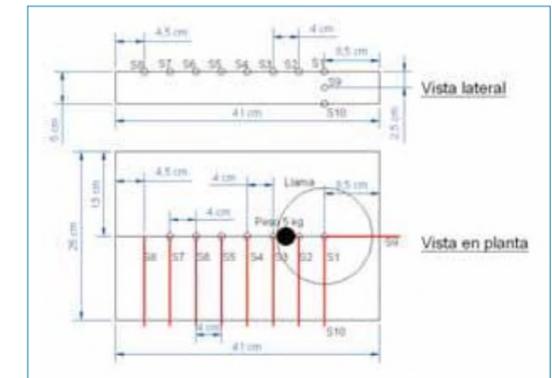


Figura 6: Distribución de los sensores de temperatura en superficie y en profundidad.

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 aditivo "blanco", durante el ensayo (izda.) después del ensayo (dcha.)

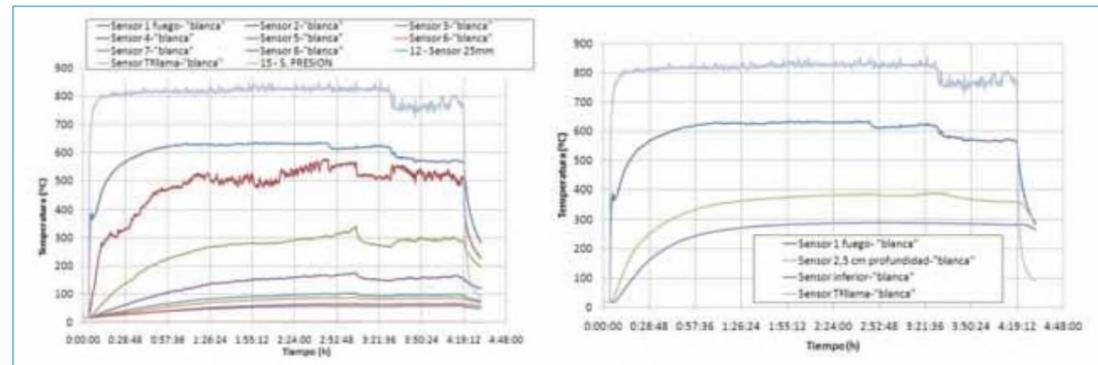


Figura 8: Evolución de la temperatura de los sensores colocados en la superficie (izq.) y en profundidad (dcha.) de la probeta "blanco".



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

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".

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

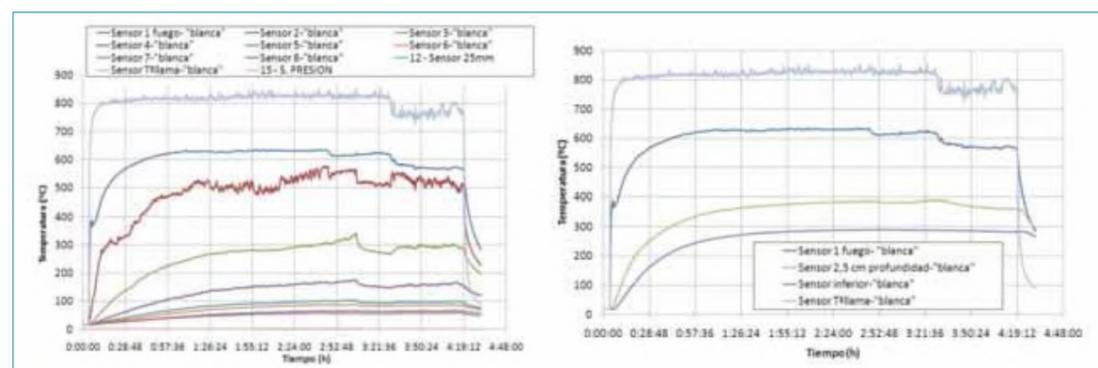


Figura 10: Temperatura vs tiempo del sensor bajo llama (izq.) y del sensor a 16 cm (nº 5) del foco de llama (dcha.) para las tres muestras de mezcla bituminosa: sin aditivar "blanco" (curva roja), 1,0% (curva azul) y 1,4% (curva verde) de aditivo.

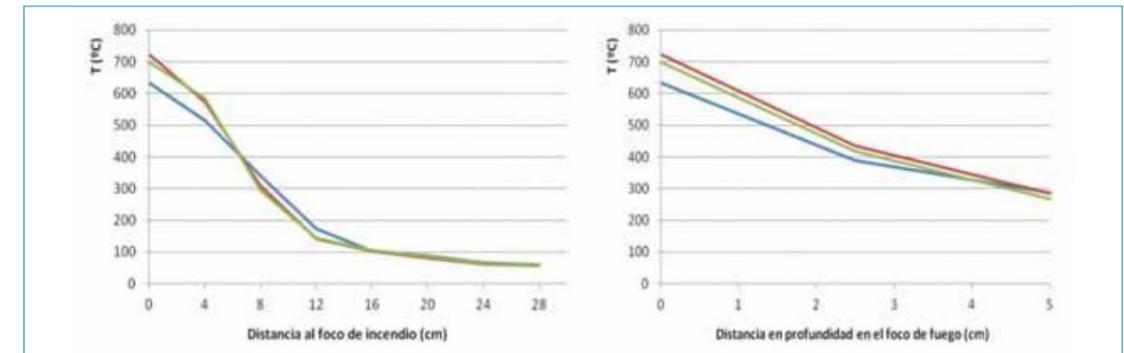


Figura 11: Temperaturas de equilibrio registradas en los distintos sensores de temperatura superficiales y en profundidad para las tres mezclas: blanco (curva azul), 1,0% de retardante (curva roja), 1,4% de retardante (curva verde).

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 esta 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

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



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 m<sup>2</sup>). 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/m<sup>2</sup>, 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/m<sup>2</sup>. Por último, se realizó un ensayo quemando un automóvil, donde la carga de fuego estimada fue de 0,5 a 0,8 MW/m<sup>2</sup>.

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-

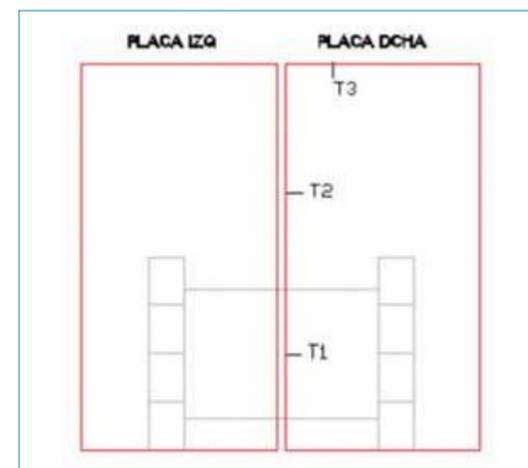


Figura 13: Disposición de los termopares.



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 aditivar, 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/m<sup>2</sup>. 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 más alejado de la carga de fuego llega a alcanzar temperaturas de 300 °C debido a las llamas que se orientan en el sentido de

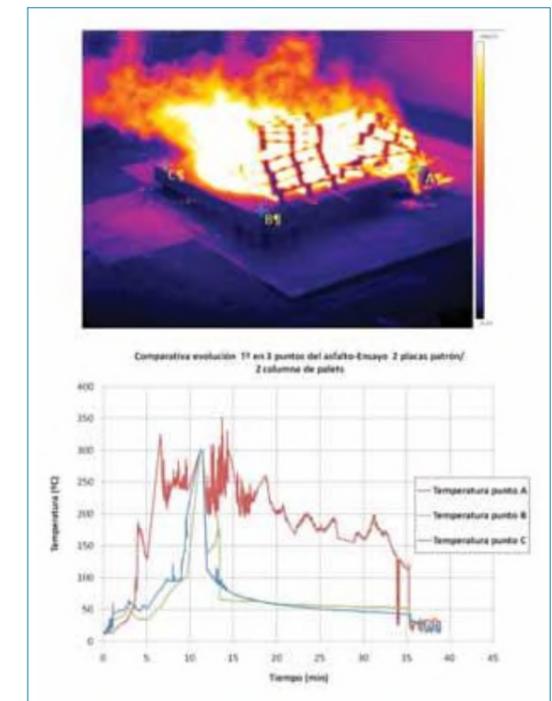


Figura 16a: Evolución de la temperatura superficial con la cámara termográfica del blanco. La foto termográfica se corresponde con el momento de mayor temperatura registrado en el punto A.



Figura 16b: Evolución de la temperatura superficial y en profundidad de la 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 aditivo 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

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/m<sup>2</sup>). 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 19: Estado superficial de la mezcla bituminosa: antes del ensayo (izq.), después del ensayo de fuego, blanco (medio) y mezcla aditivada (dcha.)

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-

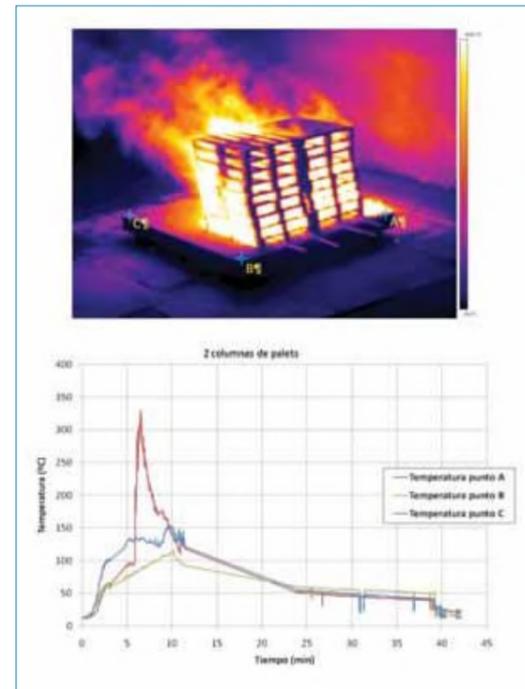


Figura 18a: Evolución de la temperatura superficial con la cámara termográfica de la mezcla con el 1,4% de aditivo. La foto termográfica se corresponde con el momento de mayor temperatura registrado en el punto A.

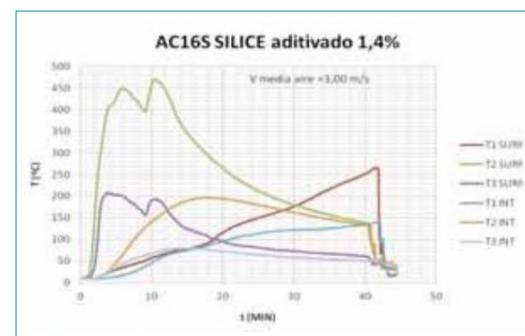


Figura 18b: Evolución de la temperatura superficial y en profundidad de la mezcla aditivada con el 1,4% con los sensores de temperaturas ubicados en las placas de mezcla bituminosa según el esquema de la Figura 13.

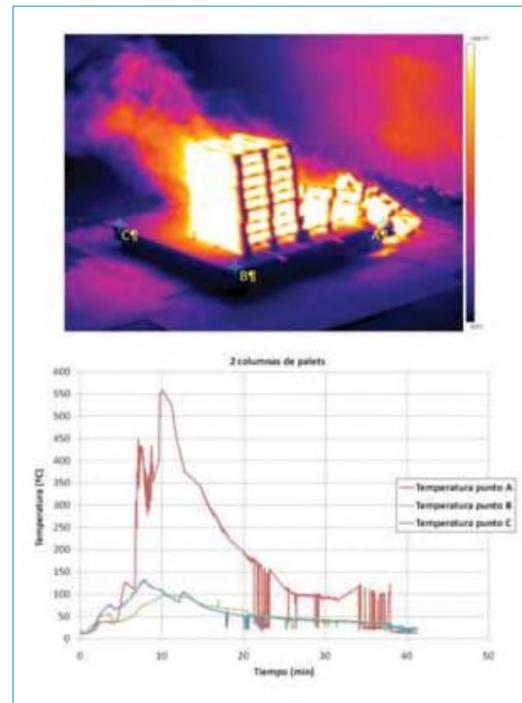


Figura 17a: Evolución de la temperatura superficial con la cámara termográfica de la mezcla con el 1,0% de aditivo. La foto termográfica se corresponde con el momento de mayor temperatura registrado en el punto A.

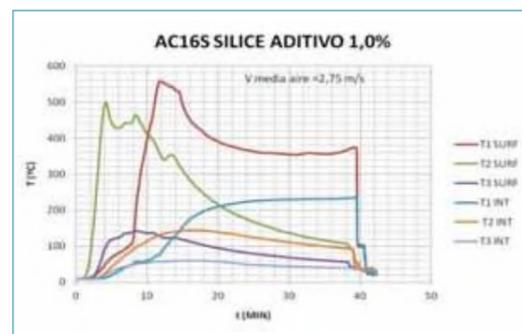


Figura 17b: Evolución de la temperatura superficial y en profundidad de la mezcla aditivada con el 1,0% con los sensores de temperaturas ubicados en las placas de mezcla bituminosa, según el esquema de la Figura 13.

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-

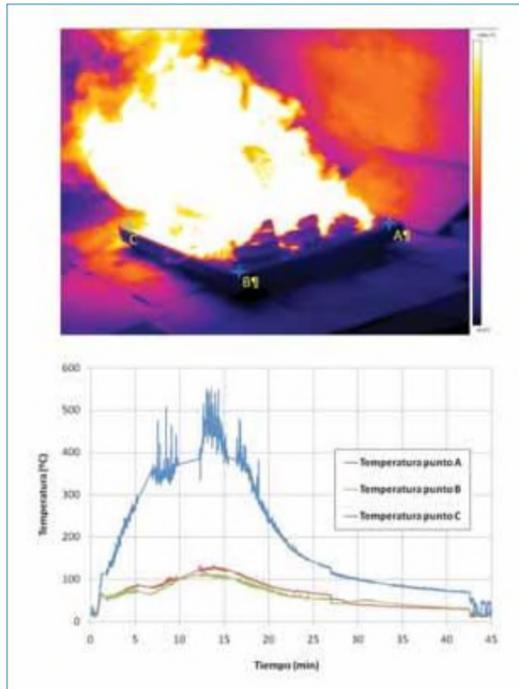


Figura 20a: Evolución de la temperatura superficial con cámara termográfica de la mezcla bituminosa AC16S aditivada con el 1,0% (placa más cercana a la pared) y hormigón (placa más alejada de la pared).

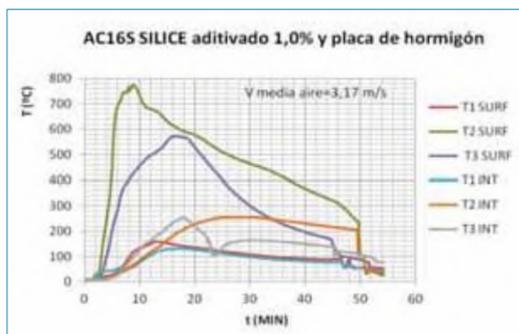


Figura 20b: Evolución de la temperatura superficial y en profundidad de la mezcla aditivada con el 1,0% y la placa de hormigón con los sensores de temperaturas ubicados en la placa de mezcla bituminosa según el esquema de la Figura 13.

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.)

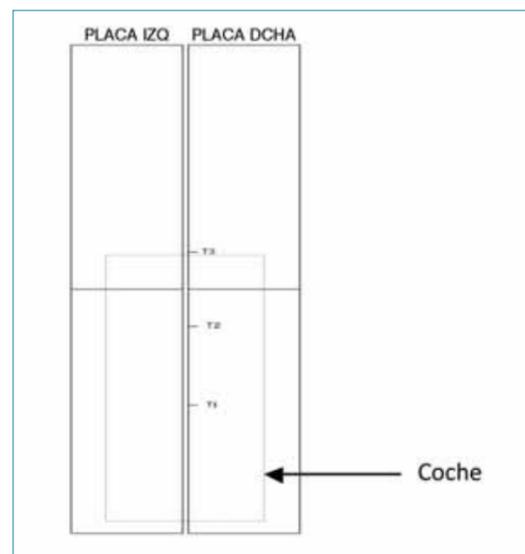


Figura 22: Esquema de la colocación de las placas de mezcla bituminosa, el coche y los sensores de temperatura.

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/m<sup>2</sup>.

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

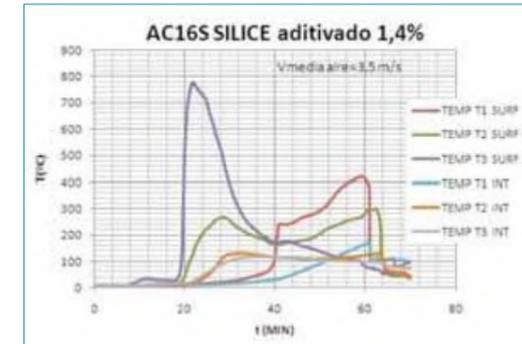


Figura 23: Sensores de temperatura en las placas de mezcla bituminosa o según la disposición de la Figura 22 en el ensayo con incendio de un coche.

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

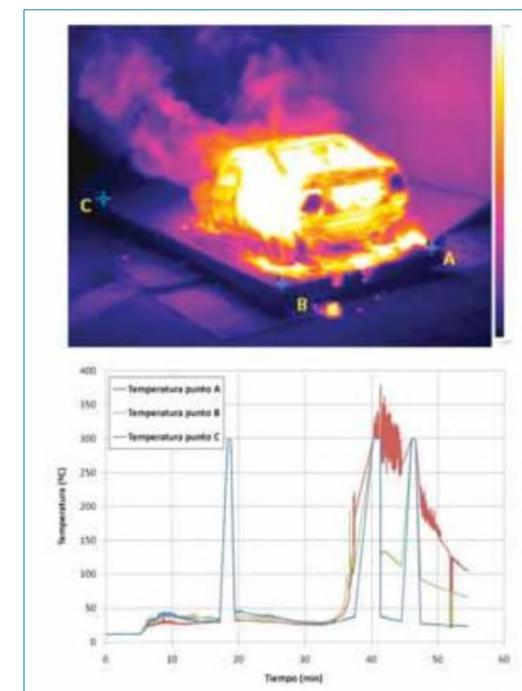


Figura 24:- Evolución de la temperatura superficial de la mezcla bituminosa AC16S aditivada con el 1,4% en el ensayo con incendio de un coche.

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  $D_s$  4min) 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/m<sup>2</sup>, 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.

## APÉNDICE 4.- CIENCIA Y TÉCNICA DE LA INGENIERÍA CIVIL



## Una propuesta para el proyecto de firmes y pavimentos en túneles

A proposal for the design of pavements in road tunnels

**Miguel Ángel del Val Melús.** Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. *Catedrático de Universidad. Departamento de Ingeniería Civil-Transportes. UPM. miguel.delval@upm.es*  
**Manuel G. Romana García.** Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. *Profesor Titular de Universidad. Departamento de Caminos, Canales y Puertos*  
**Ricardo Galvis.** Ingeniero Civil. *Departamento de Ingeniería Civil-Transportes. UPM. mromano@caminos.upm.es*  
 Venezuela. *ingricgalv@yahoo.es*

**Resumen:** Ante la ausencia de recomendaciones y normas, se presenta una visión personal del tema, así como una propuesta de criterios técnicos y reglas prácticas para el diseño y la ejecución de firmes en túneles, a fin de facilitar la labor del ingeniero proyectista que se enfrenta a estas tareas. Se empieza por proporcionar la información general que, de manera imprescindible, se ha de tener en cuenta en la toma de decisiones durante el proceso de diseño. Se exponen a continuación los criterios que se han de seguir para evaluar el tráfico esperado y las condiciones del cimiento del firme. A partir de ahí se propone un catálogo de secciones, adaptadas a las diversas situaciones posibles de los firmes, tanto con pavimento asfáltico como de hormigón. El artículo culmina con unas recomendaciones adicionales sobre los procesos constructivos.

**Palabras Clave:** Túnel, Firme, Pavimento, Explanada

**Abstract:** Given the absence of specifications and recommendations on the subject of pavement sections in tunnels, this article presents the personal view of the authors, along with a proposal of criteria and materials for the design and construction of these pavements. It begins with a set of general review of tunnel conditions, since they must be borne in mind in order to make the necessary decisions during the design period. Then the criteria to evaluate the loads (traffic category) and pavement foundation are given. Two catalogues are given, the first of different solutions to build the pavement foundations and the second to decide on materials and layer thicknesses for pavement sections, with alternative solutions based on bituminous materials and concrete. Finally, the article contains additional guidance on the factors that need to be pondered before deciding on pavement type, and some recommendations on the construction processes for each material type.

**Keywords:** Tunnel, Pavement, Subgrade

### 1. Introducción

El firme es un elemento de los túneles de carreteras que influye en la seguridad y en la comodidad de los usuarios. Por otro lado, hay que atender también a su durabilidad, para que las necesidades de conservación sean mínimas y así reducir la incidencia de esas tareas en la explotación del túnel.

Análogamente a lo que ocurre en las estructuras, el coste relativo del firme es muy bajo en los túneles:

menos del 5 % de la obra. Pero al contrario que en aquéllas, en éstas es relativamente habitual disponer la sección estructural completa. Además debe destacarse que, incluso si el material en el que se excava el túnel, que constituiría el cimiento del firme, es de buena calidad, es especialmente difícil terminar la excavación con la regularidad precisa para que pueda servir de apoyo a las capas del firme.

Ante la ausencia de recomendaciones y normas para el diseño de los firmes en túneles, se pretende

Miguel Ángel del Val Melús, Manuel G. Romana García, Ricardo Galvis

ofrecer en este artículo una visión personal y una propuesta de criterios técnicos y reglas prácticas para su proyecto y su ejecución. Se incluye también alguna información general sobre materiales y métodos constructivos, a fin de proporcionar una ayuda para la toma de decisiones durante el diseño. En última instancia, se pone a disposición de los proyectistas una gama de posibles soluciones, entre las que han de elegir la más adecuada en base a consideraciones técnicas, de seguridad y económicas sobre el caso a resolver. Se pretende asimismo unificar criterios sobre las secciones estructurales de los firmes en los túneles.

### 2. Clasificación de túneles

Atendiendo únicamente a la infraestructura, los túneles pueden ser clasificados, entre otros criterios, por su sección transversal, por su sostenimiento, por la naturaleza del cimiento de su firme, por el método constructivo empleado y por el acabado del túnel.

Existen cuatro tipos principales de secciones transversales en túneles:

- Circulares
- Rectangulares
- De herradura
- Ovaladas

La forma de la sección tiene relación con las condiciones del terreno y con el método constructivo empleada. A este respecto no debe olvidarse que algunos túneles viarios aparecen ser rectangulares en su interior, debido al pavimento y a la losa de techo, y sin embargo la sección de la excavación, que es la que define realmente el tipo, es diferente. Por otro lado, en algunos túneles se combinan distintos procedimientos constructivos, debido a los cambios de las condiciones del terreno.

Según su sostenimiento, los túneles pueden ser clasificados como:

- Con sostenimientos flexibles: con bulones y hormigón proyectado y cerchas.
- Con cerchas y hormigón bombeado.
- Revestidos por segmentos.
- Con anillos de hormigón in situ.

Tabla 1. Relación entre la forma de túnel y el método constructivo

Método constructivo	Forma de la sección		
	Circular	Herradura	Rectangular
Trenchera		X	X
Escudo	X		
Excavación con tuneladora	X		
Voladura	X	X	
Tubos sumergidos			X
Excavación secuencial		X	
Escarificación/Pala	X	X	
Rozadoras	X	X	
Pantalla			X
Forrado	X	X	

En los túneles, el apoyo del firme suele ser bueno, bien porque el terreno natural sea de alta calidad, como ocurre si la excavación se realiza en roca, o bien porque se dispone una contrabóveda para cerrar la sección con hormigón donde el terreno es de menor calidad.

Como se ha indicado, el procedimiento de excavación utilizado determina en buena medida la forma de la sección transversal. En la tabla 1 se presentan los diferentes métodos constructivos y su relación con la forma de la sección.

En un túnel el firme puede ser, en principio, de cualquier tipo: flexible, semiflexible, semirígido o rígido. En consecuencia, su superficie podría estar formada, como se analiza con detalle más adelante, tanto por una mezcla asfáltica como por un pavimento de hormigón. Desde un punto de vista funcional, el acabado del pavimento debería en todo caso proporcionar una diferenciación cromática entre la catzada y los hastiales y la bóveda, para que se produzca un efecto de guía positivo para mejorar la comprensión del túnel por parte de los conductores; la diferenciación cromática influye también en la reducción de la clausrofobia relativa, y ambos factores permiten disminuir la monotonía de la conducción dentro del túnel.

En su *Directiva sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras*, de abril de 2004, la Unión Europea ha establecido una clasificación de túneles basada en tres aspectos (tabla 2): circulación en un único sentido o en ambos, intensidad del tráfico y longitud. Según esta clasificación, la longitud mínima considerada

Tabla 2. Clasificación de los túneles según la Directiva 2004/64/CE

Categorización	Intensidad de circulación	Longitud (m)
Doble sentido	> 2000 veh/día y carril	> 1500 <sup>1</sup>
Cualquiera	< 2000 veh/día y carril	500 a 1000 > 1000
Cualquiera	> 2000 veh/día y carril	500 a 1000 1000 a 3000 > 3000

Nota 1: Estos túneles deben tener aparatos de una distancia inferior a 1000 m.  
Nota 2: La Directiva establece, además, la obligatoriedad de disponer tubos de sentido único cuando las previsiones a 15 años muestran que el volumen de tráfico llegará a superar los 10.000 vehículos por día y carril y se alcanza este valor.

Tabla 3. Clasificación de los túneles según el Real Decreto 635/2006

Categorización	Intensidad de circulación	Longitud (m)
-----	Cualquiera	> 1000 <sup>1</sup>
Doble sentido	> 1000 veh/día y carril	> 1000 <sup>2</sup>
Doble sentido	> 2000 veh/día y carril	> 1500 <sup>2</sup>
Sentido único	Cualquiera	> 1000
	≤ 2000 veh/día y carril	500 a 1000
	> 2000 veh/día y carril	500 a 1000
	Cualquiera	Urbano ≤ 200
Doble sentido	≤ 2000 veh/día y carril	Urbano 200 a 500
	> 2000 veh/día y carril	Urbano 200 a 500
	≤ 1000 veh/día y carril	> 1000
	> 1000 veh/día y carril	> 1000
Doble sentido	≤ 1000 veh/día y carril	500 a 1000
	> 1000 veh/día y carril	500 a 1000
	Cualquiera	Urbano ≤ 200
	≤ 1000 veh/día y carril	Urbano 200 a 500
Doble sentido	> 1000 veh/día y carril	Urbano 200 a 500
	> 1000 veh/día y carril	Urbano 200 a 500

Nota 1: Estos túneles deben tener pavimento de hormigón (artículo 2.3.1).  
Nota 2: Estos túneles deben tener medidas específicas de ventilación, pero sólo si tienen canteo de control y ventilación semiautónoma o automática (artículo 2.11.3).  
Nota 3: Estos túneles deben tener aparatos de una distancia inferior a 1000 m.

para la aplicación de los requisitos establecidos en la Directiva es de 500 m. Este valor es razonable para redes viarias en campo abierto, en las que es raro que existan estructuras de soterramiento entre 60 y 500 m; en entornos urbanos, por el contrario, sería conveniente tratar como un túnel a efectos de los requerimientos específicos de seguridad, a cualquier tramo soterrado de más de 200 m.

La preferencia primordial de la clasificación de la tabla 2 es ordenar las inversiones que son necesarias en materia de seguridad de la infraestructura, y su definición es producto de un análisis de las longitudes de túneles viarios en distintos países desarrollados, y de las conclusiones de diversos grupos de expertos tras los últimos incendios en túneles de las Alpas (de los que los más relevantes fueron los de Mont Blanc en 1999, Tauern en 2000 y San Gotardo en 2003). Esos incendios han supuesto una auténtica revolución en los criterios de seguridad que se aplican en los túneles, comenzando por una revisión completa de la infraestructura y su funcionamiento, y provocando unos cambios en la filosofía del diseño y, especialmente, en las necesidades de equipamientos para detección de incendios y de información y evacuación de usuarios en caso de incidente.

Los firmes no han sido omitidos en esta revisión de necesidades y funcionamiento en caso de incendio, habiendo sido analizado su cargo de fuego (aunque no es una característica de diseño fundamental, como se verá más adelante) y su funcionalidad en una situación de emergencia. En consecuencia, la clase a la que pertenezca el túnel es un factor que debería ser considerado a la hora de establecer el tipo de firme que ha de construirse en él.

En España se publicó en mayo de 2006 el Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado (Boletín Oficial del Estado nº 126 de 27 de mayo de 2006, y corrección de errores en el nº 181 de 31 de julio de 2006), que es una trasposición parcial de la Directiva de la Unión Europea; su ámbito de aplicación se circunscribe a los túneles de la Red de Interés general del Estado, con lo que quedan excluidos, al menos en principio, los túneles de la Red Trans-europea situados dentro del territorio español, pero no dependientes del Ministerio de Fomento. En este Real Decreto se establecen las clases de túneles que se recogen en la tabla 3.

### 3. Bases del diseño

El diseño de secciones de firme para túneles que se presenta en este artículo se ha basado en el procedimiento propuesto en la Norma 6.1 IC de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento; se consideran como parámetros básicos la categoría del tráfico pesado y las condiciones de la explanada; entre las posibles soluciones para cada combinación de los parámetros básicos se ha de seleccionar en cada caso concreto la más adecuada técnica y económicamente.

En relación con la explanada es preciso hacer de entrada algunas matizaciones. Como se ha señalado, la calidad del cimiento del firme en los túneles suele ser relativamente alta. Dado que en las excavaciones en roca, la naturaleza y el estado de ésta tienen una cierta influencia, se hace a continuación una referencia a las clasificaciones geomecánicas de las rocas, que se basan en la diferencia existente entre las propiedades de la roca madre y las del macizo, que puede presentar diferentes grados de fracturación y de meteorización. Entre las clasificaciones más empleadas hay que destacar el RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski. Esta clasificación fue establecida en 1979, y se basa en un indicador semiojetivo que varía entre 0 y 100, que es la suma de valores correspondientes a cinco parámetros (tabla 4).

Tabla 4. Parámetros y valoración en la clasificación RMR

Parámetro	Valoración
Resistencia a compresión simple	0 - 15
RQD (Rock Quality Designation)	0 - 20
Espacado de las juntas	0 - 30
Presencia de agua	0 - 15

Tras la valoración global, debe realizarse una corrección dependiendo de la dirección del buzamiento y del buzamiento de las juntas en relación con la dirección de la excavación del túnel. Finalmente, el macizo se encuadra en una clase de los cinco indicadores en la tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de Bieniawski de un macizo rocoso

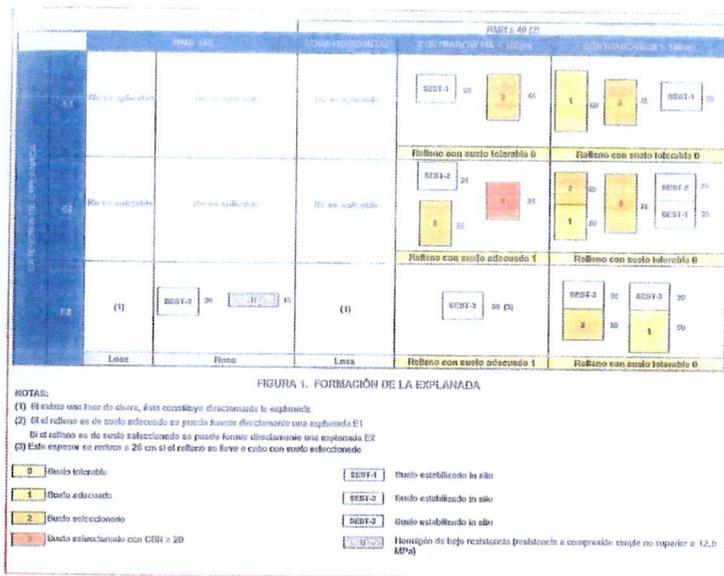
ROCA	Muy mala	Mala	Regular	Buena	Muy buena
RMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100

Adicionalmente, en base a otros criterios complementarios sobre recomendaciones de excavación y sistemas constructivos de túneles, se puede afirmar lo siguiente:

- Con valores de RMR mayores de 50, el cimiento del firme puede ser la propia roca o una losa estructural, la cual se dispondrá sólo, por razones de geometría de la sección transversal de la calzada, si la excavación se ejecuta con tuneladora<sup>1</sup>.
- Con valores de RMR entre 35-40 y 50 la excavación se ejecuta usualmente en avance y destroza, haciéndose necesario el uso de sostenimientos. El sistema constructivo recomendado varía, siendo también posible el uso de tuneladoras. Se puede deducir que en estos casos el apoyo será la propia roca si 40 < RMR < 50, o una losa o solera si el valor de RMR es menor o si se requiere por razón de la geometría de la sección transversal.
- Con valores de RMR menores a 35-40, la excavación se realiza con contrabóveda, normalmente empleando varias galerías de avance. El sistema constructivo recomendado varía: excavación convencional, fresado, escarificación o escudo. En principio, el cimiento del firme estaría constituido por las losas estructurales. Sin embargo, si la cota de la contrabóveda está más de 100 cm por debajo de la explanada, el necesario relleno sería el apoyo del firme. Dicho relleno podría proceder de la propia excavación (si tiene una calidad suficiente) o estar formado por un hormigón de baja resistencia.

Las posibilidades de formación de las explanadas de las distintas categorías se recogen en la figura 1, dependiendo de la clasificación de la roca y de la profundidad de la contrabóveda; su selección dependerá en última instancia de las características de los materiales disponibles. El espesor del relleno será el necesario para que se pueda apoyar el firme, teniendo en cuenta las dimensiones del túnel y el gálibo requerido.

(1) Es importante recordar que en túneles de carretera la excavación con tuneladora sólo es viable, en general, con longitudes de túnel mayores de 2.000 m.



Para una correcta aplicación de la figura 1 se deberá tener en cuenta que todos los espesores que se indican son los mínimos especificados para cualquier punto de la sección transversal de la explanada, que dicha figura se estructura según la profundidad de la contrabóveda y que los materiales empleados han de cumplir las prescripciones contenidas, según correspondo, en los artículos 330 o 512 del PG-3.

#### 4. Constitución del cimiento del firme

En rocas regulares y buenas (RWR > 40) el material tiene una capacidad de soporte sobrada para ser el

apoyo del firme. En estos casos los mayores dificultades residen en lograr un acabado suficientemente regular y que no queden pedruzcos sueltos. Si se logra al menos la segunda, puede formarse la explanada de cuatro maneras diferentes:

- En primer lugar, la superficie de apoyo puede ser muy adecuada para recibir una capa granular que sirva de regularización y de subbase del firme, que podría ser en este caso de cualquier tipo.
- La segunda opción es rellenar las irregularidades con un hormigón de baja resistencia (no superior a 12,5 MPa de resistencia a compresión simple). Esta tarea lleva un componente impor-

tante de mano de obra, frente a la opción anterior que es más fácilmente mecanizable.

- En tercer lugar, es posible rellenar toda el fondo de excavación con suelocemento, hasta lograr un espesor de mínimo del orden de 25 cm sobre suelos con menos del 35 % de finos y CBR superior a 5, o de 50 cm sobre suelos de peor calidad.
- Finalmente, puede optarse por disponer una solera de hormigón que cierre la sección del túnel. De esta manera la solera constituye un apoyo de excelente calidad para el firme.

En caso de excavar un túnel en suelos que no tengan empuje ni hinchamientos, hay que formar la explanada de la misma manera que se haría en un fondo de desmonte realizado en un suelo de esas mismas características. Cuando se trata de túneles excavados en materiales que producen empujes excesivos tras la construcción, como es el caso de los suelos expansivos, de las rocas deformables y con grandes empujes ("squeezing rock", en inglés), de las anhidritas y de otros materiales de comportamiento similar, lo más adecuado es establecer una sección de túnel con curvatura en todas sus partes, disponiendo una contrabóveda. Es posible así resistir las presiones transmitidas por el terreno con una estructura de hormigón en masa o, como mucho, ligeramente armado, con una forma que se aproxime al artificio de los arcos.

La anchura de la sección utilizada determina el relleno de la parte inferior, hasta que la cuerda del arco tenga la longitud deseada (el espacio entre el arco y la cuerda es importante). Como quiera que estas secciones se dan en terrenos de mala calidad, la solución más adecuada para este relleno no es ejecutarlo con el material excavado, salvo en casos excepcionales. Contando con que en este espacio deben disponerse los sistemas de drenaje que sean oportunos y algunos conductos auxiliares para instalaciones u otras infraestructuras, ya sean secundarias o de comunicaciones, una buena solución es rellenar con hormigón de baja resistencia, lo que proporciona un apoyo estable, de alta rigidez y de relativamente fácil regularización superficial. Además, este hormigón proporciona un margen adicional de seguridad, ya que colabora algo a la resistencia a eventuales cargas

del terreno. En consecuencia, lo más adecuado en estos casos es contar con un cemento de excelente calidad, sobre el que podrá disponerse cualquier tipo de firme.

Las tuneladoras, conocidas con los nombres de topas, escudos o, más comúnmente, como máquinas tuneladoras integrales (TBM en inglés, "tunnel boring machine"), permiten la ejecución del túnel en un proceso continuo a sección completa, y con un proceso limpio y seguro, con rendimientos muy elevados (con una media superior a los 500 m al mes). Sin embargo, su empleo está limitado por diversas causas:

- Un coste muy elevado.
- Plazos de fabricación (en caso de ser una tuneladora nueva) o de rehabilitación (si se trata de una máquina que ya ha ejecutado otro túnel) importantes: entre 7 y 15 meses; a este plazo hay que añadir un tiempo de montaje de dos a tres meses.
- Un espacio dedicado a instalaciones de más de 100 m de longitud, y alrededor de dos decenas de metros de anchura.

A la vista de estas circunstancias, es evidente que el empleo de tuneladoras compensa únicamente en túneles muy largos (más de 2 km de longitud, salvo excepciones).

Con estos equipos, la forma de la sección es circular. Dada la situación de la cuerda de longitud necesaria para la calzada, el espacio entre el firme y la contrabóveda o parte inferior del túnel es aún mayor que el existente en túneles con contrabóveda. Proceder simplemente al relleno de este volumen sería desaprovechar un espacio que resulta muy caro de excavar. Por ello, en la parte inferior de la sección se suele disponer una vía para el acceso exclusivo de personal de asistencia y emergencia. La estructura que está entre este espacio y la calzada principal, realizada in situ o prefabricada, debe tener un canto limitado, a fin de poder lograr el máximo gólibo en la máxima anchura posible; esto obliga a valorar la sobrecarga que supone el firme: lo ideal sería que dicha estructura tuviese la terminación adecuada para poder circular directamente sobre ella, lo que en teoría es factible, pero no tanto en la práctica.

### 5. Consideraciones sobre la elección del tipo de pavimento

Como se ha indicado, en los túneles es posible en principio el empleo tanto de pavimentos de hormigón como de pavimentos asfálticos. A veces se recomienda especialmente el pavimento de hormigón por su mayor durabilidad teórica y valorando la dificultad de cualquier tarea de conservación dentro de un túnel. Pero las causas de los deterioros que aparecen prematuramente dependen no tanto de la naturaleza del pavimento como del proceso de ejecución: impericia del constructor, desconocimiento del director de las obras, o incluso porque la calidad de los materiales o el espesor de las capas no son los previstos; en otras ocasiones lo que ocurre simplemente es que el crecimiento de la intensidad del tráfico pesado ha sido superior al que era razonable considerar en las fases de planeamiento y de proyecto.

Entre los factores que deben ser considerados a la hora de elegir el tipo de pavimento de un túnel están el terreno en el que se excava, el entorno, la longitud del túnel, la existencia o no de desvíos alternativos, la posibilidad de interrupción de la circulación, la escasez de espacio disponible en la sección (alternativamente, el coste de disponer de espacio adicional), el tipo de pavimento del resto de la vía y la comprensión de la sección por parte del conductor. Debe tenerse en cuenta que:

- no son factores independientes, de manera que cada uno de ellos influye en los demás;
- todos los factores citados son relativos, siendo posible encontrar ejemplos y contraejemplos para lo que se quiera; en cualquier caso, la existencia de un ejemplo nunca debe producir automáticamente la inferencia de una regla.

En cuanto a la longitud, es importante distinguir los túneles que permiten razonablemente la adopción de un tipo de pavimento diferente del existente en el resto de la vía (y no sólo una sección estructural distinta con un pavimento del mismo tipo). Un criterio habitual es permitir distintas secciones estructurales con un mismo pavimento a partir de longitudes de 200 m, mientras que para un tipo de pavimento diferente la longitud mínima habitual es de 3 km; esta longitud es la total dentro de una

misma obra, por lo que podría alcanzarse sumando las longitudes de varios túneles en el tramo. En operaciones de construcción de un eje viario completo podría ser posible coordinar varias obras para lograr un fin como el de construir tramos cortos en cada obra, pero esto no siempre ocurre en la práctica, debido a problemas logísticos y de organización económica de las obras.

La posible existencia de desvíos alternativos que no supongan un excesivo aumento del tiempo de viaje puede influir en la elección del tipo de pavimento, pues si es de hormigón puede resultar complejo (aunque siempre posible) realizar reparaciones manteniendo la circulación por los carriles adyacentes. En túneles con calzadas separadas (tubos dobles o triples) o en entornos urbanos los desvíos suelen ser sencillos, y en estos últimos es posible cortar la circulación en períodos de demanda relativamente baja durante varias horas. En túneles de montaña en tramos convencionales de dos carriles y doble sentido de circulación es difícil realizar cortes que no sean excepcionales, y especialmente durante más de 12 horas.

En el túnel se produce simultáneamente una relativa escasez de espacio y otra de gálibo, cerca de los hastiales. Las secciones de dos carriles en túneles excavados en mina suelen tener unos 80 m<sup>2</sup> libres, pero las estructuras soterradas pueden tener espacios menores (60 a 70 m<sup>2</sup>), y los gálibos libres (medidas bien en borde de carril o, desahablemente, en borde de arcén) varían entre algo más de 4 m en los túneles urbanos en los que no se permite la circulación de camiones grandes, y los 5 o 5,5 m de los túneles más espaciosos. Por otro lado, hay que considerar que tanto el espacio como el gálibo inicialmente disponibles para la construcción del firme (los ventiladores, conductos de ventilación, luminarias, etc., se pueden y se suelen instalar después) pueden ser considerablemente mayores cuando se llevan a cabo las tareas de conservación y de rehabilitación, con todas las instalaciones ya en su lugar.

El tipo de pavimento del resto del tramo influye en la elección del pavimento de los túneles situados en él. Puede ser aconsejable, pero no imprescindible, que la capa de rodadura en el túnel sea similar a la del resto del tramo. Por otro lado, en ningún caso es recomendable cambiar el pavimento para longitudes de túneles relativamente

cortas, debido a que eso implicaría costos adicionales injustificados e iría probablemente en detrimento de la calidad final. En un itinerario de montaña con numerosos túneles y estructuras, lo que debe pesar son los túneles. En casos en los que un túnel tiene un peso relativamente bajo en el conjunto de la obra, el pavimento del túnel debe ser del mismo tipo que en el resto, para facilitar no ya la construcción, sino también la conservación y las rehabilitaciones.

El entorno en el que se encuentra el túnel puede ser montañoso, rural, metropolitano o urbano; influye en el trazado, en los itinerarios alternativos y en las posibilidades de corte. Aparte de lo ya dicho, es posible que en entornos montañosos la inclinación de la rasante en el túnel sea elevada, y con ello se penalizarán los pavimentos de hormigón, en los que los empujes longitudinales podrían ocasionar incluso el pandeo o el cabalgamiento de las losas. Los radios en túneles nuevos suelen ser relativamente generosos, pero también podría aplicarse un razonamiento similar al indicado si fueran muy reducidos: las pavimentadoras de encofrados deslizantes tienen radios de giro relativamente amplios.

Para su empleo en los túneles las capas de mezcla asfáltica tendían en su contra, al menos en teoría, un apreciable poder calorífico. En ellas, según diversos estudios, el punto de ignición, que marca el inicio de la combustión, se sitúa entre 425 y 530 °C, pero las llamas que podrían producirse serían sólo superficiales y no se propagarían. Mientras el potencial calorífico de un coche de tipo medio, en una combustión completa, sería del orden de 18000 MJ, el de una superficie equivalente (8 m<sup>2</sup>) de firme con un espesor total de 15 cm de mezclas bituminosas sería de 6400 MJ; es cierto que esto supondría un incremento notable de la carga de fuego, pero sólo en la medida en que fuese posible que las mezclas bituminosas ardieran totalmente en todo su espesor, lo cual no ha sucedido en ninguno de los accidentes que se han producido en los años pasados y que son el origen directo de las preocupaciones actuales sobre la seguridad en los túneles (realmente, se ha comprobado que la ignición no afecta más que superficialmente a la capa de rodadura). Finalmente, teniendo en cuenta la pequeña proporción de betún en las mezclas, la cantidad de humo que se puede llegar a formar

debido a la ignición de éstas es pequeña en comparación con el que se produce al arder los vehículos y sus combustibles. Como muestra de que el poder calorífico de las mezclas bituminosas no es un argumento concluyente para no ser utilizadas en los pavimentos de los túneles, debe destacarse el que la Directiva 2004/54/CE no incluye ninguna especificación sobre la naturaleza del firme, ni tan siquiera criterios de resistencia ante el fuego de los materiales empleados en él.

En cuanto a la capa de rodadura, hay que tener en cuenta que en Europa se ha adoptado con generalidad el criterio de prohibir en los túneles las mezclas asfálticas drenantes, por su capacidad de permitir que los combustibles o líquidos inflamables vertidos se desplacen por su interior, lo que facilitaría la propagación del fuego en caso de incendio; por las mismas razones, en España se ha considerado que la prohibición debía extenderse a las mezclas tipo M (microaglomeradas con una acusada discontinuidad granulométrica), mientras que con las tipo F (microaglomeradas con una acusada discontinuidad granulométrica menos marcada que en las mezclas M) se consiguen unas buenas características funcionales, pero sin un incremento de los riesgos en el caso de un incidente.

Como ya se ha indicado, la gran ventaja conceptual de los pavimentos de hormigón, que resultaría especialmente valiosa en túneles, es su gran durabilidad con unas reducidas necesidades de conservación, incluso a largo plazo, si ha sido correctamente ejecutada. Con los pavimentos de hormigón se podrían evitar actuaciones que siempre resultan más complejas en el interior de túneles largos y para los que se requieren medidas complementarias en la prestación del servicio; además, no se plantearían los problemas derivados de futuras rehabilitaciones, como la disminución de los gálibos debido a los recrecimientos. Pero esos argumentos a favor de los pavimentos de hormigón por razones de conservación, que serían en buena medida también aplicables en los tramos al aire libre, no tienen nada que ver con eventuales argumentos referidos a la seguridad en la explotación, que es lo que debe valorarse por encima de todo.

Además de las posibles complicaciones constructivas y de su influencia en los plazos de ejecución, un problema del pavimento de hormigón es

el de ofrecer una cierta dificultad para conseguir una regularidad superficial suficientemente buena, teniendo en cuenta que muchas veces se parte de una regularidad inevitablemente mediocre (si el pavimento se apoya en una losa de hormigón in situ). No se olvide que la regularidad superficial influye no sólo en la comodidad de la circulación, sino también en su seguridad. Finalmente, con anchos espesores, parece que es algo más fácil conseguir una buena regularidad superficial con mezclas asfálticas, pues éstas se disponen en varias capas y no en una sola.

Dejando de lado la viabilidad de la ejecución de un pavimento de hormigón, así como las supuestas ventajas que podría comportar desde el punto de vista de la conservación a medio y a largo plazo, es necesario valorar también el comportamiento de este material frente al fuego, aunque su poder calorífico sea nulo. Con las altas temperaturas que se producen en un incendio existe un riesgo de lajeo ("spalling", en inglés), es decir, de estallido del hormigón cercano a la superficie libre con posible proyección de partículas. Este fenómeno preocupa mucho en relación con los revestimientos, pero debería preocupar también en relación con el pavimento, pues además del peligro para los usuarios y para los equipos de socorro, el pavimento quedaría inutilizado y, al contrario que con uno asfáltico, su reparación exigiría tener cerrado el túnel un tiempo elevado, algo que puede ser incompatible con la normal prestación del servicio si no hay vías alternativas.

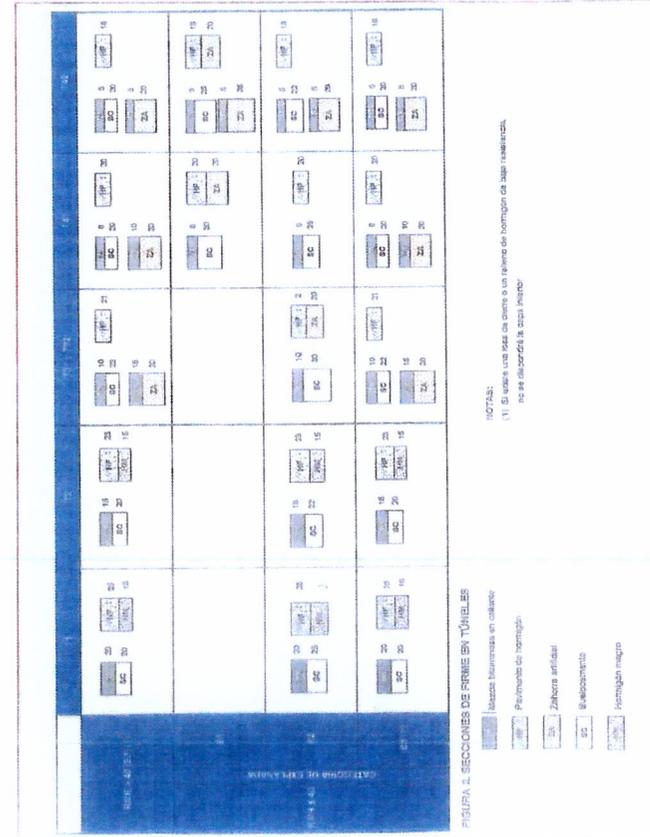
Otro aspecto que debe ser analizado en relación con la pavimentación de los túneles es el del contraste de las marcas viales. Con elevadas intensidades, e independientemente de la naturaleza del pavimento, en la separación entre carriles de túneles relativamente largos son necesarias pinturas con un alto contenido de microesferas de vidrio que garanticen una elevada reflectancia, consiguiéndose así un buen contraste con cualquier superficie (no debe olvidarse que en esos túneles hay una iluminación permanente y es obligatorio circular con las luces encendidas). No hay que olvidar tampoco que a largo plazo cualquier superficie utilizada para la circulación de vehículos tiende a oscurecer por los humos y por el desgaste de los neumáticos y que, en cualquier caso, lo que acaba predominando es el color de los áridos empleados.

En este sentido, la elección entre pavimento asfáltico y de hormigón resultaría indiferente.

La superficie de hormigón resalta más en principio los ocasionales obstáculos y permite a los usuarios visualizar mejor la anchura de carril, aun con poca luz, lo cual incrementa la seguridad, y permite menores consumos. Sin embargo, para disminuir la monotonía de la conducción y la claustrofobia relativa en un túnel largo será necesaria una mayor dotación de pintura en las marcas viales, con una conservación más frecuente, así como disponer de una intensa diferenciación cromática con los hastiales y la bóveda. En el caso de los pavimentos asfálticos ocurre lo contrario, por cuanto existe en principio un mayor contraste entre las marcas viales y la mezcla asfáltica; sin embargo, es necesario dotar al túnel de un buen sistema de iluminación que incremente la seguridad del usuario.

En cualquier caso, hoy que ser muy exigentes tanto con la resistencia al deslizamiento como con la regularidad superficial: deben ser acordes con las velocidades de circulación previstas. Debe quedar garantizada siempre una elevada resistencia al deslizamiento, aunque se superen los límites de velocidad establecidos: Incluso a los infractores hay que ofrecerles una seguridad suficiente. Por otro lado, aunque dentro de un túnel no llueva, no se puede ser más tolerante en los tramos subterráneos que en los situados en el exterior, entre otras razones porque, debido precisamente a la total ausencia de lluvia, se acumulan en la calzada partículas sólidas (procedentes de la combustión, de los vertidos, del desgaste de los neumáticos) que tienen una cierta influencia negativa en la resistencia al deslizamiento.

El pavimento debe tener asimismo una elevada microtextura, que ha de permanecer con valores prácticamente invariables a lo largo del tiempo, una suficiente macrotextura (la propia del tipo de superficie adoptada) y una megatextura nula, que sólo sería el reflejo de una deficiente puesta en obra y que sería de todo punto inaceptable. Para intentar conseguir una buena regularidad superficial, el fresado no es sino la última opción; si bien es cierto que se pueden reducir así sustancialmente los irregularidades, se pueden introducir respuestas extrañas en el pavimento desde el punto de vista de la sonoridad y, lo que es más grave, desde el punto de vista de la resistencia al deslizamiento:



aunque actualmente una buena alternativa son los microfresados, el resultado puede ser dudoso desde los puntos de vista señalados.

#### 6. Determinación de espesores y catálogo de secciones estructurales de firme

Una vez definidos los factores de diseño, el catálogo de secciones estructurales de firmes es la forma más práctica y ventajosa de determinar el espesor de firme que se necesita en cada caso, de la misma forma que se hace en la normativa general de firmes de carreteras (Norma 6.1 IC del Ministerio de Fomento). Como en ésta, la elección entre las diferentes opciones debe basarse en cada caso en aspectos tales como los costes relativos de las posibles soluciones, las condiciones de puesta en obra y las estrategias previstas de conservación. De manera análoga a como se hace en la Norma 6.1 IC, la figura 2 recoge las secciones de firme según la categoría de tráfico pesado y la categoría de la explanada, si bien se han excluido las categorías de tráfico pesado T00 y T0, que requerirían un análisis especial que excede del objetivo perseguido en este artículo.

#### 7. Algunas recomendaciones para la construcción de los firmes en los túneles

Uno de los factores que más contribuye a la reducción de la vida útil del firme en los túneles es la presencia de agua en cualquiera de las capas que forman aquí, lo que se puede deber fundamentalmente a fallos en la impermeabilización o en el sistema de drenaje. Como ya se ha señalado, el terreno tiene una importancia decisiva en el procedimiento constructivo y en el tipo de revestimiento: ambos elementos influyen asimismo al elegir el tipo de impermeabilización.

Los túneles pueden estar situados en zonas de aguas subterráneas, en zonas de saturación o en la franja capilar. Las técnicas de impermeabilización deben adaptarse a estas distintas situaciones.

En algunos túneles se producen importantes infiltraciones procedentes de la parte inferior de la sección, y pueden afectar a todas las materiales que constituyen el firme y más aún a la explanada.

Si esta infiltración es localizada, la mejor solución puede ser disponer de una sobreexcavación que se rellena con material drenante, conduciendo a continuación por un colector el agua captada. Hay que disponer de una capa impermeable entre el relleno drenante y el firme, formando la explanada por encima de esta capa. Si, por el contrario, la infiltración es muy generalizada, son posibles dos soluciones. Siempre que el presupuesto lo permita es aconsejable disponer una impermeabilización completa de la sección, con el fin de aislar las corrientes de agua; esto puede lograrse mediante una combinación de un geotextil (normalmente con una lámina impermeable y otra filtrante), inyecciones en el terreno e inyecciones entre el conjunto terreno-sostenimiento-revestimiento. Cuando la impermeabilización supone un coste demasiado elevado para la obra, debe construirse una capa drenante con capacidad suficiente para conducir el agua hasta un dren lateral.

Si no se impermeabiliza el túnel en su totalidad el agua infiltrada en clavé y hombros puede gotear (o, lo que resultaría ya inaceptable, chorrear) sobre la calzada. En estos casos es muy recomendable colocar geotextiles que conduzcan el agua al nivel de la calzada, y sumideros para llevar el agua fuera de la sección de firme tan pronto como sea posible. Es imprescindible examinar de manera continuada y en detalle el estado de un pavimento que pueda presentar humedades durante una buena parte del año, en primer lugar por la incidencia de este hecho en la seguridad vial.

Si el firme se apoya en roca, es imprescindible evitar la retención del agua en la explanada mediante un sistema de drenaje y de relleno adecuados, para lo cual hay que disponer un hormigón de baja resistencia o un suelo estabilizado in situ con cemento, con espesores entre 20 y 30 cm. En casos especiales en los que el agua aflora bajo la solera se recomienda recogerla mediante una base granular drenante situada bajo el firme, tal como se ha indicado.

Si el soporte del firme es una losa estructural, se deberían sellar sus juntas, a fin de minimizar los riesgos de su reflexión en la superficie del pavimento. Asimismo, en el caso de pavimentos asfálticos, se debe colocar una capa intermedia con el fin de evitar tanto la transmisión de grietas y juntas como

para mejorar la regularidad superficial. Incluso, aunque no sea una práctica habitual en España, es también recomendable disponer dicha capa de mezcla asfáltica bajo un pavimento de hormigón, de entrada para asegurar una plataforma suficientemente regular para su colocación.

#### 8. Conclusiones y recomendaciones

- Este artículo se ha redactado debido a la ausencia de una normalización específica para el diseño de los firmes en túneles, con la intención de aportar criterios básicos y reglas prácticas.
- Los firmes en los túneles suelen tener espesores menores que en los tramos exteriores, debido a la mejor calidad de los materiales de apoyo, pues se trata en muchos casos de roca sana o de hormigón.
- Se debe tener siempre presente al elegir el tipo de pavimento que lo más importante no es tanto su naturaleza como la calidad de su ejecución, dadas las dificultades de los cortes de tráfico y la escasez de espacio para llevar a ca-

bo las actuaciones de reparación o de conservación preventiva.

- En los túneles el pavimento puede ser asfáltico o de hormigón, pero su acabado debe proporcionar una diferenciación cromática de la calzada respecto a los hastiales y la bóveda, de manera que exista un efecto de guía sobre el conductor.
- Para la definición de la sección estructural del firme debe evaluarse no solamente el coste de construcción, sino también tener en cuenta criterios técnicos: características funcionales y estructurales, proceso constructivo, necesidades de conservación; además, en el análisis económico, deben valorarse los costes de conservación y los inducidos a los usuarios por las labores de conservación.
- Un criterio fundamental al elegir el pavimento en un túnel es la solución adoptada en el resto de la vía, y en especial la posible alternancia de túneles con estructuras y con tramos sobre obras de tierra. La Ingeniería resulta más eficiente si se consideran todos los factores y a cada uno de ellos se le asigna el peso adecuado. ♦

#### Referencias:

- (1) Asociación Mundial de Carreteras (APCD), *Classification of Tunnels. Existing Guidelines and Experiences*, 1999.
- (2) CANCILA, M. D., Manual sobre pavimentos en túneles. Ponencia presentada en el IV Congreso Nacional de Túneles, Asociación Técnica de Carreteras, Andorra, octubre de 2005.
- (3) Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, *Normativa y recomendaciones sobre diseño de firmes y pavimentos para túneles en Europa: fase 1 y 2 (Informe parcial, tomo único, clave CEDX: 31-403-3-078)*, 39 pág., más anexos, Madrid, julio de 2004.
- (4) GALVIS, R., Guía para el diseño de pavimentos en túneles. XVII Curso Internacional de Carreteras (Trabajo final de Especialización), Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2003.
- (5) GALVIS, R., DEL VAL, M. A. y ROMANA, M. G., *Criterios para el diseño de pavimentos en túneles*, Comunicación presentada en el XII Congreso Iberoamericano del Asfalto, San José (Costa Rica), noviembre de 2005.
- (6) Geocommit, 1996, *Manual de túneles interiores de carretera*, Madrid, 1996.
- (7) KRAMER, C. y otros, *Ingeniería de Carreteras (Tomo II)*, 555 pág., McGraw-Hill, Madrid, 2004.
- (8) Ministerio de Fomento, *Secciones de firme (Norma 6.1 IC)*, 41 pág., Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, Madrid, diciembre de 2003.
- (9) Ministerio de Fomento, *Firmes y pavimentos (Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3)*, 116 pág., Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, Madrid, abril de 2004.
- (10) Ministerio de Fomento, *Real Decreto 635/2004*, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado, Boletín Oficial del Estado nº 126, pp. 19970-19985, Madrid, 27 de mayo de 2004.
- (11) NOUMOWÉ, A., *Revettement de chaussées en enrobé hydrocarboné ou en béton en situation d'incendie*, Université de Clermont-Ferrand, EPU (Editions Publibook Université), Paris, 2003.
- (12) ROCCL, S. y DEL VAL, M. A., *El proyecto de la nueva M-30*, pp. 27-46, Revista de Obras Públicas, nº 3454, Madrid, abril de 2005.
- (13) ROMANA, M. G., *Túneles de carretera. Planificación, trazado y túneles urbanos*, Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1997.
- (14) ROMANA, M. G., 2003, *Pavimentos en túneles: factores a considerar para su tipo y diseño*, Ponencia, III Congreso Venezolano del Asfalto - III CONVEAS, Maracaibo, Estado Lara, Venezuela.
- (15) ROMANA RUIZ, M., *Geología de túneles*, España.
- (16) Unión Europea, *Directiva 2004/54/CE del Parlamento y Consejo europeo, de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras*, Diario Oficial de la Unión Europea, Bruselas, 2004.

**APÉNDICE 5.- CATAS FIRME EXISTENTE**  
**26/05/2016**





