

# Resistencia a la fisuración de las mezclas SMA

La resistencia a la fisuración es una de las propiedades de las mezclas bituminosas que más preocupa a los técnicos de pavimentos y, en consecuencia, es de especial interés cualquier estudio que aporte nueva información sobre el tema. Estudios previos indican que las mezclas bituminosas tipo SMA, recogidas en la norma UNE EN 13108-5, pueden ser especialmente buenas en este aspecto, resistentes a la fisuración. Esto puede ser debido a su granulometría, su elevado contenido de ligante, el empleo de ligantes modificados en su fabricación y/o la adición de fibras. En este artículo se presentan los trabajos realizados en el marco del Proyecto SMA, financiado por el Centro Tecnológico para el Desarrollo Industrial (CDTI) con fondos FEDER, enfocados a analizar mediante ensayos de laboratorio la resistencia a la fisuración de este tipo de mezclas, tanto bajo cargas cíclicas como estáticas. El estudio se ha basado en la aplicación de tres tipos de ensayos: el ensayo de fatiga a flexotracción en 4 puntos, UNE-EN 12697-24, el ensayo cíclico uniaxial de barrido de deformaciones EBADE y el ensayo estático monotónico de tracción directa Fénix. Los objetivos del artículo han sido mostrar el buen comportamiento de las mezclas tipo SMA y la capacidad de analizar el comportamiento a fatiga mediante los ensayos Fénix y EBADE. Los resultados obtenidos muestran que las mezclas tipo SMA en general presentan una ductilidad muy superior a la de las mezclas convencionales tipo AC, lo que favorecería su resistencia a la fisuración. En particular, esta propiedad las convierte en una opción muy interesante como capas de rodadura resistentes al envejecimiento y a la fisuración. El presente artículo es la continuación del trabajo publicado en el número 8 de esta misma revista.

**Palabras clave:** resistencia a la fisuración, mezclas SMA

Resistance to cracking is one of the properties of bituminous mixtures about which pavement technicians are really concerned. This makes that any kind of study offering new information on this issue, is of special interest. Previous studies show that bituminous mixtures of the SMA type, as described in standard UNE EN 13108-5, could be particularly good, as they are resistant to cracking. This is possibly due to their granulometry, their large binder contents, use of modified binders in their production and/or fiber addition. This paper presents work carried out in the framework of the SMA Project, financed by the Spanish Centre for Industrial Technological Development (CDTI) with FEDER funds, focused on analyzing, by means of laboratory testing, resistance to cracking of this kind of mixtures, both under cyclic and static loads. The study was based on application of three types of testing: flex traction fatigue testing at 4 points, UNE-EN 12697-24, the EBADE uniaxial cyclic strain sweep test and the Fénix static monotonic direct tensile test. This paper aims at showing good behaviour of SMA mixtures and the possibility of analyzing fatigue behaviour by means of Fénix and EBADE testing. Results show that mixtures of type SMA generally offer more ductility than conventional mixtures of type AC, which could favour their resistance to cracking. Especially this property makes them a very interesting option as wearing course, resistant both to ageing and to cracking. This paper is the continuation of the paper published in number 8 of this magazine.

**Keywords:** resistance to cracking, SMA mixtures

Ramón Botella Nieto, [ramon.botella@upc.edu](mailto:ramon.botella@upc.edu)  
Felix Edmundo Pérez Jiménez,  
[edmundo.perez@upc.edu](mailto:edmundo.perez@upc.edu)

Universidad Politécnica de Cataluña

## 1. Introducción

La aparición de fisuras en los pavimentos bituminosos es un problema de vital importancia para los técnicos de pavimentos. Este fenómeno suele estar relacionado con el agotamiento

to por fatiga del material, los esfuerzos térmicos a los que se ve sometido y/o los esfuerzos tangenciales en la superficie del pavimento. Mecanismos de deterioro que se ven acentuados por el envejecimiento del ligante por la acción de la radiación solar.

Las mezclas tipo SMA (Stone Mastic Asphalt) se presentan como una solución a este problema, ya que presentan una elevada resistencia a la fisuración, en comparación con las mezclas convencionales tipo densas y semidensas. Esto es debido a su mayor contenido en ligante (por encima del 5,5% s.m.), al empleo de ligantes modificados y, generalmente, fibras (1,2,3,4).

Este tipo de mezclas no son comunes en España y por ello el proyecto mezclas Sostenibles Medio-ambientalmente Amigables, financiado por el Centro Tecnológico para el Desarrollo Industrial (CDTI) con fondos FEDER, tiene como objetivo el estudio y desarrollo de este tipo de mezclas. El trabajo presentado en este artículo pertenece a una pequeña parte de este proyecto.

El estudio de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas puede llevarse a cabo siguiendo dos líneas generales:

- Mediante el análisis directo de la resistencia a la fractura del material en un ensayo monotónico, en el cual se obtiene la carga máxima que soporta el material y su energía de fractura.
- Mediante ensayos cíclicos, en los cuales se evalúa la resistencia del material a la repetición de cargas, aun cuando estas son mucho menores a la carga máxima que puede soportar.

El primer procedimiento se ha aplicado principalmente para evaluar la resistencia y cohesión de las mezclas a bajas temperaturas, donde éstas tienen una respuesta rígida. Los ensayos empleados provienen de los utilizados en la caracterización de metales. Pero las mezclas presentan durante la mayor parte de su vida un comportamiento flexible y dúctil, especialmente, en el caso de las mezclas tipo SMA, y es necesario recurrir a ensayos que permitan evaluar estas propiedades.

Los ensayos propuestos habitualmente para analizar la resistencia a fisuración por fatiga de las mezclas bituminosas son los ensayos cíclicos de flexotracción. Se trata de ensayos largos y laboriosos que pueden dar resultados muy conser-

vadores cuando se ensayan mezclas muy flexibles y dúctiles, pues, si bien en las mezclas convencionales la rotura real está próxima al criterio de fallo (pérdida del 50% del módulo inicial), no ocurre lo mismo cuando se ensayan mezclas dúctiles, ya que éstas pueden soportar bastantes más ciclos antes de llegar a la tercera fase en el ensayo de fatiga (5).

Por ello, para el desarrollo de este trabajo se han empleado, además del ensayo de fatiga a flexotracción en 4 puntos descrito en la norma UNE-EN 12697-24 (6), dos ensayos desarrollados recientemente por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, el ensayo Fénix y el ensayo EBADE (Ensayo de BArrido de DEformaciones) (7,8,9). El primero es un ensayo monotónico de fractura que permite evaluar la respuesta de la mezcla durante su proceso de rotura, mientras que el segundo es un ensayo cíclico de barrido de deformaciones. Empleando estos dos ensayos, ambos de aplicación rápida, es posible obtener una caracterización general de la resistencia a fisuración de las mezclas bituminosas, tanto bajo cargas monotónicas como bajo cargas cíclicas. Adicionalmente se ha comparado el ensayo de fatiga a flexotracción en cuatro puntos con los resultados obtenidos en los ensayos Fénix y EBADE y así corroborar que los tres ensayos proporcionan información similar sobre el comportamiento a fisuración por fatiga de la mezcla bituminosa.

Una vez demostrada la relación entre el ensayo a fatiga en flexotracción en cuatro puntos con los ensayos Fénix y EBADE, y aprovechando la rapidez de ejecución de estos dos ensayos, se ha analizado la influencia de la temperatura de ensayo sobre el comportamiento a fatiga de una de las mezclas, algo que empleando el ensayo de fatiga clásico requeriría una gran cantidad de tiempo de ensayo.

## 2. Métodos de ensayo

### 2.1 Ensayo de fatiga a flexotracción en cuatro puntos

Para la realización de los ensayos de fatiga a flexotracción se aplicó la norma europea UNE-EN 12697-24. Todos los ensayos fueron realizados a 20 °C y 30 Hz (6). Se trata de un ensayo cíclico que consiste en someter una probeta con forma de viga prismática a una amplitud de deformación constante a flexión en cuatro puntos. En el ciclo 100 se registra el módulo del material, que es considerado como el módulo inicial. Durante el ensayo se monitoriza la evolución de este pará-

metro, y se finaliza el ensayo cuando el valor del módulo se reduce al 50% del módulo inicial. El número de ciclos necesario para que esto ocurra se registra junto con la amplitud de deformación aplicada.

De la realización de multitud de ensayos se obtienen una serie de puntos amplitud de deformación-número de ciclos hasta el 50% del módulo inicial. Estas parejas de puntos se representan sobre un gráfico doble-logarítmico deformación – ciclos. El resultado se suele aproximar a una línea recta según la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = a \cdot N^{-b}$$

donde  $\varepsilon$  es la amplitud de deformación aplicada en el ensayo y N es el número de ciclos hasta el 50% del módulo inicial. Esta expresión es conocida como la ley de fatiga, ya que, en teoría, predice el número de cargas admisibles por el material cuando se le aplica una cierta amplitud de deformación.

Un parámetro de gran importancia que permite comparar leyes de fatiga de diferentes materiales es  $\varepsilon_6$ , que se define como la amplitud de deformación para la cual el material resiste exactamente un millón de ciclos, según la ley de fatiga.



Figura 1. Ensayo de fatiga a flexotracción en 4 puntos.



Figura 2. Montaje ensayo EBADE.

## 2.2 Ensayo EBADE

El ensayo EBADE (Ensayo de BArrido de DEformaciones) (8,9) es un ensayo cíclico uniaxial de tracción-compresión controlado por deformación sobre probetas prismáticas. La principal característica de este ensayo es que la amplitud de deformación impuesta sobre el material aumenta cada 5.000 ciclos. De esta forma en un solo ensayo se obtiene el comportamiento de la mezcla bajo cargas cíclicas a diferentes amplitudes de deformación.

Típicamente el ensayo se realiza a una frecuencia de 10 Hz y una temperatura de 20 °C. La amplitud de deformación aplicada sobre el material se controla mediante un extensómetro colocado en un lateral de la probeta. En estos mismos laterales se realizan dos entallas para facilitar la rotura siguiendo la sección media de la muestra.

El ensayo empieza aplicando una amplitud de deformación de  $25 \cdot 10^{-6}$ . Cada 5.000 ciclos la amplitud de deformación aumenta en  $25 \cdot 10^{-6}$  hasta que se produce el fallo total de la probeta.

## Resistencia a la fisuración de las mezclas SMA

Durante el ensayo se calculan cada 100 ciclos la amplitud de tensión, el módulo complejo y la densidad de energía disipada (área del bucle tensión-deformación). Los parámetros más importantes obtenidos del ensayo son el módulo inicial (módulo promedio de los primeros 5.000 ciclos durante los cuales la deformación aplicada es mínima) y la deformación de fallo (nivel de deformación en el cual se produce una disminución súbita de la densidad de energía disipada).

### 2.3 Ensayo Fénix

El ensayo Fénix (7) consiste en un ensayo de tracción directa a velocidad de desplazamiento constante en el cual se evalúa la resistencia a la fisuración de una probeta de mezcla bituminosa, procedente del serrado de una muestra cilíndrica



Figura 3. Montaje del ensayo Fénix.

tipo Marshall. El ensayo se realiza a una velocidad de desplazamiento de 1 mm/min y una temperatura de 20 °C, aunque ambas variables pueden ser modificadas según las necesidades del estudio realizado.

Las muestras ensayadas presentan una forma semicilíndrica, ya que proceden de la división en dos mediante serrado de probetas tipo Marshall o testigos extraídos del pavimento. En la cara plana de la probeta se adhieren dos placas metálicas que permiten tirar de ellas, y se realiza una entalla en la sección media para facilitar el inicio de la fisura.

Durante el ensayo se obtiene la curva tensión-desplazamiento a partir de la cual se calcula la energía de fractura,  $G_F$ , el índice de rigidez a tracción, IRT, y el índice de tenacidad, que pondera la energía tras el pico de carga por la deformación de rotura (cuantifica la ductilidad):

$$G_F = \frac{W_F}{A_F}$$

$$IRT = \frac{1/2 \cdot F_{max}}{\Delta_m}$$

$$I_T = \frac{W_F - W_{F_{max}}}{A_F} \cdot (\Delta_{mpd} - \Delta_{F_{max}})$$

donde  $W_F$  es el trabajo total en J,  $W_{F_{max}}$  es el trabajo hasta la carga máxima en J,  $A_F$  el área transversal de la probeta en  $m^2$ ,  $F_{max}$  es la carga máxima alcanzada en el ensayo en kN,  $\Delta_m$  es el desplazamiento hasta el 50% de la carga máxima prepico en mm,  $\Delta_{mpd}$  es el desplazamiento hasta el 50% de la carga máxima postpico en mm,  $\Delta_{F_{max}}$  es el desplazamiento hasta la carga máxima en mm.

### 3. Materiales ensayados

Las mezclas escogidas para el estudio fueron cinco. Como mezclas de referencia se escogieron una mezcla convencional AC16S fabricada con un betún 50/70 y una SMA 11 fabricada con un betún modificado BM3c y con una adición de fibras Viatop del 0,3% s.m. Las tres mezclas restantes pertenecen al grupo de mezclas desarrolladas, siguiendo la filosofía de las mezclas SMA, con un fin específico cada una de ellas. Por un lado, la mezcla XSMA 11 NFU 35/50 fue fabri-

Tabla 1. Características principales de las mezclas estudiadas.

Mezcla	SMA11 BM3c	AC16S B50/70	XSMA11 NFU	XSMA16 Alto % Betún	XSMA11 Alto % Huecos
Granulometría	SMA 11	AC16 S	SMA 11	SMA 16	SMA 11
Ligante	BM3c	50/70	35/50	BM3c	BM3c
Árido grueso	Ofita	Silíceo	Ofita	Milonita	Ofita
Huecos en mezcla (%)	4,4	5,0	2,9	3,0	12,8
Contenido betún/mezcla (%)	5,7	4,8	5,7	8,3	5,7
Fibras de celulosa / mezcla (%)	0,3			0,8	0,5
Contenido NFU vía seca/ mezcla (%)			0,5		

cada con la adición de polvo de neumático por vía seca, con el objetivo de reciclar subproductos y aumentar la resistencia a las deformaciones plásticas. La mezcla XSMA16 BM3c Alto % Betún fue diseñada con el objetivo de mejorar el comportamiento a fatiga de estas mezclas añadiendo un contenido muy elevado de betún modificado, superior al 8% s.m. Por último, la mezcla XSMA11 BM3c Alto % Huecos fue diseñada, como su propio nombre indica, para obtener un elevado porcentaje de huecos, superior al 12%, lo cual puede ser beneficioso para la reducción del ruido de rodadura.

En la Tabla 1 se muestran las características principales de las mezclas objeto del estudio.

#### 4. Resultados

Los resultados de los ensayos de fatiga en 4 puntos, Fénix y EBADE sobre las cinco mezclas se presentan divididos en diferentes apartados. A continuación se ponen en común en un cuarto apartado, donde se muestra la relación existente en los tres ensayos y, por último, se analiza la influencia de la temperatura de ensayo sobre la mezcla SMA11 BM3c.

##### 4.1 Ensayo de fatiga a flexotracción en 4 puntos

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga a flexotracción en cuatro puntos a 20 °C y 30 Hz.

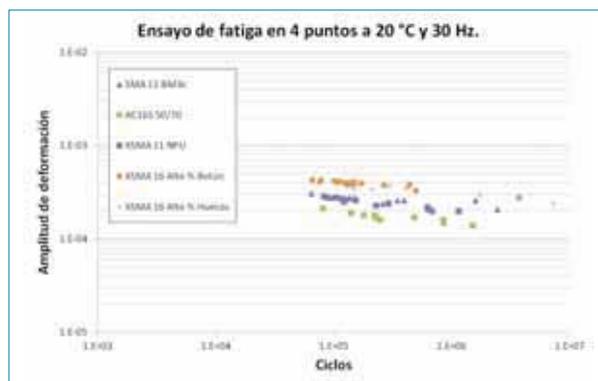


Figura 4. Resultados obtenidos en los ensayos de fatiga a flexotracción en 4 puntos.

La Tabla 2 muestra cómo los módulos iniciales promedio de las mezclas AC16S y XSMA11 NFU son muy similares, mientras que sus  $\epsilon_6$  son sustancialmente diferentes, mayor la de la mezcla con polvo de neumático. La mezcla XSMA11 NFU presenta una mejor ley de fatiga que la mezcla convencional AC16S 50/70.

Claramente todas las mezclas SMA ensayadas presentan una mejor ley de fatiga que la mezcla convencional AC16S 50/70. De entre las mezclas SMA, las fabricadas con alto contenido de betún y con alto contenido de huecos han sido las que mejor resultado han obtenido, siendo ligeramente mejor la primera, aunque también hay que señalar que éstas dos mezclas han sido las que menor módulo han presentado.

## Resistencia a la fisuración de las mezclas SMA

Tabla 2. Módulos iniciales promedio, parámetros de las leyes de fatiga y valores de  $\epsilon_6$  para las mezclas ensayadas.

Mezcla	Módulo inicial promedio (MPa)	a	b	r <sup>2</sup>	$\epsilon_6$ (10 <sup>-6</sup> )
SMA11 BM3c	5416	0,0007	0,073	0,66	255
AC16S 50/70	10600	0,0008	0,122	0,85	148
XSMA11 NFU	9540	0,0014	0,141	0,93	200
XSMA16 Alto % Betún	3727	0,0014	0,104	0,90	333
XSMA11 Alto % Huecos	3220	0,0012	0,101	0,89	297

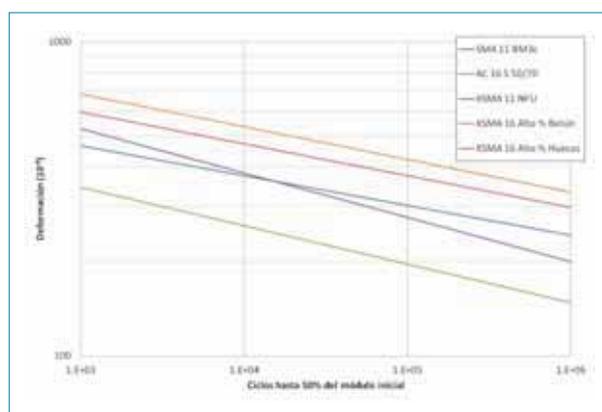


Figura 5. Leyes de fatiga.

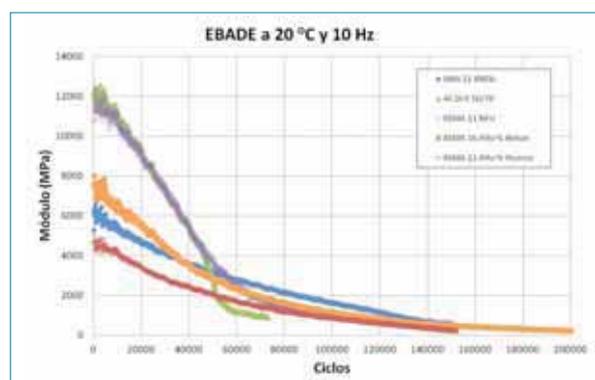


Figura 6. Evolución del módulo con el número de ciclos y el aumento de la amplitud de deformación en los ensayos EBADE.

### 4.2 Ensayo EBADE

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los ensayos EBADE a 20 °C y 30 Hz.

En la figura 6 se muestra cómo las mezclas AC16S 50/70 y la mezcla XSMA11 NFU son las que mayores módulos presentan. La mezcla XSMA11 Alto % Betún presentó un módulo ligeramente superior al de la mezcla de referencia SMA11 BM3c y una deformación de fallo también mayor, como se muestra en la figura 7. Estos resultados son coherentes con los obtenidos en los ensayos de flexotracción en 4 puntos: la mezcla con alto contenido de ligante mostró un mejor comportamiento a fatiga que la mezcla SMA11 BM3c.

La curva de evolución de la densidad de energía disipada con el número de ciclos, figura 7, es una buena herramienta para mostrar las diferencias entre mezclas con módulos si-

milares, cómo es el caso de las mezclas AC16S y la mezcla con polvo de neumático. Este gráfico muestra como, para un módulo inicial similar, la segunda mezcla experimenta una fractura más dúctil y, por lo tanto, obtiene una deformación de fallo mayor, lo que también es coherente con las leyes de fatiga obtenidas en el apartado anterior: mejor comportamiento a fatiga de la mezcla SMA con polvo de neumático. Lo mismo ocurre con las mezclas con alto contenido de betún y huecos que presentan una deformación de fallo mayor o igual que la mezcla de referencia SMA11 BM3c.

### 4.3 Ensayo Fénix

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los ensayos Fénix a 20 °C y 1 mm/min.

En la figura 8 se observa cómo las mezclas más rígidas fueron la mezcla XSMA11 NFU seguida de la mezcla con-

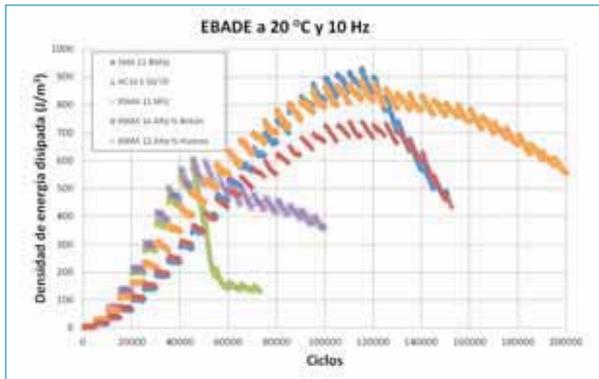


Figura 7. Evolución de la densidad de energía disipada con el número de ciclos y el aumento de la amplitud de deformación en los ensayos EBADE.

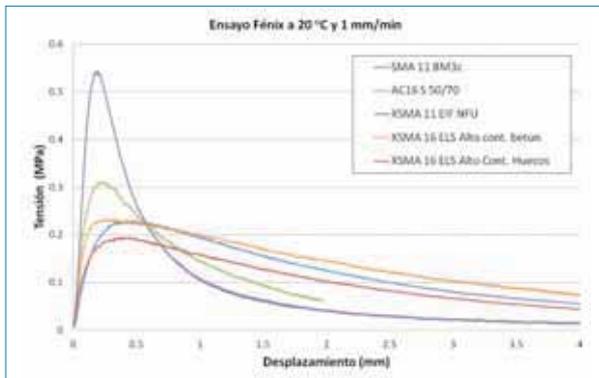


Figura 8. Curvas tensión-desplazamiento obtenidas en los ensayos Fénix.

vencional AC16S 50/70. Las mezclas SMA11 BM3c y la mezcla XSMA16 Alto % Betún obtuvieron curvas similares, siendo las dos mezclas que presentaron una mayor energía de fractura.

#### 4.4 Relación entre ensayos

En esta sección se presentan en conjunto los resultados obtenidos en los tres ensayos realizados para unos parámetros concretos de cada ensayo. En cada uno de los ensayos se pueden obtener, entre otros, dos tipos de parámetros: parámetros que dan una medida de la rigidez y parámetros que cuantifican la ductilidad del material.

En el caso del ensayo de fatiga a flexotracción en 4 puntos, los parámetros escogidos para representar la rigidez y ductilidad del material son el módulo inicial promedio de las probetas ensayadas (ciclo 100) y la  $\epsilon_6$  de la ley de fatiga. En

el ensayo EBADE el parámetro que representa la rigidez del material es el módulo inicial, entendido como el promedio de los módulos obtenidos en los primeros 5.000 ciclos del ensayo, en los cuales la amplitud de deformación aplicada es mínima. Por su parte, el parámetro que representa la ductilidad de la mezcla es la deformación de fallo que se define como la amplitud de deformación para la cual la densidad de energía disipada experimenta una caída súbita.

La similitud entre la figura 9 y la figura 10 es obvia. A excepción de una ligera disminución del módulo de la mezcla XSMA16 Alto % Betún respecto a la SMA11 BM3c, la colocación relativa de cada mezcla en el gráfico es muy similar. Esto implica una relación directa entre los parámetros obtenidos en el ensayo EBADE y los parámetros obtenidos en el ensayo de flexotracción en 4 puntos. Este es un resultado de capital importancia, debido a la diferencia de tiempo de ensayo necesario entre ambos ensayos: mientras que para obtener una ley de fatiga es necesaria cerca de una semana de ensayos, en apenas un día se pueden realizar los ensayos EBADE necesarios para obtener estos parámetros.

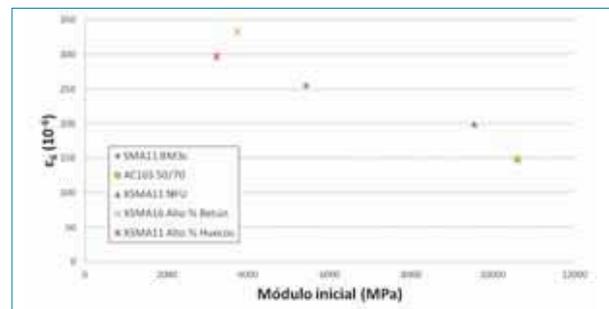


Figura 9. Deformación al millón de ciclos frente al módulo inicial. Ensayo de fatiga a flexotracción en 4 puntos a 20 °C y 30 Hz.

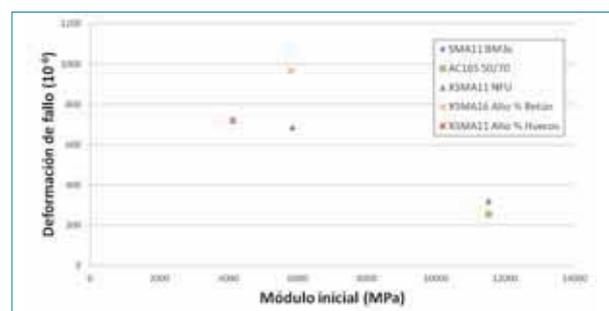


Figura 10. Deformación de fallo frente a módulo inicial. Ensayo EBADE a 20 °C y 10Hz.

## Resistencia a la fisuración de las mezclas SMA

En el ensayo Fénix el parámetro que representa la rigidez de la mezcla es el índice de rigidez a tracción, que es la pendiente inicial de la curva carga-desplazamiento, con lo cual está relacionado directamente con el módulo de la mezcla. Por su parte, la ductilidad se representa por el índice de tenacidad.

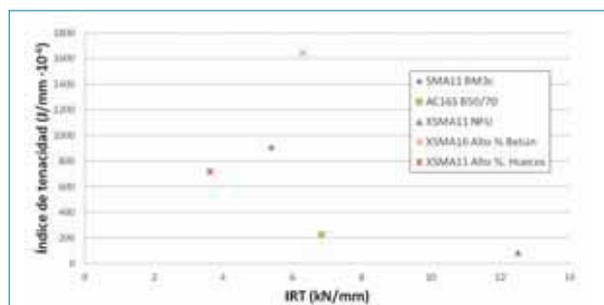


Figura 11. Índice de tenacidad frente al índice de rigidez a tracción. Ensayo Fénix a 20 °C y 1 mm/min.

La figura 11 guarda cierta similitud con la figura 9 y la figura 10: la mezcla con mayor ductilidad es la mezcla con alto contenido de ligante, mientras que la mezcla con mayor rigidez es la XSMA11 NFU. En el caso del ensayo Fénix se observa cómo la mezcla con polvo de neumático presenta un módulo muy superior al de la mezcla convencional.

Analizados todos los resultados, queda demostrado que las mezclas SMA con betunes modificados muestran una resistencia a la fisuración por fatiga superior a las mezclas convencionales, incluida la XSMA11 con polvo de neumático, que si bien presentó unos módulos muy similares a la mezcla AC16S, su deformación de fallo en el ensayo EBADE y su  $\epsilon_6$  en la ley de fatiga fueron superiores.

### 4.5 Influencia de la temperatura

Como última parte de este artículo, se presentan los resultados obtenidos en ensayos Fénix y EBADE realizados a diferentes temperaturas sobre la mezcla SMA11 BM3c. A modo de comparación se han incluido en los gráficos los resultados obtenidos en estos mismos ensayos para una mezcla convencional tipo AC16D 50/70 cuyos resultados se obtuvieron en un estudio previo y no relacionado con el que aquí se presenta. Por ello, en la figura 13 tan solo aparecen tres puntos ya que no se dispone de datos de esta mezcla en ensayos EBADE a -15 °C.

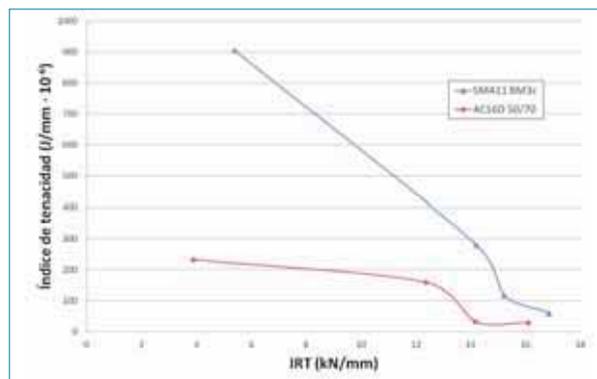


Figura 12. Índice de tenacidad frente a índice de rigidez a tracción. Ensayo Fénix a 1 mm/min y +20, +5, -5 y -15 °C.

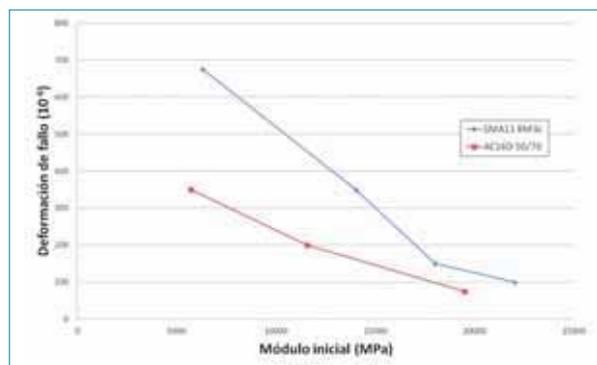


Figura 13. Deformación de fallo frente a módulo inicial. Ensayo EBADE a 10 Hz y +20, +5, -5 y -15 °C.

A simple vista, se observa la clara relación que existe entre el ensayo Fénix, ensayo monotónico y el ensayo EBADE, ensayo cíclico, figura 12 y figura 13, respectivamente. A medida que disminuye la temperatura, de izquierda a derecha en los gráficos, aumenta la rigidez del material y disminuye drásticamente la ductilidad.

La mezcla SMA presenta en todo el rango de temperaturas ensayadas una mayor resistencia a la fisuración, tanto bajo cargas monotónicas como cíclicas. A bajas temperaturas ambas mezclas presentan módulos similares, pero tanto el índice de tenacidad obtenido en el ensayo Fénix como la deformación de fallo obtenida en el ensayo EBADE es mayor para la mezcla SMA, sigue comportándose de forma más dúctil.

Esta diferencia de ductilidad se pone de manifiesto especialmente a altas temperaturas: la mezcla SMA presenta un módulo similar a la AC16D 50/70, pero con un índice de tenacidad mucho más elevado, lo mismo que su deformación de rotura.

## 5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en la batería de ensayos realizada han puesto de manifiesto claramente la superioridad de las mezclas tipos SMA con betunes modificados sobre las mezclas convencionales con betunes convencionales en los que a resistencia a la fisuración por fatiga se refiere. De entre todas las mezclas ensayadas, la ley de fatiga de la mezcla convencional AC16S 50/70 fue la que obtuvo peores resultados, situándose en la parte inferior del gráfico doble-logarítmico deformación-ciclos.

Comparando las mezclas SMA entre sí, la mezcla fabricada con un contenido de ligante superior al normal para estas mezclas, superior al 8% s.m., obtuvo la ley de fatiga con mayor  $\epsilon_6$ , seguida de la mezcla fabricada con un alto porcentaje de huecos, superior al 12%, y la mezcla SMA11 con BM3c de referencia. La mezcla SMA con menor  $\epsilon_6$  fue la mezcla con polvo de neumático, que a su vez fue la que presentó los módulos más elevados, similares a los de la mezcla convencional, mostrando claramente un comportamiento mejor a ésta en los ensayos de fatiga, tanto en 4 puntos como EBADE.

Adicionalmente, el estudio de la influencia de la temperatura de ensayo en el comportamiento de la mezcla SMA11 BM3c de referencia ha mostrado que a todas las temperaturas de ensayo sus parámetros de rigidez y ductilidad obtenidos en los ensayos EBADE y Fénix son superiores a los de una mezcla convencional. Teniendo en cuenta la relación mostrada en este artículo entre estos dos ensayos y el ensayo de fatiga en 4 puntos se puede concluir que esta mezcla presenta mejor comportamiento a fatiga, no solo a 20 °C, sino también a temperaturas menores.

En cuanto a las metodologías de ensayo empleadas, se ha demostrado que algunos parámetros obtenidos en los ensayos EBADE y Fénix guardan una relación directa con los parámetros obtenidos en los ensayos de fatiga a flexotracción en 4 puntos. Teniendo en cuenta la gran diferencia entre el tiempo de ensayo requerido por este ensayo y los ensayos EBADE y Fénix, estos dos últimos representan una opción muy atractiva para la caracterización del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas.

## 6. Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido desarrollado dentro del Proyecto Mezclas SMA Sostenibles Medioambientalmente

Amigables financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), en el cual participan las empresas Eiffage Infraestructuras, Asfaltos y Construcciones Elsan, Euroconsult, Rettenmaier Ibérica y Mantenimiento y Construcción de Equipos de Auscultación, así como los centros de investigación CEDEX, Univesitat Politècnica de Catalunya, Universidad de Castilla-La Mancha y el Centro Tecnológico Europeo del Asfalto (EUCAT).

En particular los autores quieren agradecer la participación directa en el trabajo desarrollado de Andrés Costa, Javier Loma, Rocío Cervantes (Asfaltos y Construcciones Elsan), María Elena Hidalgo (Eiffage Infraestructuras), Santiago Lanchas, Ruy Núñez (Rettenmaier Ibérica), Baltasar Rubio, Rafael Jiménez (CEDEX), Fernando Sánchez, José Antonio Hergueta (Euroconsult), Santiago Expósito, Victoriano Fernández (Laboratorio de Acústica Aplicada de la UCLM), y Juan José Potti (EUCAT).

## 7. Referencias

- (1) UNE-EN 13108-5: Mezclas Bituminosas. Especificación de materiales. Parte 5: Mezclas Bituminosas tipo SMA.
- (2) Shimazaki, S., Konno, M., Takahashi, M y Kasahara, A. DEVELOPMENT OF HIGH PERFORMANCE ASPHALT FOR PREVENTION OF REFLECTIVE CRACKING. Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement, 2010.
- (3) Brown, E.R., Rajib B., Mallick, J. E. Haddock y J. Bukowski. PERFORMANCE OF STONE MATRIX ASPHALT (SMA) MIXTURES IN THE UNITED STATES. Federal Highway Administration, NCAT Report No. 97-1, January 1997.
- (4) Lane, B., Raymond, C., Kazmierowski, T. J. y Kennepohl, G. J. A. COMPARATIVE LONG-TERM PERFORMANCE OF CANADA'S FIRST STONE-MIX ASPHALT FREEWAY PROJECT. Transportation Research Board 87th Annual Meeting, Washington D.C., 2008.
- (5) Pérez-Jiménez, F. E., Miró, R., Martínez, A., Botella, R., Reyes, O. y Valdés, G. FALSE FAILURE IN FLEXURAL FATIGUE TEST. 2nd Workshop on 4PB, Guimaraes, 2009.
- (6) UNE-EN 12697-24: Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 24: Resistencia a la fatiga.

## Resistencia a la fisuración de las mezclas SMA

- (7) Pérez Jiménez, F. E.; Valdés, G.; Miró, R.; Martínez, A. y R. Botella. FÉNIX TEST: DEVELOPMENT OF A NEW TEST PROCEDURE FOR EVALUATING CRACKING RESISTANCE IN BITUMINOUS MIXTURES. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2181, 36 – 43.
- (8) Perez-Jimenez, F., Valdes, G., Botella, R., Miro, R. y Martinez, A. EBADE PROCEDURE: A NEW METHOD TO ASSES FATIGUE BEHAVIOUR OF ASPHALT MIXTURES. Revista De La Construccion, 2011, 10, 55-65.
- (9) Pérez Jiménez, F. E., Botella, R. y Miro, R. DAMAGE AND THIXOTROPY IN ASPHALT MIXTURE AND BINDER FATIGUE TESTS. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2293, 8-17.

#2

### AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas, una solución para el funcionamiento de la alta velocidad sobre vía en placa

#INGENIERÍA