

El comportamiento a fisuración térmica y por fatiga de las mezclas SMA

Ramón Botella, ramón.botella@upc.edu
Felix Edmundo Pérez,
edmundo.perez@upc.edu
Rodrigo Miró, r.miro@upc.edu

Universidad Politécnica de Cataluña

Andres Costa, acosta@ohl.es
Javier Loma, jloma@ohl.es
Rocío Cervantes, rcervantes@elsan.es

Asfaltos y Construcciones Elsan

Lucía Miranda,
luciamirandaperez@gmail.com
M^a Dolores Fenollosa,
mdfenollosa@los-serranos.com
Esperanza Hidalgo,
ehidalgo@infraestructuras.eiffage.es

Eiffage Infraestructuras

Baltasar Rubio,
Baltasar.Rubio@cedex.es
Leonardo Enriquez,
Leonardo.Enriquez@cedex.es

CEDEX

Fernando Sánchez,
fsanchezd@euroconsult.es
José Antonio Hergueta,
jhergueta@euroconsult.es

Euroconsult

Santiago Lanchas,
Santiago.Lanchas@jrsiberica.com
Ruy Núñez, Ruy.Nunez@jrsiberica.com

Rettenmaier

Santiago Expósito,
Santiago.Exposito@uclm.es
Victoriano Fernandez,
Victoriano.Fernandez@uclm.es

Universidad Castilla La Mancha

Juan José Potti, jjpotti@asefma.com.es

EUCAT

Uno de los problemas que frecuentemente aparecen en nuestras carreteras es la fisuración de sus capas asfálticas, debido a la aplicación repetida de las cargas del tráfico (fallo por fatiga) y a las tensiones térmicas por bajas temperaturas. Para evitar este tipo de fallo, se está llevando a cabo en España, dentro de un proyecto de investigación financiado por el CDTI, en el que participan las empresas Eiffage, Elsan, Euroconsult, Rettenmaier Iberica y Mantenimiento y Construcción de equipos de Auscultación, junto con las OPIs: CEDEX, Eucat y las Universidades Politécnica de Cataluña y de Castilla la Mancha, un estudio sobre el uso de mezclas tipo SMA, recogidas en la norma UNE EN 13108-5, para evitar este tipo de fallo, y las ventajas que aportaría su utilización. Estas mezclas presentan un buen comportamiento respecto a las deformaciones plásticas, y un elevado contenido de ligante que mejora su durabilidad y resistencia a la fisuración. En este artículo se presenta la aportación que supone el uso de estas mezclas frente a las convencionales respecto al fallo por fisuraciones térmicas y de fatiga, a partir de la determinación de su energía de fractura y leyes de fatiga mediante los ensayos Fénix, EBADE y de flexotracción en 4 puntos.

Palabras clave: Fisuración, mezclas SMA

One of the problems often appearing in Spanish roads is cracking of asphalt layers caused by repeated traffic loads (fatigue failure) and thermopressure due to low temperatures. In order to avoid this type of failure, in the context of a research project financed by CDTI (Spanish Centre for the Development of Industrial Technology) with participation of the following companies: Eiffage, Elsan, Euroconsult, Rettenmaier Ibérica and Mantenimiento y Construcción de Equipos de Auscultación, together with Spanish Public Research Entities as CEDEX, Eucat and the Polytechnic Universities of Catalonia and Castile-La Mancha, a study is being carried out on the use of SMA mixes (eco-friendly sustainable mixes), certified in standard UNE EN 13108-5, to avoid this kind of failure, and the benefits of their application. These mixes offer good behavior as to plastic deformations, and a high binder content improving its durability and resistance to cracking. This article deals with the important contribution of these mixes compared to the conventional ones as far as thermal cracking and fatigue failure is concerned, based on the determination of its fracture energy and fatigue standards by the Fénix tests, EBADE and four points flexural strenght.

Keywords: Cracking, SMA mixes

El comportamiento a fisuración térmica y por fatiga de las mezclas SMA

1. Introducción

Uno de los fallos más frecuentes y característicos de los pavimentos bituminosos es la fisuración y agrietamiento de las capas de mezcla bituminosa. Esta fisuración es debida principalmente a la repetición de las cargas de tráfico y a las tensiones térmicas que aparecen en las mezclas a bajas temperaturas. Ahora bien, la respuesta de las mezclas bituminosas ante estos mecanismos de deterioro suele variar en función de la tipología de la mezcla y del tipo y contenido de ligante empleado en su fabricación. Para evitar este tipo de fallos, suele recurrirse a granulometrías que proporcionan un alto contenido de huecos, que deberán quedar rellenos por un alto contenido de betún, a poder ser modificado. Este es el caso de las mezclas SMA (Stone Mastic Asphalt), que están recogidas en la normativa europea (UNE-EN 13108-5), por ser mezclas habituales en los países del centro y norte de Europa, con climas más fríos que en España, y cuyo uso ahora se está analizando en nuestro país por su excelente respuesta ante los mecanismos antes señalados y, también, frente a las deformaciones plásticas (Brown et al., 1993 y 1997). Son mezclas cuya granulometría se caracteriza por un fuerte ángulo de rozamiento interno, debido a su alto contenido de partículas gruesas y pocos finos, lo que da lugar a numerosos puntos de contacto entre las partículas gruesas, proporcionando a la mezcla un sólido y estable esqueleto mineral. Este tipo de granulometría da lugar también a un elevado porcentaje de huecos, que al quedar rellenos por el mástico bituminoso, confieren a la mezcla una elevada ductilidad y resistencia a la fisuración.

Con objeto de conocer mejor el comportamiento de estas mezclas, adaptar su respuesta y comportamiento a las condiciones climatológicas y tráfico de España y ampliar y optimizar su campo de aplicación, varias empresas y centros de investigación están llevando a cabo un proyecto de investigación, financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI), del Ministerio de Economía y Competitividad. Uno de los aspectos de las mezclas SMA que se está analizando en este proyecto es precisamente la variación de la ductilidad y de su resistencia a la fisuración por fatiga con la temperatura.

Para evaluar este efecto, se han empleado tres tipos de ensayos: ensayo Fénix (Pérez-Jiménez et al., 2010), ensayo de fatiga de cuatro puntos (UNE-EN 12697-24) y ensayo EBADE (Pérez-Jiménez et al., 2011). Con estos ensayos, se

han comparado las respuestas de dos mezclas tipo SMA respecto al comportamiento de mezclas tipo semidensa, que se han tomado de referencia.

El ensayo Fénix se ha empleado fundamentalmente para evaluar el cambio de rigidez y ductilidad que experimenta la mezcla con la temperatura (20, 5, -5 y -15 °C) bajo cargas monotónicas. Es un ensayo en que se va aumentando de forma constante la deformación de la mezcla (ensayo monotónico) hasta su fractura. Este ensayo se ha aplicado para evaluar el comportamiento de la mezcla bajo tensiones térmicas, donde la deformación a que está sometida la mezcla va aumentando también de forma monotónica al descender la temperatura. Aunque la velocidad de ensayo aplicado 1 mm/min es mayor que la se produciría en el firme por tensiones térmicas, se trata de un ensayo que nos permite comparar la respuesta de unas mezclas frente a otras y, como se verá más adelante, a bajas temperaturas la respuesta de las mezclas es casi elástica y el efecto de la velocidad ya no tiene tanta importancia.

La resistencia de las mezclas tipo SMA a la fisuración bajo cargas cíclicas (fisuración por fatiga) se ha evaluado en primer lugar aplicando el ensayo convencional recogido en la normativa europea, de flexotracción a cuatro puntos. Este ensayo se ha realizado sólo a 20 °C y en él se ha comparado la respuesta de esta mezcla frente a otro tipo de mezclas convencionales. Este ensayo permite caracterizar la respuesta de las mezclas a fatiga para distintos niveles de deformación impuesta, ley de fatiga, pero resulta muy laborioso de hacer y requiere un tiempo demasiado largo de ensayo. Por ello, para tener una mayor información sobre la respuesta a fatiga de este tipo de mezclas y poder llevar a cabo este estudio a diferentes temperaturas (20, 5, -5 y -15 °C), en un periodo más corto de tiempo se ha recurrido al uso del ensayo EBADE, que es un ensayo cíclico de fatiga pero en el que se realiza un barrido de deformaciones. En este ensayo se determinan dos parámetros básicos que permiten evaluar la respuesta de las mezclas bajo cargas cíclicas: su módulo inicial antes de iniciar el proceso de deterioro y la deformación que provoca su fallo bajo pocas aplicaciones de carga (< 20.000).

2. Ensayo Fénix

El ensayo Fénix es un ensayo de tracción directa aplicado sobre una probeta semicilíndrica. El control del ensayo se

realiza por desplazamiento, fijando una velocidad de 1 mm/min. Las muestras pueden proceder de probetas cilíndricas tipo Marshall o de testigo extraídos del pavimento. En el presente estudio todas las muestras procedían de probetas tipo Marshall compactadas por impacto a 50 golpes por cara. En la cara plana se induce una pequeña entalla (alrededor de 6 mm de profundidad) y se adhieren unas placas metálicas mediante una resina epoxy. Estas placas metálicas, a su vez se ensamblan a la prensa de ensayo por medio de unos pasadores cilíndricos, que permiten que las placas puedan rotar ligeramente respecto al punto de sujeción, a medida que avanza el ensayo.

Los parámetros más importantes obtenidos en este ensayo son la energía de fractura (GF) y el índice de rigidez a tracción (IRT). El primero proporciona una medida de la ductilidad y la resistencia a la fisuración del material, mientras que el segundo está directamente relacionado con el módulo de rigidez. En las siguientes ecuaciones, se muestra el cálculo de ambos parámetros.

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

donde W_F es el trabajo de fractura y A_F el área transversal de la probeta.

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

donde F_{\max} es la carga máxima alcanzada en el ensayo en kN y Δ_m es el desplazamiento hasta el 50% de la carga máxima post-pico en mm.

3. Ensayo Ebade

El ensayo EBADE (Ensayo de Barrido de Deformaciones) [6] es un ensayo cíclico uniaxial de tracción-compresión sobre una probeta prismática. El control del ensayo se realiza por deformación, gracias a los extensómetros colocados a los lados de la probeta. El ensayo está compuesto por bloques o escalones de 5.000 ciclos, durante los cuales la amplitud de deformación se mantiene constante. La amplitud de deformación va aumentando de escalón en escalón un valor fijo.

En el primer escalón, la amplitud de deformación es $2.5E-5$, y aumenta cada 5.000 ciclos en el mismo valor. Así, en el segundo escalón se aplica una amplitud de deformación de $5.0E-5$, $7.25E-5$ en el tercero, $1E-4$ en el cuarto y así sucesivamente, hasta que se produce el fallo total de la probeta.

La probeta de ensayo se puede obtener de muestras cilíndricas o de muestras tipo placa. En el presente estudio, todas las muestras fueron talladas a partir de probetas tipo Marshall compactadas por impacto a 50 golpes por cara. La geometría de la probeta es prismática, de $6 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$, aproximadamente. Se realiza una entalla en dos de las caras opuestas de la probeta de cerca de 6 mm de profundidad, para favorecer la rotura por la sección media de la probeta.

Para el análisis de los resultados, se tiene en cuenta la evolución del módulo complejo y la densidad de energía disipada con el número de ciclos. La densidad de energía disipada es directamente proporcional al área del bucle tensión-de-



Figura 1. Ensayo Fénix.

El comportamiento a fisuración térmica y por fatiga de las mezclas SMA

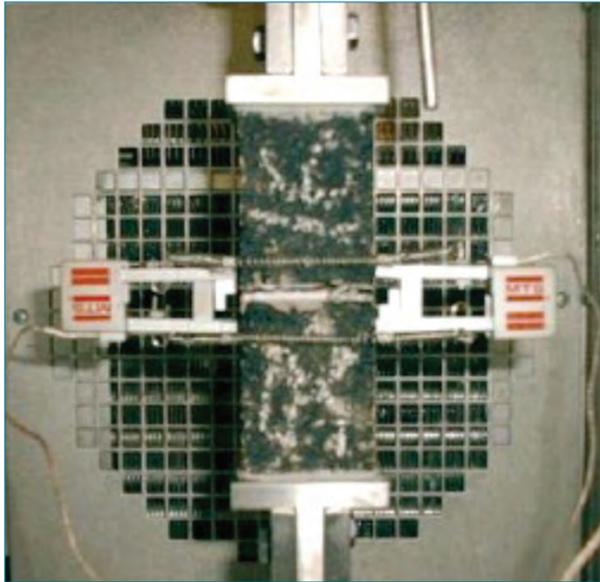


Figura 2: Ensayo EBADE.

formación registrado en cada ciclo. El fallo de la probeta se define en términos de este parámetro, definiendo una deformación de fallo como aquella en la cual la densidad de energía disipada disminuye por debajo del 50% del valor máximo alcanzado durante el ensayo.

4. Materiales de ensayo

Para la realización de este estudio, se emplearon dos mezclas tipo SMA. En las siguientes tablas se muestran las características de ambas.

Tabla 1: Características de la mezcla SMA 11.

Mezcla	SMA 11
Ligante	BM3-C
Árido Grueso	Ofita
Contenido Betún/Áridos (%)	6,0
Componentes % en mezcla	
0/4 Caliza	17,64%
5/8 Ofita	28,30%
8/12 Ofita	40,57%
Filler carbonato cálcico	7,83%
Betún	5,66%
Celulosa Viatop	0,3

Tabla 2: Características de la mezcla SMA 16.

Mezcla	SMA 16
Ligante	BC-35/50
Contenido Betún/Áridos (%)	5,7
Componentes % en mezcla	
Gravilla caliza 5/20 mm	66%
Arena caliza 0/5 mm	25,5%
Filler de aportación calizo	2,8%

Las diferencias más destacadas entre ambas mezclas fueron el tipo de ligante, tipo de árido grueso y la adición de fibras de celulosa a una de las mezclas.

5. Resultados Ensayo Fénix

La realización de los ensayos Fénix a diferentes temperaturas (20, 5, -5 y -15 °C) muestra el aumento de rigidez y la pérdida de ductilidad de las mezclas SMA con la temperatura. También muestra el efecto que tiene el tipo de betún empleado en su fabricación, así como la diferencia de comportamiento de estas mezclas respecto a las mezclas semidensas convencionales.

En las Figuras 3 y 4 se han representado los resultados obtenidos al ensayar las mezclas SMA con el betún BC 35/50 y con un betún BM3C. En ambos casos, se observa cómo la curva de rotura que es tendida al principio se convierten en más picuda, con una carga de rotura más alta y una deformación de rotura (la correspondiente a la carga máxima) más baja. También se observa que la variación del comportamiento de la mezcla SMA con el betún BC 35/50 tiene lugar principalmente entre 20 y 5 °C, también experimenta un cambio, aunque menor, entre 5 y -5 °C y apenas varía entre -5 y -15 °C.

La mezcla fabricada con el betún modificado BM3C presenta también esta fuerte variación de comportamiento con la temperatura, aunque presenta una mayor diferencia de comportamiento entre 5 y -15 °C que la fabricada con el betún mejorado con polvo de neumático. Esta mezcla presenta también una mayor energía de fractura, área bajo la curva, para las cuatro temperaturas ensayadas, así como una mayor deformación de rotura, lo que muestra el efecto de los betúnes modificados en el comportamiento de estas mezclas.

En la Figura 5 se puede ver la energía de fractura respecto al índice de rigidez a tracción IRT para las dos mezclas SMA

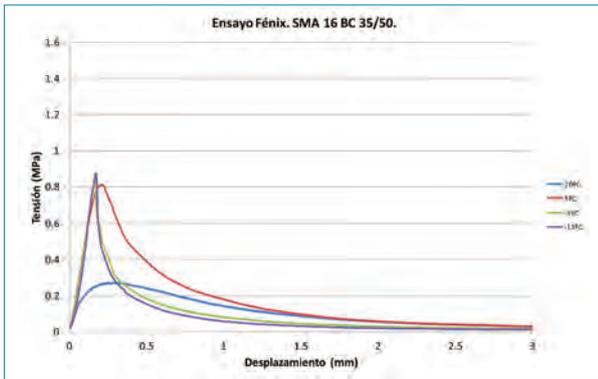


Figura 3: Curvas tensión-desplazamiento obtenidas en los ensayos Fénix para la mezcla SMA 16

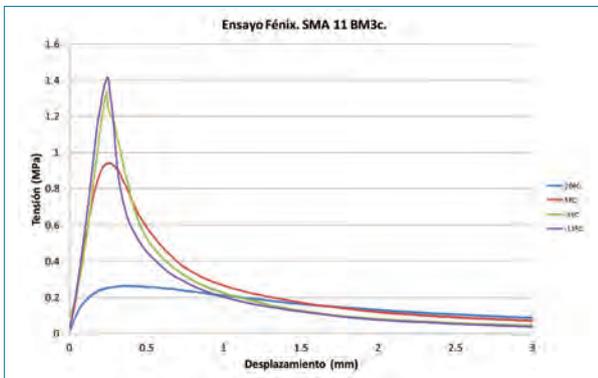


Figura 4: Curvas tensión-desplazamiento obtenidas en los ensayos Fénix para la mezcla SMA 11.

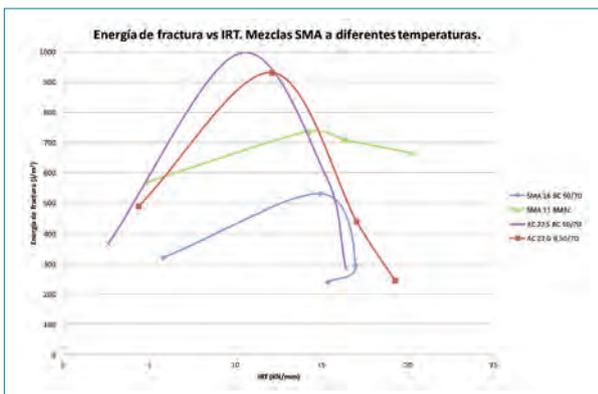


Figura 5: Energía de fractura vs IRT obtenidas en el ensayo Fénix de las mezclas SMA.

ensayadas y dos mezclas de granulometría tipo S fabricadas con un BC 50/70 y un betún B 50/70. Se observa que todas ellas tienen un máximo de la energía de fractura para la temperatura de 5 °C, donde se aprecia también que las mezclas tipo semidenso presentan una mayor energía de fractura. Para las temperaturas más bajas, la respuesta de todas las mez-

clas tiende a ser más parecido, salvo la mezcla SMA fabricada con el betún BM3C. Esta mezcla sigue manteniendo una mayor energía de fractura a temperaturas bajas, mientras que el resto de las mezclas experimentan una fuerte caída en su energía de rotura, presentando todos valores muy similares y con muy poca diferencia entre -5 y -15 °C.

6. Resultados ensayo de fatiga a flexotracción en cuatro puntos

Los ensayos de fatiga a flexotracción a 20 °C ponen de manifiesto la diferencia de comportamiento de estas mezclas respecto a las mezclas convencionales. Presentan, en general, un menor módulo dinámico y una mayor deformación de rotura. Esto hace que cuando se representan las leyes de fatiga en las mezclas SMA con mezclas convencionales, Figura 6, estas quedan por debajo. Además, hay que tener en cuenta que las mezclas tipo SMA se ha hecho el ensayo a una frecuencia de 30 HZ, establecido en este trabajo para este tipo de mezclas, y no a 10 Hz que es la frecuencia aplicada hasta ahora en el ensayo de las mezclas tipo AC22S, lo que incrementa su módulo y rebaja la deformación de fallo.

Por sí solas, estas leyes de fatiga no permiten establecer qué mezcla o formulación tiene mejor comportamiento en el firme respecto a la fisuración de fatiga, pues si por una parte son más dúctiles y para fisurarlas tenemos que llegar a un mayor nivel de deformación, al tener un menor módulo la deformación a que están sometidas en el firme, para el mismo espesor de capa y carga aplicada, será también mayor. El ensayo EBADE realizado a continuación sí nos va a permitir comparar la respuesta de las mezclas al obtener la relación entre el módulo y la deformación de rotura para las distintas mezclas ensayadas.

7. Resultados Ensayo EbaDe

El ensayo EBADE nos proporciona cómo va evolucionando el módulo de la mezcla con el nivel de deformación aplicada y con el número de ciclos. Cada 5.000 ciclos, hay un aumento del nivel de deformación aplicada. También se ha dibujado la evolución de la energía disipada, área dentro del bucle que dibuja el vector tensión-deformación en cada ciclo. En estos ensayos, se observa que el módulo se mantiene o baja al incrementar el escalón de carga. Se mantiene a bajas tempe-

El comportamiento a fisuración térmica y por fatiga de las mezclas SMA

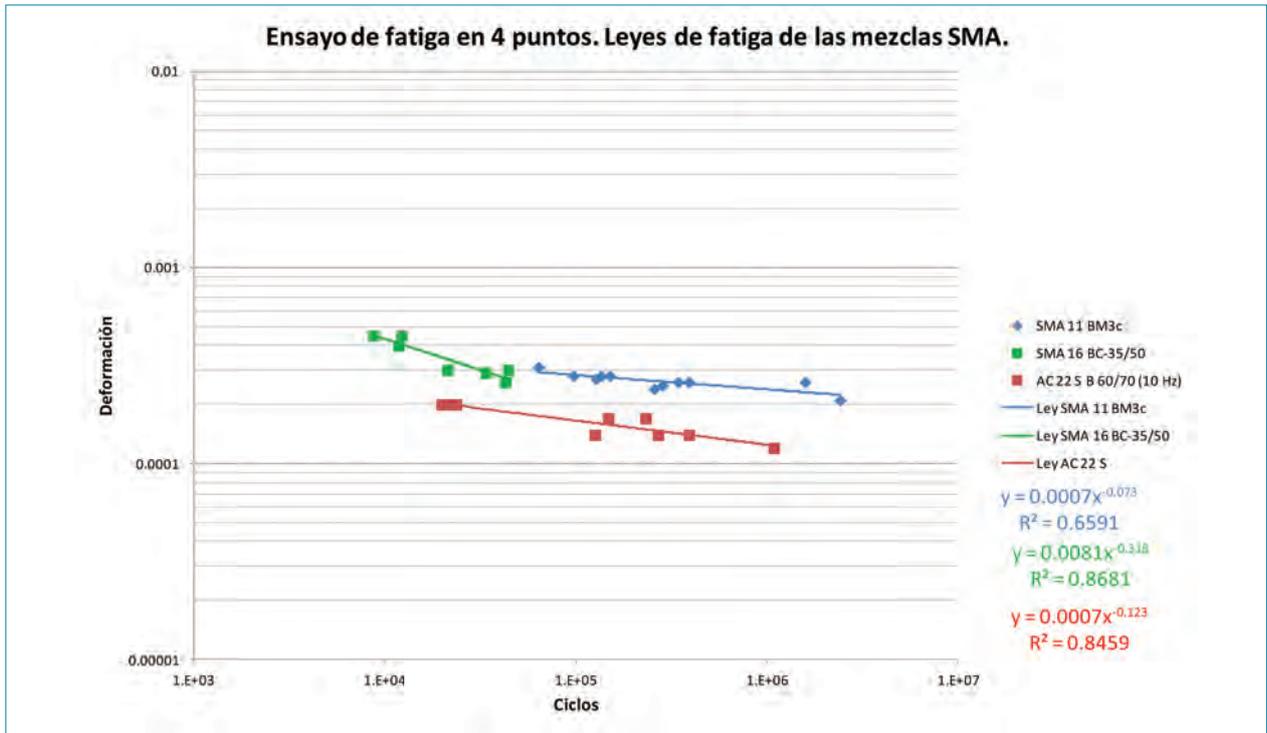


Figura 6: Leyes de fatiga de las mezclas SMA obtenidas a 20°C y 30 Hz.

raturas y baja cuando el ensayo se realiza a altas temperaturas, Figuras 7 y 8. Por el contrario, la energía disipada aumenta en cada escalón de deformación, más a las temperaturas altas, hasta llegar a un nivel máximo en el que comienza a decrecer, Figuras 9 y 10. Dentro de cada uno de los 5.000 ciclos en que se mantiene el nivel de deformación, ambas variables, módulo y energía, decrecen.

En este ensayo de fatiga, se ha establecido un fallo en el escalón de deformación en que la energía disipada decrece

por debajo del 50% de la máxima. En este escalón de deformación se ve que el deterioro de la mezcla se produce de una forma muy rápida y que su módulo y la carga aplicada en el ensayo se han reducido notablemente.

Al analizar la evolución de los módulos con la temperatura y ciclos de carga se observa que estos aumentan significativamente con la temperatura pasando de los 6.000-8.000 MPa, betún BM3-C y betún BC 35/50 a 20 °C, a los 22.000-25.000 MPa a 15 °C. También se observa, como se

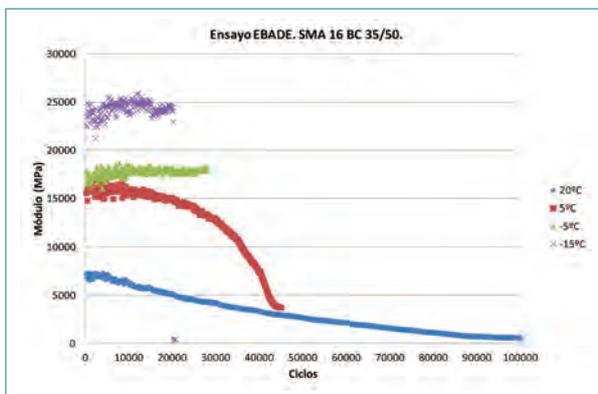


Figura 7: Evolución del módulo complejo con el número de ciclos para la mezcla SMA 16.

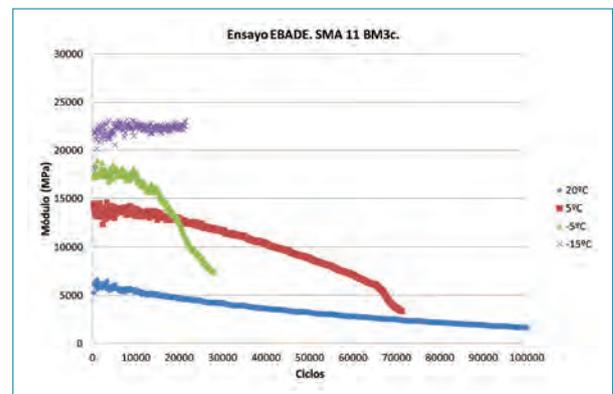


Figura 8: Evolución del módulo complejo con el número de ciclos para la mezcla SMA 11.

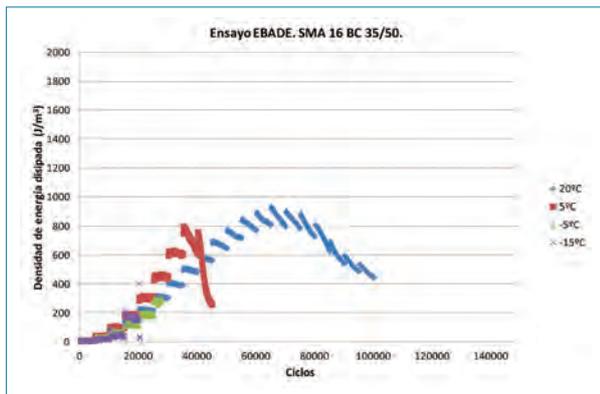


Figura 9: Evolución de la densidad de energía disipada con el número de ciclos para la mezcla SMA 16.

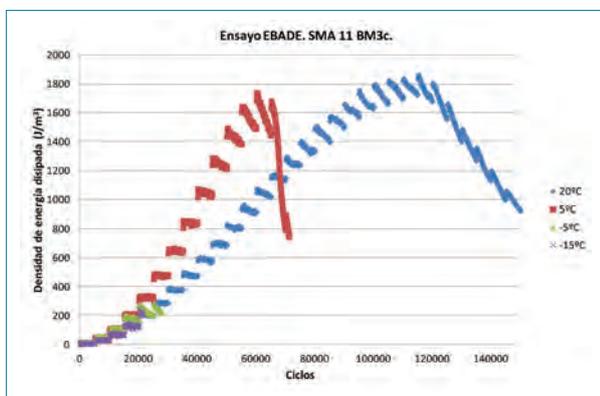


Figura 10: Evolución de la densidad de energía disipada con el número de ciclos para la mezcla SMA 11.

ha mencionado anteriormente, que el módulo se mantiene a bajas temperaturas prácticamente constante con el nivel de deformación y con el número de ciclos, lo que indicaría un comportamiento elástico-lineal de la mezcla.

Sin embargo, a las temperaturas altas, el módulo de la mezcla varía con el nivel de deformaciones y el número de ciclos sin que, a veces, se produzca deterioro de la mezcla, lo que indicaría un comportamiento visco-elástico no lineal, o tixotropía, del material ensayado.

Si se analiza ahora la evolución de la energía disipada, se aprecia claramente el efecto del ligante en el comportamiento de la mezcla. La mezcla fabricada con el betún modificado presenta unos mayores niveles de energía disipada y su rotura se produce a unos mayores niveles de deformación a altas temperaturas (5 y 20 °C). Sin embargo, a bajas temperaturas, las mezclas presentan un comportamiento más similar, con niveles de energía disipada bajos (comportamiento elástico) y deformación de rotura baja (fragilidad y pérdida de tenacidad).

8. Conclusiones

De los trabajos realizados se extraen las siguientes conclusiones:

- El comportamiento de las mezclas tipo SMA a temperaturas superiores a 5 °C es claramente mejor al de las mezclas convencionales. En particular, la mezcla SMA 11, fabricada con el ligante modificado con polímero y fibras, ha obtenido mejores resultados que la mezcla SMA 16, fabricada con un ligante mejorado con polvo de neumático.
- A temperaturas inferiores a los 0 °C, las mezclas SMA muestran comportamientos similares entre ellas y, a su vez, al de las mezclas convencionales.
- Las leyes de fatiga obtenidas para las mezclas SMA muestran su comportamiento más dúctil respecto a las mezclas convencionales de tipo semidensos, soportando un mayor número de ciclos de carga para una misma deformación impuesta.
- Los ensayos Fénix y EBADE facilitan la rápida evaluación de la resistencia a la fisuración térmica y de fatiga de las mezclas bituminosas en un amplio rango de temperaturas.

9. Referencias

- Brown, E.R. y H. Manglorkar. 1993. Evaluation of laboratory properties of SMA mixtures. Research Report, Work Sponsored by NAPA and the NAPA Education Foundation, NCAT Report No. 93-5.
- Brown, E.R., Rajib B., Mallick, J. E. Haddock y J. Bukowski. 1997. Performance of stone matrix asphalt (SMA) mixtures in the United States. Federal Highway Administration, NCAT Report No. 97-1.
- Pérez Jiménez, F. E.; Valdés, G.; Miró, R.; Martínez, A. y R. Botella. 2010. Fénix test: development of a new test procedure for evaluating cracking resistance in bituminous mixtures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2181: 36 – 43.
- Pérez-Jiménez, F. E.; Valdés, G.; Miró, R.; Botella, R. y J.M. Campana. 2011. Effect of thermal stresses on fatigue behavior in bituminous mixes. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2210: 90 -96.