

IAG209-01-2013
ENSAYO EBADE. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA
FISURACIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS
ENSAIO EBADE. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FISSURAÇÃO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS

Félix E. Pérez-Jiménez
Universidad Politécnica de Cataluña. BarcelonaTech
Barcelona, España
edmundoperez@upc.edu

Ramón Botella
Universidad Politécnica de Cataluña. BarcelonaTech
Barcelona, España
ramon.botella@upc.edu

Rodrigo Miró
Universidad Politécnica de Cataluña. BarcelonaTech
Barcelona, España
r.miro@upc.edu

Adriana Martínez
Universidad Politécnica de Cataluña. BarcelonaTech
Barcelona, España
adriana.martinez@upc.edu

Resumen

La fisuración por fatiga es uno de los procesos de deterioro más frecuentes e importantes que tienen lugar en los firmes flexibles. Para evaluar la resistencia a fatiga que tienen las mezclas bituminosas que componen estos pavimentos se realizan ensayos de larga duración que requieren un equipamiento específico. Por esta razón algunos investigadores están estudiando procedimientos alternativos más sencillos de implementar y que reduzcan el tiempo de ensayo. El ensayo EBADE (Ensayo de BArrido de DEformaciones) es un ensayo cíclico de tracción-compresión a deformación controlada sobre probetas prismáticas, desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña-BarcelonaTech, en el que progresivamente se va aumentando el nivel de deformación impuesto, permitiendo evaluar el proceso de deterioro de la mezcla bituminosa, a distintos niveles de deformación, hasta llegar a su rotura. En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación del ensayo EBADE para analizar el efecto de la temperatura en la respuesta a la fisuración por fatiga de mezclas densas fabricadas con diferentes tipos de betunes, a partir de la variación del módulo y de la deformación de rotura, así como de la energía disipada con la temperatura. Estos resultados muestran claramente la diferencia entre el comportamiento de la mezcla fabricada con un betún modificado con polímeros, respecto a la misma mezcla fabricada con betunes convencionales.

Resumo

A fissuração por fadiga é um dos processos de deterioro mais frequentes e importantes que ocorrem nos pavimentos flexíveis. Para avaliar a resistência à fadiga dos pavimentos asfálticos se realizam testes de longa duração que requerem equipamentos especiais. Por esta razão, alguns pesquisadores estão estudando procedimentos alternativos mais fácil de implementar e reduzir o tempo de ensaio. O teste EBADE (Teste de Varredura de Deformações) é um teste cíclico de tração-compressão com deformação controlada de amostras prismáticas, desenvolvido no Laboratório de Estradas da Universidad Politécnica de Cataluña-BarcelonaTech, no qual se aumenta progressivamente o nível de deformação imposta, permitindo avaliar o deterioro do material betuminoso em distintos níveis de deformação, até sua ruptura. Este documento apresenta os resultados da aplicação do ensaio EBADE para analisar o efeito da temperatura na resposta à fadiga do concreto asfáltico fabricado com diferentes tipos de asfalto, a partir da variação do módulo de elasticidade, da deformação de ruptura e da energia dissipada com a temperatura. Estes resultados mostram claramente a diferença de comportamento do concreto asfáltico fabricado com asfalto modificado com polímero, relativamente aos mesmos produzidos com asfalto convencional.

INTRODUCCIÓN

Entre los deterioros más habituales que sufre el firme de una carretera está la fisuración por fatiga de las capas de mezcla bituminosa. Sin embargo, es poco frecuente tener en cuenta la propiedad correspondiente, la resistencia a la fatiga, durante el diseño de las mezclas debido a la complejidad de los ensayos que deben realizarse y al tiempo que demandan. Es por ello que en los cálculos de dimensionamiento de firmes se suele recurrir a leyes de fatiga estandarizadas, que pueden diferir significativamente de la de la mezcla diseñada que se va a construir.

Otro aspecto que merece especial atención es la temperatura a la que se realiza el ensayo, comúnmente establecida en 20°C. De este modo se evalúa el comportamiento de las mezclas sin tener en cuenta el efecto de las altas y/o bajas temperaturas (Pérez-Jiménez et al, 2011).

Aunque existen muchos enfoques sobre cómo analizar el comportamiento a fatiga en mezclas bituminosas sometidas a la acción repetida de tensiones inducidas por las cargas del tráfico (Di Benedetto et al, 2003), el proceso de fatiga acaba con la fisuración y la posterior propagación de las fisuras a través del material. Dos son los parámetros fundamentales que gobiernan este comportamiento: la rigidez del material, que permite absorber mayor o menor cantidad de tensión, y su ductilidad o deformación a la que rompe. Por tanto, a partir del módulo y el nivel de deformación al que se produce la rotura de la mezcla, es posible conocer la mejor o peor respuesta de la mezcla frente al efecto de las cargas repetidas, su comportamiento a fatiga.

En este sentido, en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña-BarcelonaTech se ha desarrollado un nuevo ensayo para caracterizar el comportamiento a fatiga, tanto de mezclas bituminosas como de betunes (Pérez-Jiménez et al, 2013, 2012, 2011; Botella et al, 2012), a partir de estos dos parámetros, que puede aplicarse a diferentes temperaturas.

El estudio que se presenta en este artículo describe el análisis del efecto de 4 betunes diferentes (dos convencionales, uno modificado con polímeros y otro con polvo de neumáticos) sobre la resistencia a fatiga de una mezcla bituminosa de tipo denso a diferentes temperaturas: 20, 5 y -5°C.

ENSAYO EBADE

El ensayo EBADE es un ensayo cíclico de tracción-compresión a deformación controlada, aplicado sobre probetas prismáticas de 5 cm de lado por 6 cm de altura, en las que se practica una entalla para inducir su rotura. Durante el ensayo se va aumentando el nivel de deformaciones impuesto; cada nivel de deformación es mantenido durante un número constante de ciclos, lo que permite analizar el proceso de deterioro de la mezcla bituminosa a distintos niveles de deformación hasta llegar a su rotura, Figura 1.

En particular, el ensayo EBADE se realiza aplicando sucesivos escalones de deformación cada 5000 ciclos, a una frecuencia de aplicación de carga de 10 Hz. Para el primer escalón se ha fijado una amplitud de deformación de $2.5 \cdot 10^{-5}$, que se va aumentando en incrementos de $2.5 \cdot 10^{-5}$ hasta llegar a la rotura del material. Como criterio de fallo por fatiga de la mezcla se ha establecido el nivel de deformación en el que la máxima energía disipada por ciclo se reduce a la mitad. La energía disipada va aumentando con el nivel de deformación hasta que se inicia el fallo del material, momento en que decrece rápidamente.

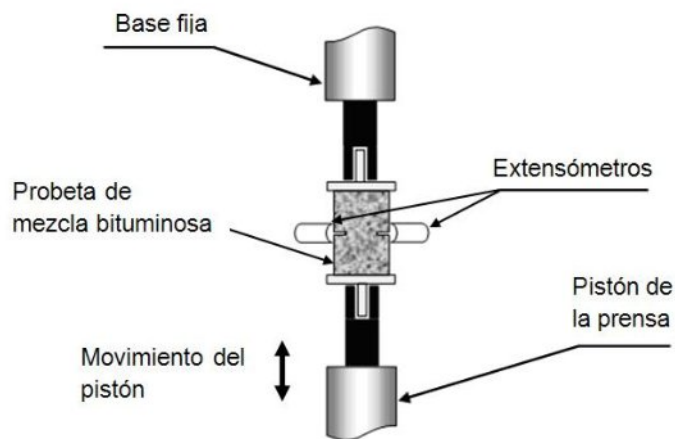


Figura 1: Fotografía y esquema del ensayo EBADE

Durante el ensayo se determinan los siguientes parámetros de la mezcla:

Tensión:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

donde **F** es la fuerza registrada y **S** la superficie de fractura.

Módulo complejo:

$$E^* = \frac{\sigma_{\max}}{\varepsilon_{\max}}, \quad (2)$$

donde σ_{\max} es la semiamplitud de la tensión registrada en un ciclo y ε_{\max} es la semiamplitud de la deformación impuesta.

Densidad de energía disipada:

$$E_D = \frac{g}{S} \cdot \frac{1}{2} |(\sigma_1 \varepsilon_2 + \sigma_2 \varepsilon_3 + \dots + \sigma_{n-1} \varepsilon_n + \sigma_n \varepsilon_1) - (\sigma_2 \varepsilon_1 + \sigma_3 \varepsilon_2 + \dots + \sigma_n \varepsilon_{n-1} + \sigma_1 \varepsilon_n)|, \quad (3)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, S la superficie de fractura y σ_i y ϵ_i los n valores de la tensión y la deformación obtenidos a lo largo de un ciclo.

La densidad de energía disipada aumenta con el nivel de deformación impuesta. Para un mismo nivel de deformación la densidad de energía disipada disminuye con el número de ciclos aunque esta variación depende del nivel de deformación. A bajos niveles de deformación, solo se pierde energía al principio de los ciclos y después permanece constante, mientras que a altos niveles de deformación la pérdida de energía tiene lugar a lo largo de todo el ciclo. La pérdida de energía a bajos niveles de deformación se debe, en su mayor parte, a la tixotropía y al comportamiento viscoelástico del material y apenas existe daño (Pérez-Jiménez et al, 2012).

TRABAJO DESARROLLADO

Se ha seleccionado una mezcla de tipo denso y tamaño máximo 16 mm, con una granulometría ajustada al huso AC16D (artículo 542, PG-3) establecido en la normativa española, que a su vez cumpla con los puntos de paso y la zona restringida de las especificaciones *Superpave*, fabricada a partir de 4 betunes diferentes: dos betunes de la misma penetración pero distinta procedencia (B 50/70), un betún modificado con polímeros (BM-3c) y un betún mejorado con polvo de neumático fuera de uso (BC 35/50), utilizando un mismo contenido de ligante en todos los casos (5.0% s.m.). Sobre las cuatro mezclas resultantes, se aplicará el ensayo EBADE a tres temperaturas: 20, 5 y -5 °C.

En la Figura 2 se puede apreciar la granulometría de los áridos seleccionada. En la Tabla 1 se presentan las características de los ligantes estudiados.

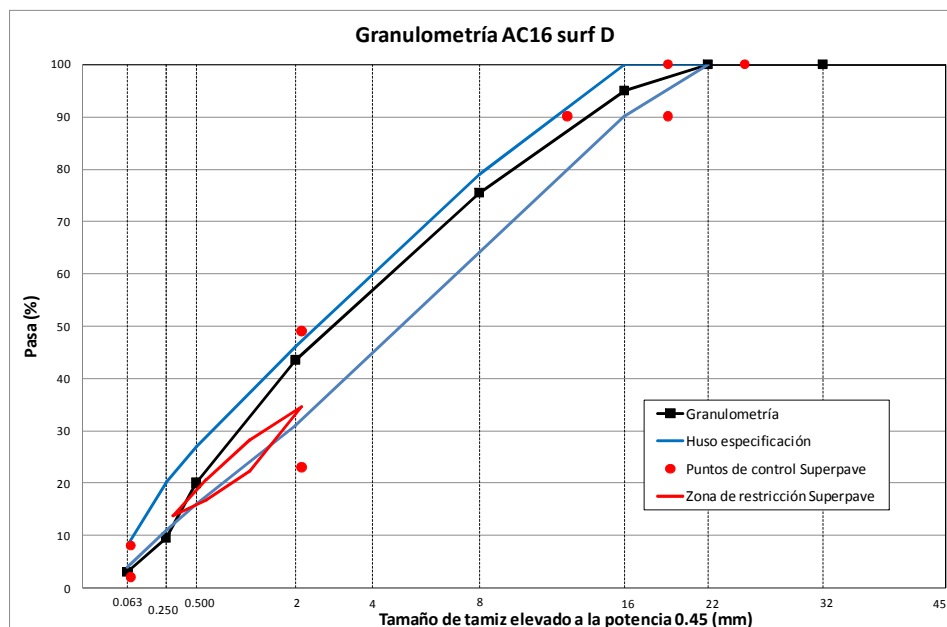


Figura 2: Granulometría de la mezcla utilizada

El tipo de árido utilizado en la fabricación de las mezclas bituminosas es de naturaleza caliza; el filler es también de naturaleza caliza y proviene del polvo de estos mismos áridos.

Para cada tipo de mezcla se ha fabricado una serie de probetas tipo Marshall, compactadas con 75 golpes por cara. Cada probeta, una vez fabricada, se corta para darle la forma

prismática (sección de 5x5 cm² y altura de unos 6 cm), realizando las dos entallas en la zona central con objeto de reducir el área de la probeta e inducir la rotura en esa sección. Se han ensayado 3 probetas por mezcla y condición de ensayo.

Tabla 1: Especificaciones de los betunes utilizados

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	B 50/70 (1)	B 50/70 (2)	Bm3c	BC 35/50
<i>Penetración a 25°C</i>	0,1mm	EN 1426	59	68	67	50
<i>Punto de Reblandecimiento</i>	°C	EN 1427	50.2	49.4	65.8	61.8
<i>Punto Fragilidad Fraass</i>	°C	EN 12593	-11	-11	-17	-16
<i>Recuperación elástica a 25°C</i>	%	EN 13398			88	59
Resistencia al envejecimiento						
<i>Variación de masa</i>	%	EN 12607-1	0.02	0.07	0.04	0.07
<i>Penetración retenida</i>	%	EN 1426	62	59	68	66
<i>Incremento punto de reblandecimiento</i>	°C	EN 1427	7.0	7.2	4.4	7.7

En las Figuras 3, 4 y 5 se muestra, a modo de ejemplo, la evolución de la tensión, el módulo y la energía disipada respectivamente, a la temperatura de 20°C, para las 4 mezclas consideradas, en función del número de ciclos.

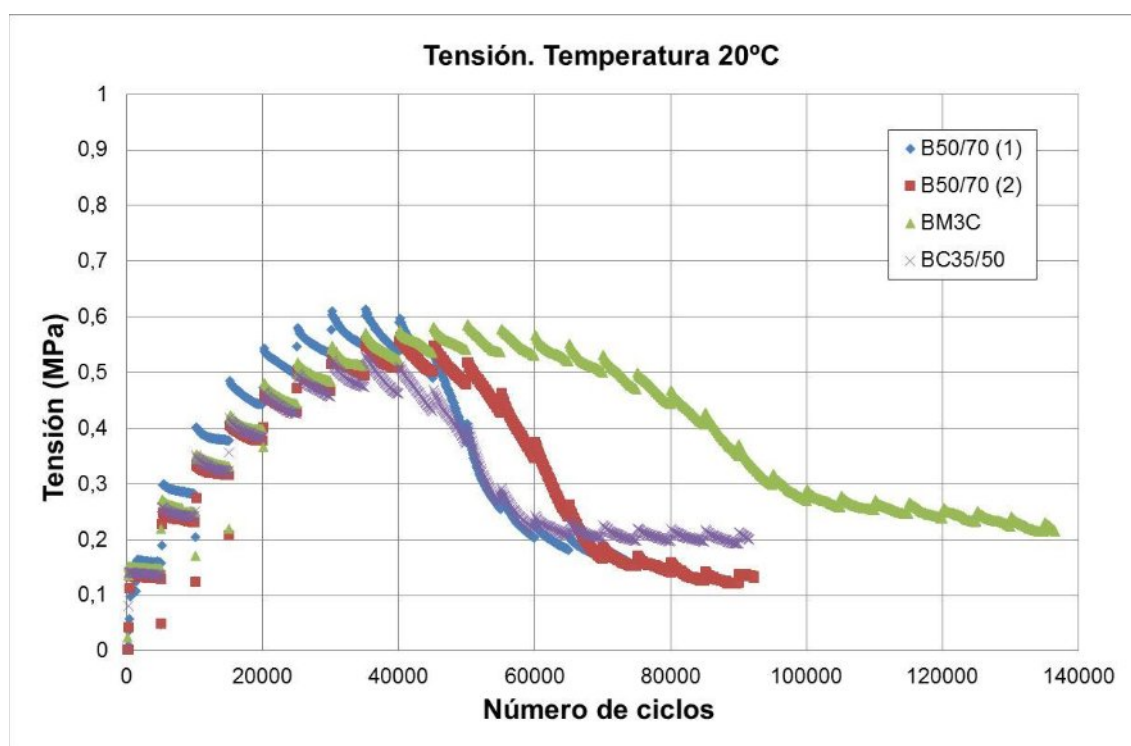


Figura 3: Evolución de la tensión registrada con el número de ciclos para las diferentes mezclas, a la temperatura 20°C

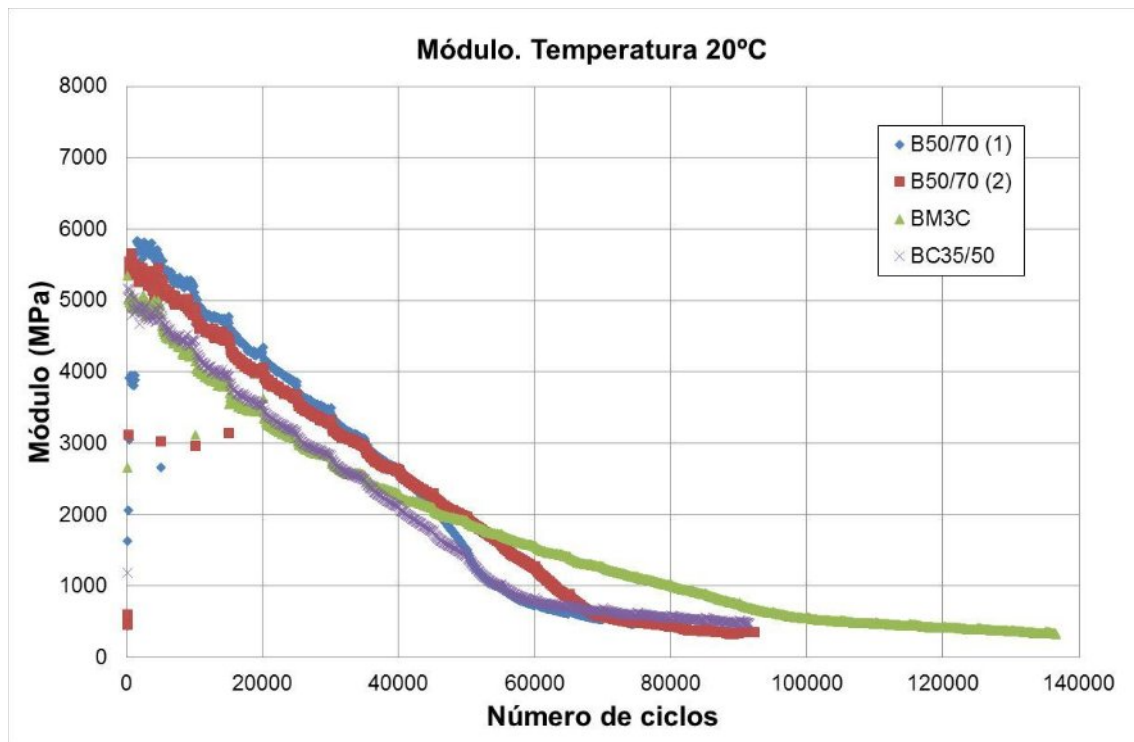


Figura 4: Evolución del módulo con el número de ciclos para las diferentes mezclas, a la temperatura 20°C

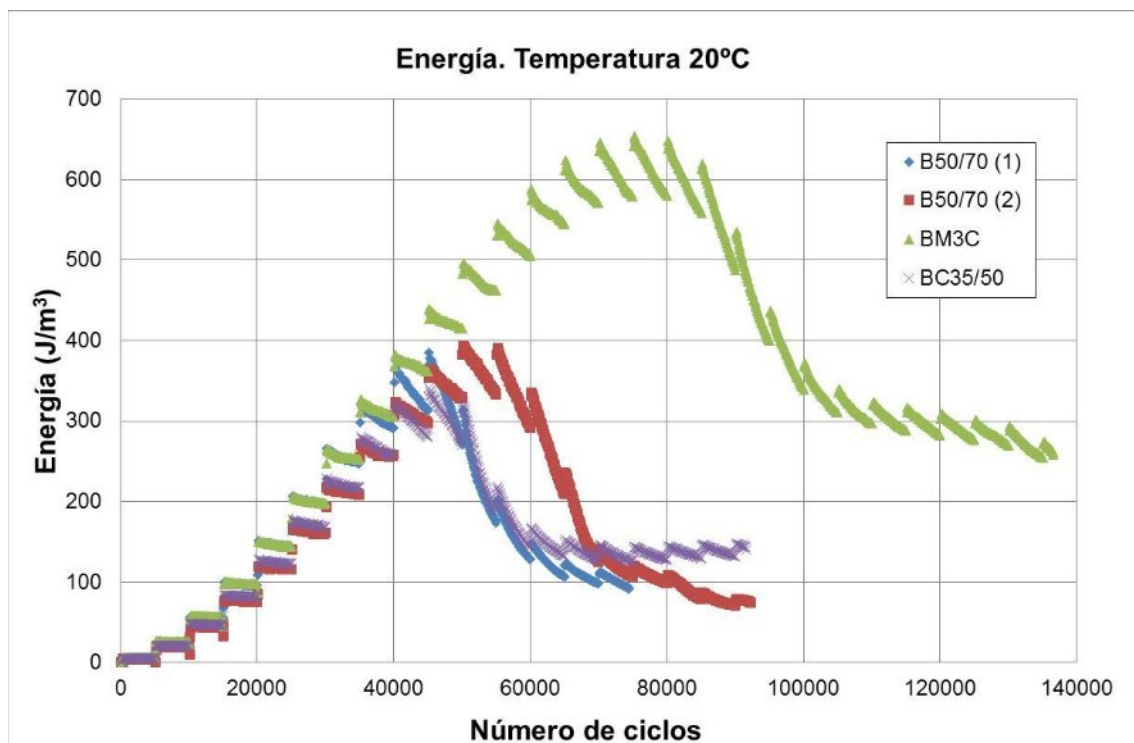


Figura 5: Evolución de la energía disipada con el número de ciclos para las diferentes mezclas, a la temperatura 20°C

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Figura 6 muestra la variación del módulo inicial con la temperatura y permite observar que las mezclas con los 4 betunes tienen módulos similares para las tres temperaturas, con una

variación significativa entre 20 y -5°C, donde el módulo se multiplica por 4 aproximadamente.

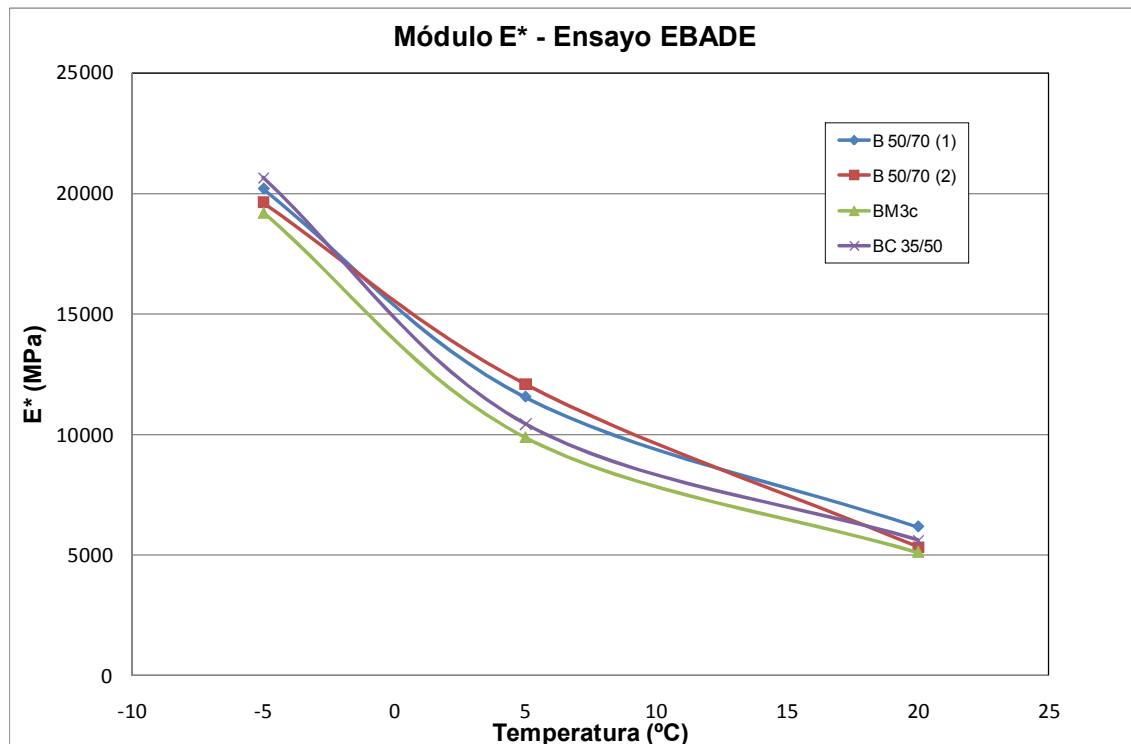


Figura 6: Variación del módulo inicial con la temperatura

La variación de la densidad de energía disipada acumulada con la temperatura se representa en la Figura 7. Los resultados muestran que los valores de energía para la mezcla con el betón BM3c a 20°C y a 5°C son altos, pero a -5°C se aproximan a los de las mezclas con betunes convencionales. Por otro lado, la mezcla con betún-caucho BC35/50 exhibe menor energía disipada a -5°C y a 20°C.

En la Figura 8 se recogen los resultados del módulo, deformación de fallo y deformación a la tensión máxima para las tres temperaturas. A 20°C el módulo de la mezcla con betún BM3c es similar al de las otras tres mezclas mientras que la deformación a tensión máxima y la deformación de fallo son mucho mayores. Este comportamiento indica que la mezcla con betún BM3c es más tenaz y tiene mayor nivel de deformación, es decir, es capaz de soportar mayores esfuerzos y liberar mayor energía hasta el fallo.

A medida que la temperatura decrece, el modulo inicial aumenta y la deformación de fallo disminuye para todas las mezclas; a -5°C la deformación de fallo y la deformación a tensión máxima son muy similares. La mezcla con betún BC 35/50 tiene un comportamiento más frágil, especialmente a -5°C. Estos resultados muestran la capacidad de ensayos como el EBADE para evaluar la resistencia a fisuración por fatiga, ya que permite obtener 2 parámetros que caracterizan el fallo por fatiga: el módulo y la diferencia entre la deformación de fallo y la deformación a tensión máxima en un amplio rango de temperaturas. De este modo es posible apreciar los cambios en las características de la mezcla fabricada con diferentes betunes.

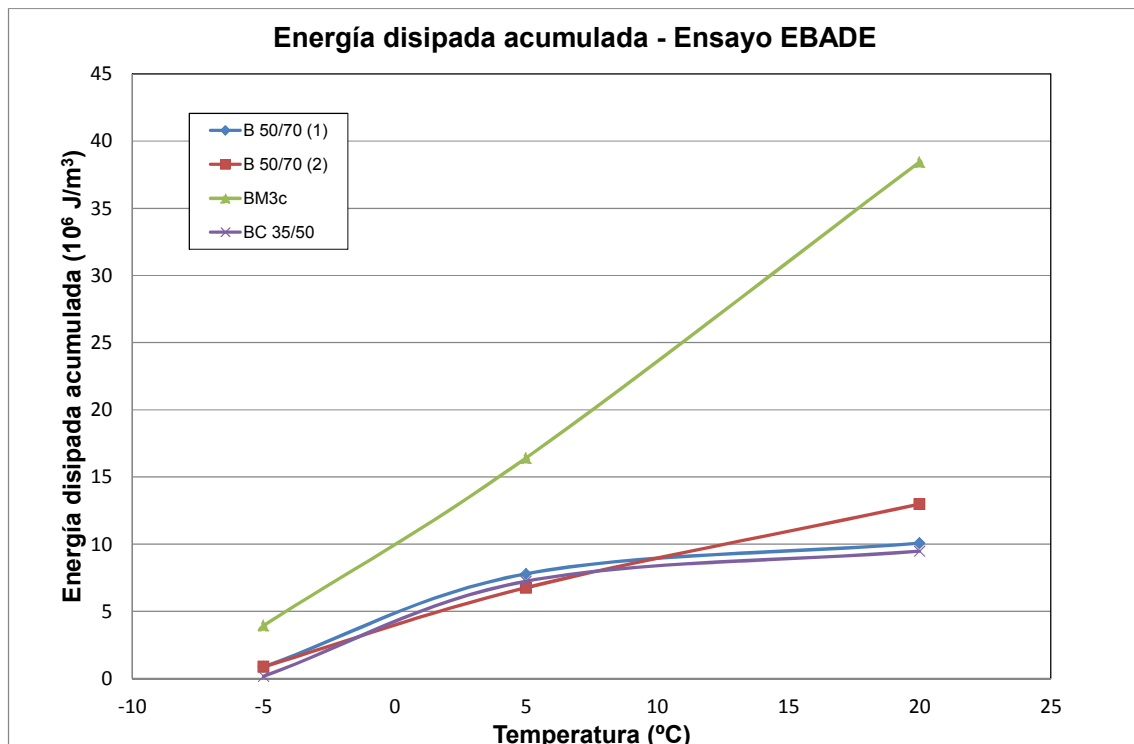


Figura 7: Variación de la densidad de energía disipada con la temperatura

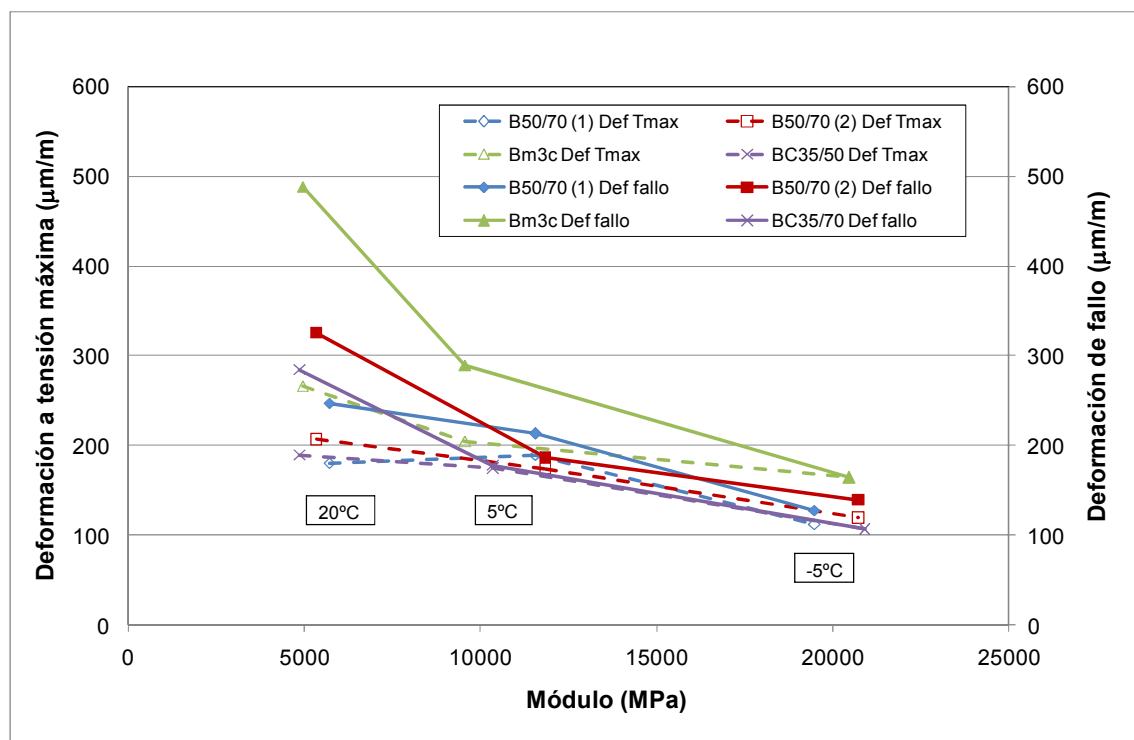


Figura 8: Deformación de fallo y deformación a tensión máxima vs módulo

Con el ensayo EBADE se puede obtener un conjunto de curvas de identidad, que muestran las diferencias en el comportamiento de las mezclas con la temperatura a través de la variación de la densidad de energía acumulada en función del módulo, Figura 9.

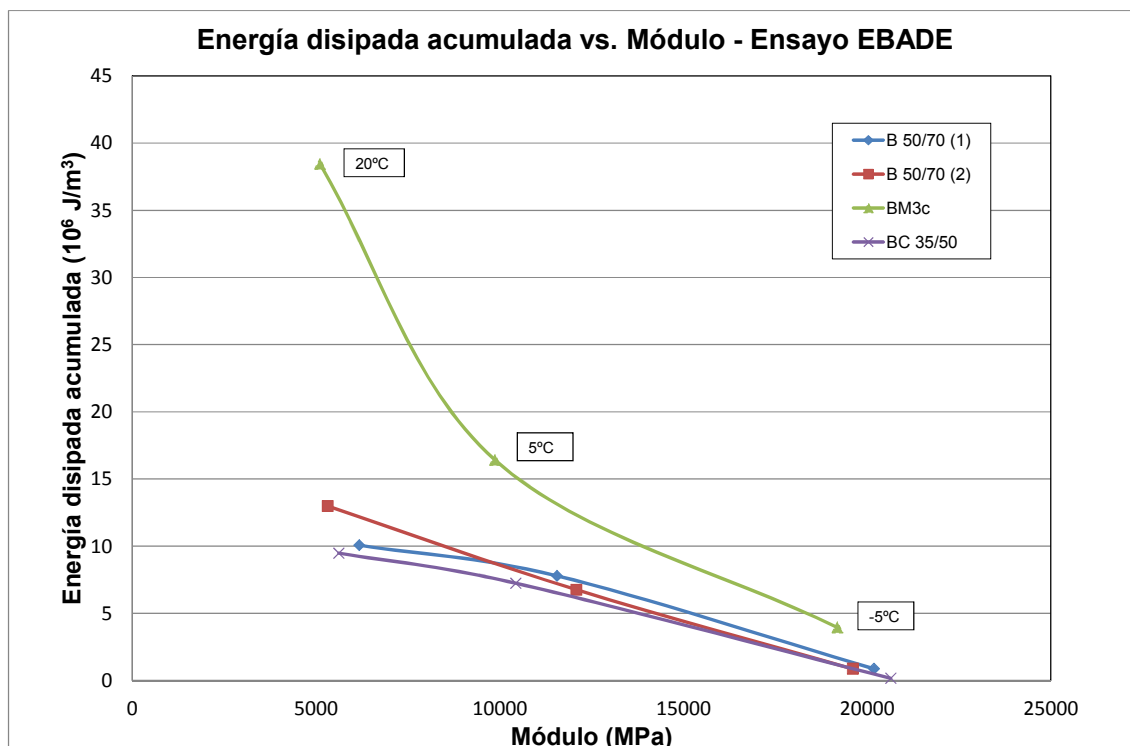


Figura 9: Variación de la densidad de energía disipada acumulada con el módulo

En este caso, las curvas confirman las conclusiones obtenidas al comparar la deformación de fallo con la deformación a tensión máxima, Figura 8, ya que la mezcla con BM3c disipa más energía para romper que las otras mezclas, sobre todo a 20°C y a 5°C, mientras que las otras mezclas tienden a comportarse del mismo modo.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos han permitido confirmar la utilidad del ensayo EBADE para evaluar el efecto de la temperatura sobre el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas de una manera más sencilla que si se utilizan los ensayos convencionales a flexotracción.

El ensayo EBADE permite obtener 2 parámetros que caracterizan el fallo por fatiga: el módulo y la diferencia entre la deformación de fallo y la deformación a tensión máxima en un amplio rango de temperaturas.

Con este ensayo también se puede obtener un conjunto de curvas de identidad, que muestran las diferencias en el comportamiento de las mezclas con la temperatura a través de la variación de la densidad de energía acumulada en función del módulo.

Para las mezclas analizadas en este estudio se ha observado que la mezcla elaborada con betún modificado con polímeros, BM3c, ha mostrado más ductilidad que las otras mezclas a lo largo de todo el rango de temperaturas (desde 20 a -5°C).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad la ayuda recibida para la realización del Proyecto PROFIS (BIA2012-36508), en el marco del VI Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica, cofinanciado con fondos

FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional) de la Unión Europea, así como a la empresa REPSOL por el suministro y caracterización de los betunes analizados.

REFERENCIAS

- Botella, R., Pérez-Jiménez, F., Miró, R. (2012). Application of a Strain Sweep Test to Assess Fatigue Behavior of Asphalt Binders. *Construction and Building Materials*, Vol. 36, p. 906-912.
- Di Benedetto H., de La Roche C., Baaj H., Pronk A. Fatigue of Bituminous Mixtures: Different Approaches and RILEM Group Contribution. Sixth International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurich, 14-16 de Abril de 2003.
- Pérez-Jiménez, F.; Botella, R.; Miró, R.; Martínez, A. Estimating the Fatigue Law of Asphalt Mixtures Using a Strain Sweep Test (EBADE Test). 5th EATA Conference. Braunschweig, 3-5 de Junio de 2013.
- Pérez-Jiménez, F.; Botella, R.; Miró, R. (2012). Damage and Thixotropy in Asphalt Mixture and Binder Fatigue Tests. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Volumen 2293, p. 8-17.
- Pérez-Jiménez, F.; Valdés, G.; Botella, R.; Miró, R.; Martínez, A. (2011). EBADE procedure: A new method to asses fatigue behaviour of asphalt mixtures. *Revista de la Construcción*, 10, p. 455-465.
- Pérez-Jiménez, F.; Miró Recasens, R.; Martínez, A.; Botella, R.; Valdés, G. Evaluación del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas mediante ensayos de fractura (FENIX) y cíclicos de barrido de deformaciones (EBADE). XVI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Rio de Janeiro, 20-25 de Noviembre de 2011.