

*EBADE procedure: A new  
method to asses fatigue  
behaviour of asphalt  
mixtures.*

# Evaluación del proceso de fatiga de mezclas asfálticas mediante un nuevo procedimiento cíclico de barrido de deformaciones - EBADE.



## **Autores**

- PÉREZ-JIMÉNEZ, F.** Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio  
Universidad Politécnica de Cataluña - Barcelona - España  
edmundo.perez@upc.edu
- VALDÉS, G.** Departamento de Ingeniería de Obras Civiles  
Universidad de La Frontera - Temuco - Chile  
gvaldes@ufro.cl
- BOTELLA, R.** Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio  
Universidad Politécnica de Cataluña - Barcelona - España  
ramon.botella@upc.edu,
- MIRÓ, R.** Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio  
Universidad Politécnica de Cataluña - Barcelona - España  
r.miro@upc.edu
- MARTÍNEZ, A.** Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio  
Universidad Politécnica de Cataluña - Barcelona - España  
adriana.martinez@upc.edu

**Fecha de recepción** 15/1/2011  
**Fecha de aceptación** 6/7/2011

## Resumen

En este artículo se presenta un nuevo procedimiento experimental, de rápida ejecución, para caracterizar la respuesta al fallo por fatiga de las mezclas asfálticas, el procedimiento EBADE. Su desarrollo se ha realizado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, y su metodología consiste en aplicar a probetas prismáticas de mezcla asfáltica series de ciclos de carga de tensión-compresión a distintos niveles de deformación, los cuales aumentan gradualmente hasta producir el fallo por fatiga de la mezcla. Este procedimiento permite caracterizar las mezclas asfálticas por medio de la obtención de los dos niveles de deformación relacionados directamente con el

comportamiento a fatiga de las mezclas: el nivel de deformación debajo del cual la mezcla asfáltica no sufre deterioro y el nivel de deformación en el que tiene lugar la rápida propagación del fallo por fatiga. A su vez, el procedimiento EBADE permite simular el proceso de fatiga de las mezclas asfálticas cuando estas están bajo estados tensionales producto de las variaciones térmicas. En este trabajo de investigación se da a conocer, tanto la metodología del procedimiento EBADE, como los resultados y principales conclusiones del estudio experimental llevado a cabo para demostrar la sensibilidad y ventajas del procedimiento propuesto.

**Palabras clave:** Mezclas asfálticas, fatiga, fisuración.

## Abstract

*This paper presents a new experimental procedure to characterize fatigue behaviour of asphalt mixtures, called EBADE procedure. It has been developed at the Road Research Laboratory based in the Technical University of Catalonia (UPC-Barcelona Tech). The procedure consists of applying cyclic tension-compression loads in a displacement-controlled uniaxial test at different strain levels. By doing so it is possible to obtain two key strain values in the characterization of asphalt mixtures fatigue behaviour. Those are the strain*

*level at which the mixture does not undergo fatigue (endurance limit) and the strain level at which critical fatigue failure takes place. In addition, EBADE procedure allows one to emulate the fatigue process a pavement goes through when it has to sustain thermal stresses. In this paper the EBADE procedure is detailed, and the main results and conclusions obtained in the experimental study carried out in order to evaluate its sensitivity are exposed.*

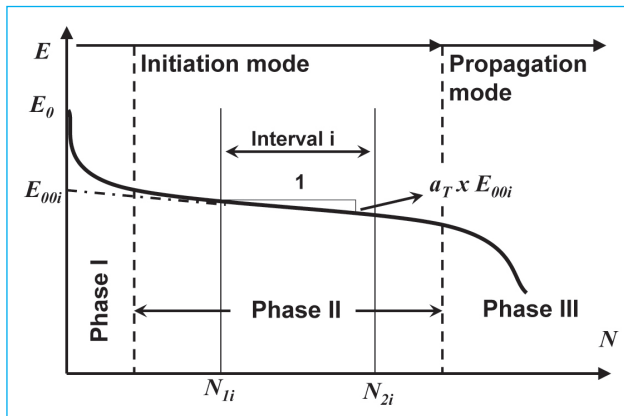
**Key words:** Asphalt mixtures, fatigue, cracking.

## 1. Introducción

La fisuración por fatiga de las capas de mezcla asfáltica es uno de los mecanismos de deterioro más frecuentes en los pavimentos flexibles. En ingeniería, y en especial, el fenómeno de fatiga está asociado al deterioro que se produce en un material a consecuencia de la aplicación de cargas repetidas con una magnitud muy inferior a la resistencia máxima que puede soportar el material. En el caso de los pavimentos asfálticos, la repetición de las cargas producidas por el tráfico, junto con las tensiones térmicas debido a las variaciones de temperatura, van dando lugar a la progresiva fisuración y rotura de las capas de mezcla asfáltica de la estructura de pavimento.

En un análisis descriptivo, Baaj y Di Benedetto (2005), señalan que el proceso de degradación de fatiga de una mezcla, se puede establecer en tres etapas o fases, figura 1. La fase I, también llamada fase de adaptación, se caracteriza por el inicio de la microfisuración, produciéndose un descenso rápido del módulo dinámico. La fase II, llamada también fase de fatiga, se caracteriza por el rol más preponderante que toma el deterioro por fatiga en la evolución del daño de la mezcla, apareciendo en esta las macrofisuras producto de la unión de las microfisuras generadas en la fase anterior. Finalmente se encuentra la fase III, o fase de ruptura, en la cual las macrofisuras progresan rápidamente hasta el fallo total de la mezcla.

**Figura 1.** Fases de degradación por el fenómeno de fatiga en mezclas asfálticas  
(Fuente: Baaj y Di Benedetto, 2005)



Este comportamiento de las mezclas asfálticas, que

busca representar el tipo de esfuerzos al que está sometida la estructura del pavimento, es el que normalmente se reproduce en el laboratorio por métodos estandarizados de larga ejecución, cuando se ensayan diferentes tipos de probetas a flexión a dos, tres y cuatro puntos de apoyo, figura 2. En estos ensayos se someten probetas a una serie de cargas cíclicas, en la que se mantiene constante la tensión, la deformación o el desplazamiento aplicado, hasta que se produce el fallo de la mezcla.

**Figura 2** Procedimientos para determinar el comportamiento a fatiga en mezclas asfálticas  
(Fuente: Di Benedetto et al., 2003)



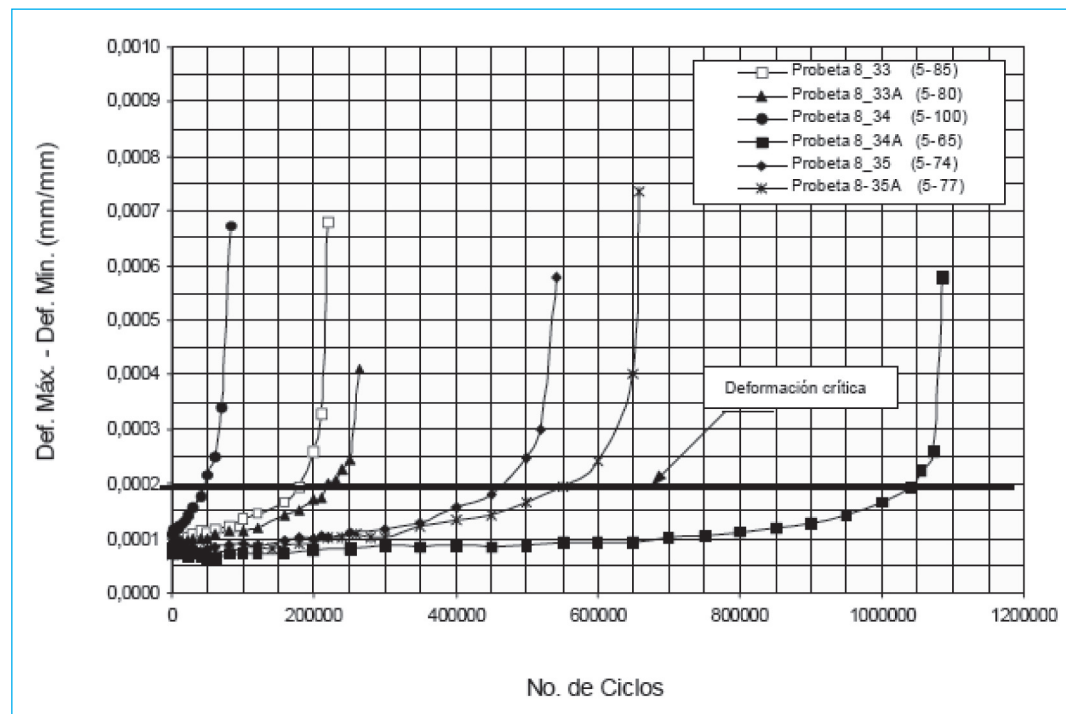
En este contexto, los ensayos de flexotracción a deformación o desplazamiento constante, que son los normalmente recomendados en las normas de ensayo para la determinación de esta propiedad de la mezcla, presentan el inconveniente de proporcionar resultados erróneos cuando se ensayan mezclas muy flexibles, ya sea, fabricadas con un alto contenido de ligante asfáltico, o bien, con ligantes modificados. Estas mezclas, en un ensayo de fatiga a flexotracción, van perdiendo carga, llegando hasta un 50% de su carga inicial, que es considerada como el límite de fallo por fatiga, pero dada su flexibilidad, están muy lejos de su fisuración por fatiga, y puede ocurrir que solo se haya producido un reacondicionamiento y readaptación de los materiales dentro de la mezcla, (Pérez et al., 2009).

También se ha observado que, cuando se aplica este tipo de ensayo en la determinación de las leyes de fatiga en las mezclas asfálticas, el fallo por fatiga, se produce en el mismo nivel de deformaciones, con independencia de la tensión aplicada, figura 3. Existe para cada mezcla un nivel de deformaciones para el cual se produce su fallo por fatiga, es decir, la deformación a la que es preciso llegar para que falle la probeta. Esta deformación sería también la aplicada a la mezcla para producir su fallo en muy pocas aplicaciones de carga (Pérez *et al.*, 2005).

Por otra parte, en el pavimento puede haber también tensiones térmicas residuales que pueden colaborar en el proceso de fatiga. Estas tensiones pueden produ-

cirse especialmente en las capas superiores del firme debido a las variaciones diarias de temperatura, pero también se producen en las capas inferiores. Cuando estas tensiones térmicas son muy fuertes, producen, y de hecho ocurre con frecuencia en climas fríos, la fisuración de la capa, pero aunque estas tensiones sean inferiores a las de la rotura, su presencia puede colaborar en el proceso de fatiga por las cargas del tráfico, y esto no es tenido en cuenta en los ensayos actuales de fatiga, en particular en los de flexotracción, que son los habitualmente empleados.

**Figura 3** Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga.  
(Fuente: Alonso, 2006)



Es por ello que en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña se ha puesto a punto un nuevo procedimiento de ensayo de fatiga, que permite evaluar el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas, sometidas o no, a tensiones térmicas. Este procedimiento de ensayo se basa en la aplicación de una serie de ciclos de carga de tensión-compresión, sobre una probeta prismática, en distintos

niveles de deformación. La finalidad del procedimiento es establecer el comportamiento de la mezcla a fatiga mediante la determinación de dos niveles de deformación críticos de la mezcla: el nivel límite donde no se registra daño en la mezcla, presentando un comportamiento elástico, y el nivel de deformación en que la mezcla falla, registrando un daño irreversible.

## 2. Nuevo procedimiento EBADE

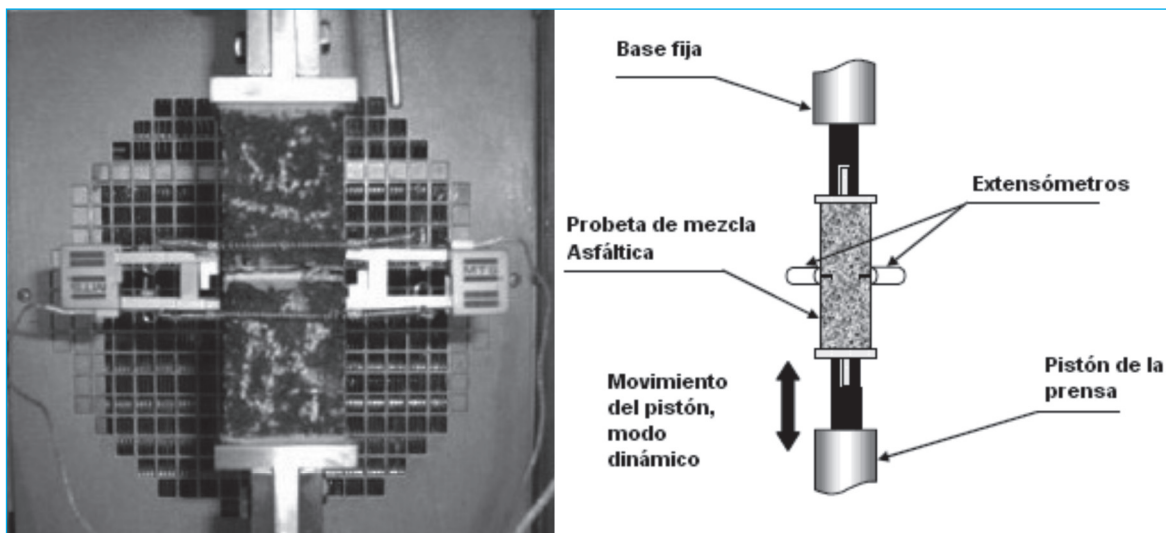
### 2.1 Montaje de la probeta

En la ejecución de este procedimiento se utiliza una probeta prismática, en la cual se realizan dos entallas en la zona central, con la finalidad de reducir el área de la probeta en su sección intermedia e inducir en ella el fallo. La probeta de forma prismática no ha de tener unas dimensiones fijas y pueden provenir del serrado de probetas cilíndricas fabricadas por la metodología Marshall o por medio de una prensa giratoria. Otra forma de fabricar las probetas puede ser mediante el

serrado de placas de 5-6 cm de espesor, fabricadas para los ensayos normalizados de deformaciones plásticas o de fatiga a flexotracción de cuatro puntos. Las dimensiones de las probetas suelen ser de 5-6 cm de ancho, similar espesor, y de 6-9 cm de altura.

Estas probetas prismáticas son pegadas mediante una resina epoxi a unas placas de acero, que permiten fijarlas a las mordazas de la prensa. Sobre la probeta se colocan dos extensómetros, en la zona de fallo previamente inducida, que permiten medir las deformaciones durante el proceso de ensayo, figura 4.

Figura 4 Montaje de nuevo procedimiento a fatiga en probetas prismáticas



### 2.2 Procedimiento EBADE

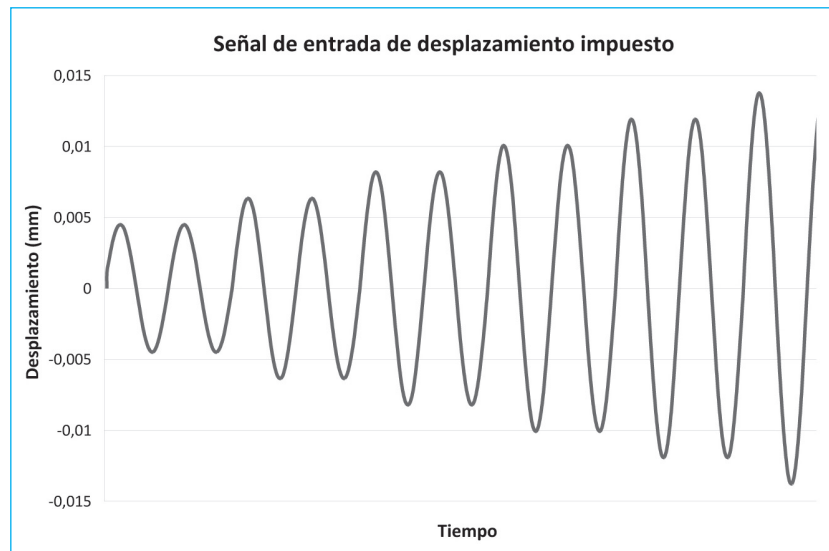
El nuevo procedimiento EBADE (ensayo de barrido de deformaciones) para determinar el fallo por fatiga, consiste en realizar un barrido de deformaciones en un ensayo cíclico de tensión-compresión. El ensayo se realiza aplicando una serie de ciclos a un nivel de deformación constante, la cual va aumentando en magnitud, progresivamente, hasta que se produce el fallo del material.

Este procedimiento de ensayo consiste en aplicar diferentes amplitudes de desplazamiento en orden ascendente durante un número determinado de ciclos. En la figura 5 se muestra la señal de entrada esquematizada para dos ciclos por escalón. En el procedimiento

EBADE se ha establecido el número de ciclos en cada escalón de deformación en 5.000 repeticiones, a una frecuencia de ensayo de 10 Hz.

Con este protocolo de ensayo se obtiene información del comportamiento del material a diferentes niveles de deformación en un solo ensayo, obteniendo, por ejemplo, valores de deformación que no producen daño al material y valores que inducen el fallo instantáneamente. Adicionalmente, el número de ciclos hasta el fin del ensayo se ve reducido sustancialmente al limitar el número de ciclos en cada nivel de deformación a un valor fijo, para deformaciones tanto bajas como altas. La deformación es registrada a través de los extensómetros colocados en la zona de fallo previamente inducida en la probeta.

Figura 5 Desplazamiento impuesto



Al llevar a cabo este barrido de deformaciones, durante el ensayo se determina el nivel de deformación por debajo del cual no se fatiga la mezcla, y la deformación en que se produce su fallo por fatiga. Estas dos deformaciones nos permiten determinar el comportamiento a fatiga del material. La primera deformación nos indica el nivel de deformaciones que necesitaría un gran número de aplicaciones de carga para producir el fallo del material, también llamado límite de fatiga, valor superior al número de aplicaciones de eje tipo que soporta el pavimento de una carretera con tráfico pesado y 30 años de servicio. El otro valor de la deformación, es el que correspondería también al fallo del material con muy pocas aplicaciones de carga, ya que según se ha visto en varios trabajos de investigación realizados en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, el fallo de fatiga del material se produce en los ensayos a tensión controlada en el mismo nivel de deformación, con independencia de la tensión inicial aplicada. Es decir, va evolucionando la deformación hasta llegar a la deformación de fallo, que tiene siempre el mismo nivel, tanto cuando el fallo tiene lugar con pocas aplicaciones de carga, como con muchas. Se obtienen así, de una manera rápida y sencilla, los dos parámetros más interesantes de un material desde el punto de vista de su fallo por fatiga, el nivel de deformaciones por debajo del cual el material no se fatiga, y la deformación en que rompe por fatiga.

### 3 Análisis del comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas por el nuevo procedimiento EBADE

#### 3.1 Estudio experimental

El comportamiento a fatiga tras aplicar el procedimiento EBADE se ha analizado en dos mezclas asfálticas comúnmente utilizadas en España en estructuras de pavimento. Ambas mezclas han sido fabricadas con el mismo tipo de árido y composición granulométrica, diferenciándose únicamente en la penetración del ligante asfáltico empleado. Una ha sido fabricada con un ligante de baja penetración, B-13/22, utilizado para fabricar mezclas de alto módulo y, en la otra, se ha utilizado un ligante de mayor penetración, B-60/70, que es el normalmente utilizado para la fabricación de mezclas asfálticas convencionales. Las características de los ligantes utilizados y la composición granulométrica de las mezclas, se observan en la tabla 1 y figura 6, respectivamente. Las dos mezclas fueron fabricadas con un contenido de ligante del 4.75% sobre el peso de árido, y se les evaluó su comportamiento a fatiga a 5 y 20 °C. A su vez, se evaluó la respuesta a fatiga de las mismas mezclas bajo la influencia de las tensiones térmicas mediante la ejecución del procedimiento EBADE en mezclas con tensiones iniciales inducidas previamente por la variación de temperatura de 20 a 5°C.

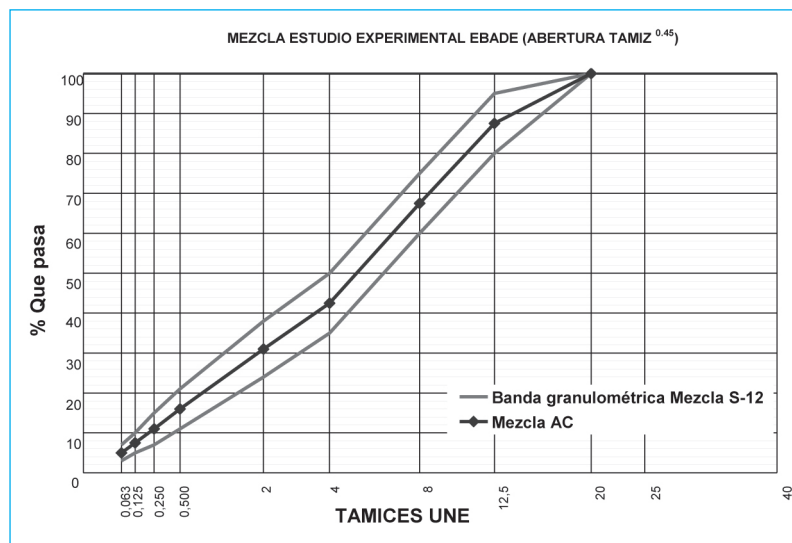
El ensayo se realizó aplicando series cíclicas de 5.000 repeticiones en diferentes amplitudes de deformación. Se inició con una primera serie con una deformación de  $2,5 \cdot 10^{-5}$  y se fue aumentando la amplitud de de-

formación en incrementos de  $2,5 \cdot 10^{-5}$  hasta llegar a la rotura del material. La frecuencia de aplicación de carga fue de 10 Hz y se mantuvo constante durante todo el ensayo.

**Tabla 1** Características de los ligantes asfálticos empleados en el estudio

Características del ligante	Unidad	B-13/22	B-60/70
Penetración (25 °C; 100 g; 5s)	0.1 mm	17	64
Índice de penetración	-	0.1	-0.2
Punto de reblandecimiento anillo y bola	°C	67.3	51.7
Punto de fragilidad Fraass	°C	-5	-17
Ductilidad a 25 °C	cm	15	>100
Viscosidad dinámica 60 °C	(Pa.s)	4551	367
Viscosidad dinámica 135 °C	(Pa.s)	1.92	0.56
<b>Residuo RTFOT</b>			
Pérdida de masa	%	0.35	0.5
Penetración (25 °C; 100 g; 5s)	% p.o.	10	32
Incremento en el punto de reblandecimiento	°C	7.5	9.6
Ductilidad a 25 °C	cm	7	50

**Figura 6** Granulometría de las mezclas evaluadas en el estudio experimental



## 3.2 Análisis de resultados

### 3.2.1 Curvas de Fatiga

En las figuras 7 y 8 se observan los resultados obtenidos en el ensayo de fatiga de las dos mezclas ensayadas por el procedimiento EBADE a las temperaturas de 5 y 20 °C. En estas figuras se ha representado, para las diferentes series de ciclos aplicados, con una duración de 5.000 ciclos cada una, el nivel de deformación medido con el extensómetro (eje vertical derecho) y la evolución de la tensión a que está sometida la mezcla durante el ensayo (eje vertical izquierdo). Esta tensión se ha obtenido dividiendo la carga aplicada por la sección de la probeta donde se han producido los dos cortes laterales, con el fin de inducir el fallo en ella. La representación de la tensión durante el ensayo nos permite analizar el comportamiento de las dos mezclas a fatiga, mostrando sus diferencias de comportamiento al variar las temperaturas de ensayo.

Cuando el ensayo se realiza a 20 °C, se observa claramente el comportamiento más dúctil que tiene la mezcla fabricada con el ligante de mayor penetración, B-60/70. En esta mezcla, a medida que se aumenta el nivel de deformaciones, aumenta también la tensión registrada, hasta llegar a un momento en que este incremento no se produce y va perdiendo carga, poco a poco, en las sucesivas series de ciclos aplicados. Esta pérdida de carga se produce también dentro de cada serie al aumentar el número de ciclos. Lo mismo sucede con el ligante más duro, pero en este caso, el fallo se produce de una manera más brusca y con un menor nivel de deformaciones.

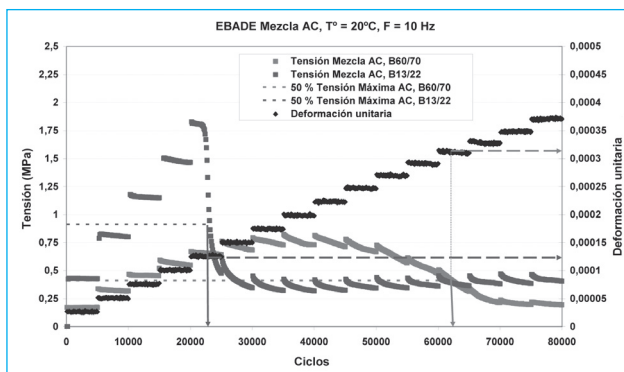
En el análisis de estas curvas, se ha establecido como criterio de fallo a fatiga de la mezcla, el nivel de defor-

mación en que se reduce a la mitad la tensión máxima experimentada por el material durante todo el proceso de fatiga. De acuerdo con este criterio, el fallo de la mezcla fabricada con el ligante más duro tiene lugar a una deformación de 0,000125, mientras que el ligante más blando tiene lugar a una deformación de 0,00032.

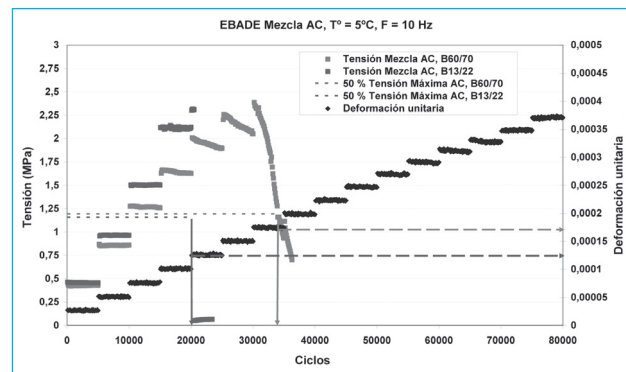
En el caso de la mezcla fabricada con el ligante B-13/22 se observa que su deterioro tiene lugar de una forma rápida y brusca cuando se llega a este nivel de deformaciones. Sería el nivel de deformaciones en que, como se ha indicado anteriormente, tendría lugar el fallo a fatiga para este tipo de mezcla. Con la mezcla fabricada con el ligante más blando, se aprecia, que para un nivel de deformaciones de 0,00032 se acelera su proceso de fatiga, y en consecuencia, su fallo por fatiga.

Si se analizan los resultados del procedimiento EBADE aplicado a la caracterización de estas dos mezclas a 5 °C, se observa la pérdida de ductilidad de ambas mezclas, y cómo su fallo se produce de una manera más frágil. La respuesta de la mezcla fabricada con el ligante blando se parece a la respuesta de la mezcla fabricada con el ligante duro, ensayado a 20 °C. Su fallo tiene lugar de una forma más brusca a una deformación de 0,00016. En el caso del ligante duro, que ya tenía un comportamiento rígido y frágil a 20 °C, el efecto de la disminución de la temperatura ha sido menor. Se observa un aumento de rigidez de la mezcla, un comportamiento más rígido y frágil, pero su fallo a rotura se mantiene en el mismo nivel de deformación de 0,000125. El efecto de la disminución de la temperatura ha sido más significativo en el caso del ligante asfáltico más blando.

**Figura 7** Evolución de tensiones y deformaciones, procedimiento EBADE, mezcla AC, B60/70 y B13/22 a 20°C



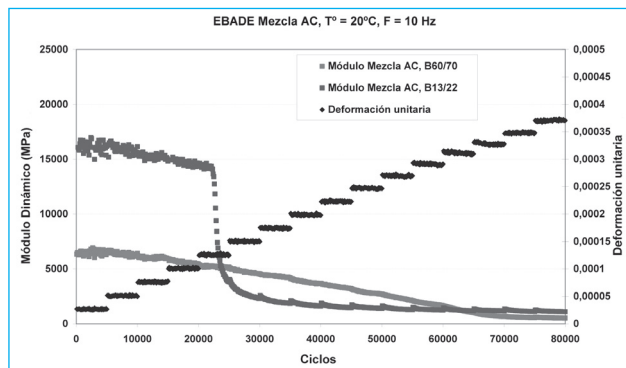
**Figura 8** Evolución de tensiones y deformaciones, procedimiento EBADE, mezcla AC, B60/70 y B13/22 a 5°C



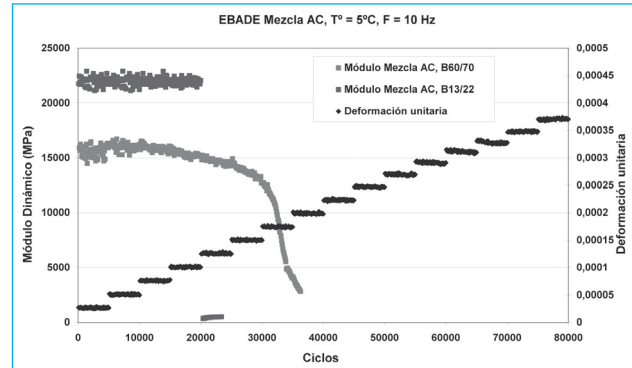
En las figuras 9 y 10 se ha representado la evolución del módulo dinámico de ambas mezclas, a 20 y 5°C, durante la ejecución del ensayo. Estas gráficas permiten analizar también cómo se va produciendo el progresivo deterioro de estos materiales durante el proceso de fatiga. Se observa que cuanto mayor es el módulo inicial de la mezcla ensayada, el material se comporta de forma elástica hasta un nivel de deformaciones más elevado, pero su degradación se produce de forma más brusca. Así en el caso del ligante B-13/22 ensayado a 5 °C, el módulo de la mezcla se mantiene prácticamente constante durante todo el ensayo, como si los diferentes ciclos aplicados apenas hayan producido deterioro del material. Por el contrario, el módulo de la mezcla del ligante más blando, ensayada a 20 °C, presenta un deterioro nada más aplicarse el segundo escalón de carga, siendo más continuo y progresivo a medida que se van incrementando los escalones de deformación, pero sin que llegue a producirse un fallo brusco.

Cuando se analiza la mezcla fabricada con el ligante más blando a temperaturas bajas o el ligante más duro a la temperatura alta, el proceso de fallo es muy similar, apareciendo el proceso de deterioro del módulo entre el segundo y tercer escalón de deformación. De acuerdo con estos resultados se podría establecer unos niveles de deformación, en que la mezcla no experimentaría deterioro por fatiga, diferentes para cada mezcla y temperatura de ensayo. Para la mezcla fabricada con el ligante B-13/22 sería  $1 \cdot 10^{-4}$  a 5°C y  $7,5 \cdot 10^{-5}$  a 20 °C. Mientras que para la mezcla fabricada con el ligante más blando, B-60/70, estos niveles serían del orden de  $7,5 \cdot 10^{-5}$  a 5 °C y  $5 \cdot 10^{-5}$  a 20 °C.

**Figura 9** Evolución del módulo dinámico, procedimiento EBADE mezcla AC, B60/70 y B13/22 a 20°C



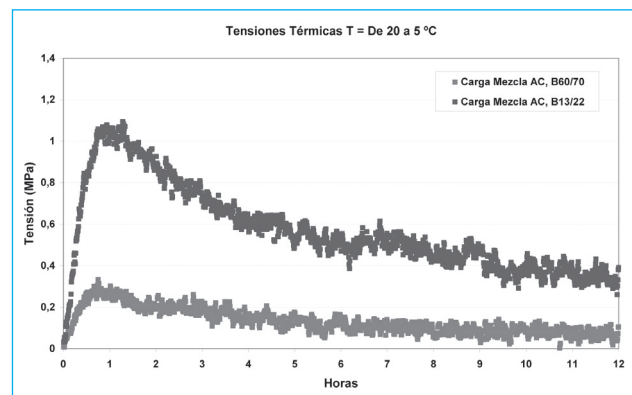
**Figura 10** Evolución del módulo dinámico, procedimiento EBADE mezcla AC, B60/70 y B13/22 a 5°C



Se puede observar cómo a través del procedimiento EBADE y de las curvas de fatiga obtenidas durante el ensayo, pueden obtenerse los dos niveles de deformación que determinan el fallo de fatiga de una mezcla asfáltica en la estructura de pavimento. En primer lugar, el nivel de deformaciones por debajo del cual no tendría lugar el proceso de deterioro por fatiga y, en segundo lugar, el nivel de deformaciones en que tendría lugar la rápida propagación del fallo por fatiga. Cuando estos dos niveles de deformación están separados, las mezclas tienen un comportamiento dúctil y flexible, mientras que, cuando están próximos, la respuesta del material es más frágil y elástica.

### 3.2.2 Análisis del efecto de las tensiones térmicas en el proceso de fatiga

**Figura 10** Evolución del módulo dinámico, procedimiento EBADE mezcla AC, B60/70 y B13/22 a 5°C

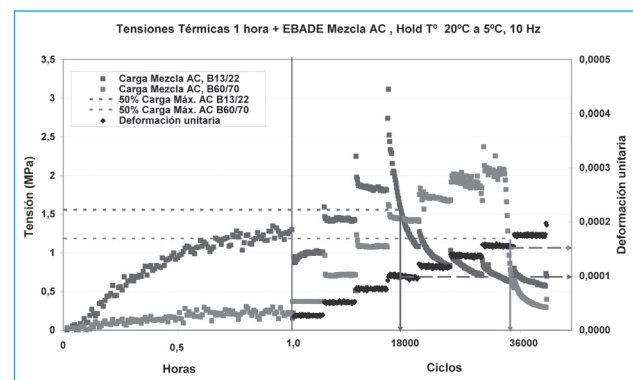


Las tensiones registradas en las distintas mezclas evaluadas, producto de la variación de temperaturas entre 20 y 5 °C, pueden observarse en la figura 11. En esta figura se han representado las tensiones registradas para cada mezcla confeccionada con los ligantes de diferente penetración, para un periodo de 12 horas. Se observa un fuerte incremento inicial de tensiones en la primera hora, registrándose para la mezcla fabricada con el ligante duro de penetración 13/22, una tensión máxima superior en cuatro veces a la registrada por la mezcla confeccionada con el ligante más blando, de penetración 60/70. A su vez, se observa en ambas curvas que existe una disipación de tensiones posterior al periodo en que se registraron los valores máximos, presentando al cabo de las 12 horas una tensión promedio de 1/3 del valor máximo registrado en ambas mezclas.

Los resultados obtenidos de la aplicación del procedimiento EBADE a las mezclas evaluadas, las cuales han sido sometidas a un estado tensional previo, de origen térmico, producto de la variación de la temperatura de 20 °C a 5 °C, pueden observarse en la figura 12. Es esta figura se aprecia que las tensiones registradas en la primera hora, al igual que en la figura 11, registran sus valores máximos al final de dicho periodo. Posteriormente, una vez aplicado el procedimiento EBADE a las diferentes mezclas sometidas con tensiones térmicas iniciales, se observa que para el caso de la mezcla confeccionada

con el ligante de menor penetración, B-13/22, su deformación de rotura se produce incluso un nivel inferior al producido por el mismo procedimiento a 5°C, sin tensiones térmicas iniciales, ilustrado en la figura 8, registrando a su vez, un menor número de ciclos para su fallo. Sin embargo, para la mezcla confeccionada con el ligante de penetración mayor, B-60/70, las tensiones térmicas inducidas en el periodo evaluado, no afectaron significativamente su nivel de deformación de rotura ni el número de ciclos hasta el fallo, observándose así, la mayor flexibilidad y el mejor comportamiento de la mezcla que utilizó el ligante de mayor penetración, B-60/70.

**Figura 11** Tensiones térmicas registradas para un periodo de 12 horas, mezcla AC, B60/70 y B13/22.



## Conclusiones

El nuevo procedimiento EBADE permite caracterizar el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas mediante la obtención de los dos niveles de deformación que determinan el fallo por fatiga de una mezcla en la estructura de pavimento, el nivel de deformación debajo del cual no existe daño y el nivel de deformación en el cual el fallo por fatiga progresa rápidamente.

El procedimiento EBADE presenta las siguientes ventajas frente a otros ensayos de fatiga:

- Menor duración de los ensayos para evaluar la respuesta a fatiga de las mezclas asfálticas.

- Utilización de probetas prismáticas que permiten obtener fácilmente los parámetros característicos del material.
- Se puede realizar en un amplio rango de temperaturas.

- Permite simular el comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas condicionadas por las tensiones térmicas.

- Buena sensibilidad del procedimiento frente a los parámetros de estudio.

## Referencias

1. Alonso J. (2006). Estudio del proceso de deformación y agrietamiento por fatiga de mezclas bituminosas sometidas a carga cíclica. Tesis Doctoral, Escuela de Caminos Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña. Dirigida por F. Pérez.
2. Baaj H. and H. Di Benedetto. Effect of Binder Characteristics on Fatigue of Asphalt Pavement Using an Intrinsic Damage Approach. Road Materials and Pavement Design. Vol. 6, N° 2, pp. 147-174, (2005).
3. Di Benedetto H., de La Roche C., Baaj H. and Pronk A. (2003). Fatigue of Bituminous Mixtures: Different Approaches and RILEM Group Contribution. Sixth International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, 15 – 38.
4. Pérez F., Miró R., Martínez A., Botella R., Reyes O. and Valdés G. (2009). False Failure in Flexural Fatigue Tests. 2nd Workshop on 4 PB – Four Point Bending, 47-57.
5. Pérez F., Miró R., Martínez A., Alonso J., Cepeda J. y Rodríguez M..(2005). Desarrollo de un Nuevo Procedimiento para la Evaluación del comportamiento a Fatiga de las Mezclas Bituminosas a Partir de su Caracterización en un Ensayo a Tracción. Primer Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo. España.