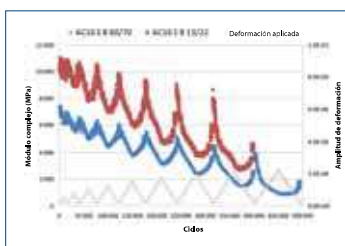


El fallo por fatiga de los materiales bituminosos. Una nueva interpretación de los procesos de recuperación y deterioro



Fatigue failure of bituminous materials. A new interpretation of the recovery and damage processes

Félix Edmundo Pérez Jiménez
Doctor Ingeniero de Caminos
Catedrático Caminos
Universidad Politécnica de Cataluña

Resumen

En la evaluación de la resistencia a la fatiga de los materiales bituminosos se han usado los mismos criterios y ensayos que para otros materiales de construcción: acero y hormigón. No se ha tenido en cuenta que estos materiales presentan un comportamiento viscoso (tixotrópico) y que esto afecta la respuesta de los materiales bajo carga cíclica, haciendo que pueda bajar su módulo al aumentar la carga aplicada (respuesta no lineal) y que recuperan gran parte de esta pérdida de módulo al retirar la carga. Esto explica la gran pérdida de módulo que presentan estos materiales al inicio del ensayo (fase I) y como recuperan su módulo (healing) al retirar la carga.

En este artículo se muestra este comportamiento de las mezclas bituminosas a partir de la comparación de los ensayos convencionales de barrido de tiempo y la aplicación de un nuevo ensayo de barrido de deformaciones puesto a punto en el Laboratorio de Caminos de la UPC, ensayo EBADE. Este nuevo ensayo permite obtener las leyes de fatiga de los materiales bituminosos de una manera más rápida y eficiente. Por último se pone de manifiesto el efecto que tienen la secuencia de cargas y los periodos de reposo entre cargas para aumentar la vida a fatiga de los materiales bituminosos.

Abstract

For evaluating the fatigue resistance of bituminous materials, the same criteria and tests have been used as for other building materials: steel and concrete. It has not been taken into account that these bituminous materials show a viscous (thixotropic) behavior and that this affects the response of the materials under cyclic loading, causing a modulus decrease when the applied load is increased (nonlinear response) and a recovery of great part of this modulus loss when the load is removed. This explains the great modulus loss shown by these materials at the beginning of the test (phase I) and how they can recover their modulus (healing) when the load is removed.

This article shows the behavior of the bituminous mixtures arising from the comparison of the conventional time sweep tests and the application of a new strain sweep test developed at the Road Research Laboratory of the UPC, EBADE test. This new test enables to obtain the fatigue laws of bituminous materials in a faster and more efficient way. Finally, the effects of the load sequence and the rest periods between loads on the increase of the fatigue life of the bituminous materials are exposed.

Nota: Este artículo recoge la conferencia impartida por el autor en la Universidad Tecnológica Metropolitana de Chile. En ella se presenta un resumen del trabajo de investigación realizado en el Laboratorio de Caminos de la UPC por los profesores Félix Pérez, Rodrigo Miro, Adriana Martínez y Ramón Botella. El profesor Botella realizó su tesis doctoral dentro de esta línea de investigación y actualmente lo está realizando la ingeniera Teresa López.

1. Presentación

En la caracterización de la resistencia a la fisuración por fatiga de los materiales bituminosos apenas se han tenido en cuenta las características reológicas especiales que tienen estos materiales; y se ha intentado aplicar los mismos procedimientos de ensayo y los mismos criterios que se usan para otros materiales más elásticos, rígidos y frágiles, como es el caso de los metales y hormigones. El procedimiento habitual de caracterización de todos estos materiales es el de aplicar, en un ensayo de tracción-compresión o de flexotracción, una sollicitación cíclica de amplitud constante y esperar el fallo del material. En el caso de los materiales elásticos y rígidos se observa un deterioro continuo y progresivo de las características mecánicas del material durante el ensayo, hasta que se produce una rotura más o menos brusca, con lo que no hay grandes problemas para determinar el número de ciclos que produce su fallo. No es este el patrón de comportamiento de los materiales bituminosos, especialmente de los más dúctiles y flexibles-betunes o mezclas con betunes modificados-. Cuando se ensaya un material bituminoso se observa en primer lugar una caída muy acusada de sus características mecánicas en los primeros ciclos del ensayo. Luego esta caída se reduce notablemente, para hacerse más o menos lineal con el número de ciclos y llegar finalmente a una caída más acentuada de sus propiedades. El proceso de fatiga de los materiales bituminosos se asocia fundamentalmente con la parte lineal del deterioro, fase II. La fase I, pérdida brusca de características mecánicas, solo se tiene en cuenta para establecer las características iniciales del material; pero no se analiza la naturaleza de esta caída, que se asocia de forma no concreta a diferentes motivos: tixotropía, adaptación de los materiales a las mordazas y al ensayo, no linea-

lidad, etc. La fase III tampoco es fundamental en el ensayo, pues estos materiales se considera que fallan cuando sus propiedades mecánicas se reducen al 50% de las iniciales, y esto ocurre con frecuencia en la fase II. El introducir este criterio de fallo es debido a que la rotura de estos materiales es dúctil; a veces no se aprecia la caída brusca de la fase III, y es difícil establecer dónde se produce este fallo de no recurrir al criterio cuantitativo antes indicado. Este criterio hace, Figura 1, que en el ensayo de algunas mezclas o betunes se establezca su fallo en la fase II, cuando falta un número de ciclos muy grande para llegar a su fallo. [3], [8] y [11].

Otro fenómeno que se presenta al ensayar estos materiales, que no suele ocurrir en el caso de los metales y hormigones, es la recuperación de sus propiedades mecánicas al poco tiempo de detenerse el ensayo. Esto ha llevado a muchos autores a hablar del "self-healing", autorreparación de los materiales bituminosos. Las microfisuras que se supone que se producen durante el proceso de fatiga se cierran total o parcialmente debido a las características especiales de estos materiales. [12] y [9].

Realmente la fuerte caída de módulo que se produce en la fase I de los ensayos de los materiales bituminosos, y su recuperación durante los periodos de reposo, pueden ser comprendidos

de una forma más sencilla y natural si se tiene en cuenta la respuesta tixotrópica de estos materiales, la energía disipada y su cambio de temperatura interna durante el ensayo. En este artículo se recoge el análisis llevado a cabo por el Laboratorio de Caminos de la UPC, a partir de la implementación de un nuevo ensayo de fatiga de barrido de deformaciones, ensayo EBA-DE, y la comparación de los resultados obtenidos en este ensayo con los de barrido de tiempo sobre los mismos materiales. El análisis de estos resultados ha llevado a una serie de conclusiones, que cuestionan cómo se están realizando o aplicando estos ensayos en el dimensionamiento de las capas bituminosas de los firmes flexibles.

En este análisis se ha tenido muy en cuenta la energía disipada en cada ciclo de carga, tanto en los ensayos de barrido de tiempo como de deformación, y la relación que hay entre este parámetro y el deterioro de los materiales bituminosos, lo que ha proporcionado una nueva visión sobre las respuesta de los materiales bituminosos en los ensayos bajo cargas cíclicas. Como resultados más importantes de este estudio, que se muestran a continuación, cabe destacar:

- No se debe diferenciar en los ensayos de fatiga la fase I de la fase II. Es un proceso continuo que está relacionado con la pérdida de energía disipada en cada ciclo de carga.

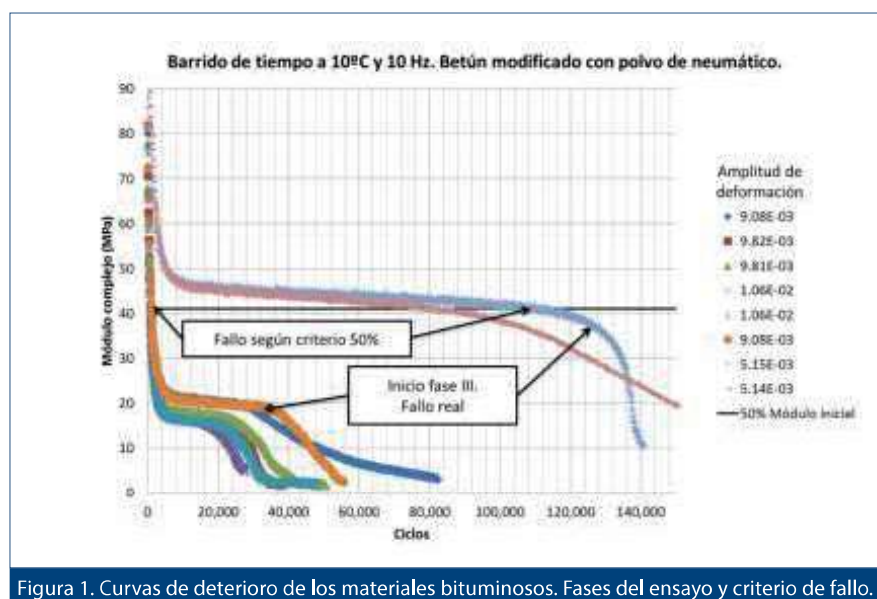


Figura 1. Curvas de deterioro de los materiales bituminosos. Fases del ensayo y criterio de fallo.

- La magnitud del descenso que experimenta el módulo en la fase inicial del ensayo está relacionada con el nivel de deformación aplicado. Respuesta no lineal de los materiales bituminosos.
- La respuesta de estos materiales en los ensayos cíclicos varía al cambiar el nivel de la deformación aplicada. Esto hace que recuperen sus propiedades mecánicas al disminuir la deformación aplicada o al detener el ensayo (self-healing). No obstante, si se continúa el ensayo se puede llegar a la fase III y al fallo del material, dependiendo del nivel de deformación aplicado.
- El ensayo EBADE permite estimar los niveles de deformaciones que no produciría ningún tipo de deterioro, y los que causarían su rápido fallo en ensayos clásicos de barrido de tiempo. Esto permite estimar la ley de fatiga de forma más rápida y eficiente.
- En el ensayo de betunes con el proceso EBADE se ha podido medir el aumento de temperatura que se produce en su interior durante el proceso de fatiga. Esto lleva a considerar esta variación interna de la temperatura como un factor que explica el proceso de deterioro de los materiales bituminosos en los ensayos de fatiga, así como su recuperación al cambiar el nivel de deformación aplicada o detener el ensayo.

2. Ensayo EBADE

El ensayo EBADE es un ensayo cíclico de tracción-compresión en que

la deformación aplicada va aumentando progresivamente cada 5000 ciclos. Este ensayo ha sido implementado por el Laboratorio de Caminos de la UPC en dos modalidades de ensayo, una para la caracterización de betunes y otro para mezclas bituminosas.

En el caso de betunes el ensayo se aplica sobre probetas cilíndricas de betún de 20 mm de diámetro y 40 mm de altura que se adhieren con un pegamento especial a dos soportes colocados en la prensa dinámica, uno de ellos en su placa de base y el otro en el actuador. La deformación inicial aplicada es de 760 $\mu\text{m}/\text{m}$, que se van aumentando cada 5000 ciclos en esta magnitud, la frecuencia de la carga cíclica aplicada es de 10 Hz. El ensayo se realiza dentro de una cámara climática a temperatura constante. La temperatura normal en los ensayos de betunes es de 10°C, aunque se han realizado ensayos de betunes en un rango más amplio de temperaturas entre -10 y 20°C. En el ensayo se controla el desplazamiento vertical del pistón de la prensa para que este aplique sobre la probeta el rango de deformaciones mencionado. [4].

El ensayo sobre mezcla se realiza sobre probetas prismáticas de aproximadamente 50x50 mm de base y 60 mm de altura. Estas probetas tienen una ranura en su parte media con el fin de inducir la fisuración de la probeta en su parte central. En este caso la carga cíclica aplicada es también de 10Hz. Se parte de una deformación inicial de 25 $\mu\text{m}/\text{mm}$, que se va aumentando cada 5000 ciclos. La probeta va agarrada por unas placas

y mordazas especiales a la prensa y el ensayo se controla mediante un extensómetro. El ensayo se realiza normalmente a 20°C, aunque se han realizado ensayos en un mayor rango de temperaturas, -15 a 35°C. [6] En la Figura 2 aparece las fotos del ensayo EBADE en los que se pueden apreciar la forma de ensayo y de las probetas en las dos modalidades.

En el análisis de los resultados de estos ensayos se ha tenido muy en cuenta la energía disipada en cada ciclo. Los materiales bituminosos presentan una respuesta viscosa y se produce un desfase entre la tensión y la deformación aplicada, Figura 3a. Esto da lugar a un ciclo de histéresis en el plano tensión-deformación, cuya área es directamente proporcional a la energía disipada en cada ciclo.

$$W_{\text{disipada}} = \pi \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \sin \phi = F (\text{Área Ciclo Histéresis}) \cdot c$$

Como resultado del ensayo EBADE se obtiene en primer lugar la evolución de la tensión con los ciclos para cada nivel de deformación, Figura 3b. En esta figura se observa como la tensión aumenta al inicio con el nivel de deformación y disminuye dentro de cada escalón de deformación con el número de ciclos. Al ir aumentando el nivel de deformación se llega a un máximo de la tensión y esta empieza a caer tanto al aumentar el nivel de deformaciones como el número de ciclos. A partir de la medida de la tensión se obtiene la evolución del módulo con cada ciclo dentro de cada nivel de deformación, Figura 3c. En este

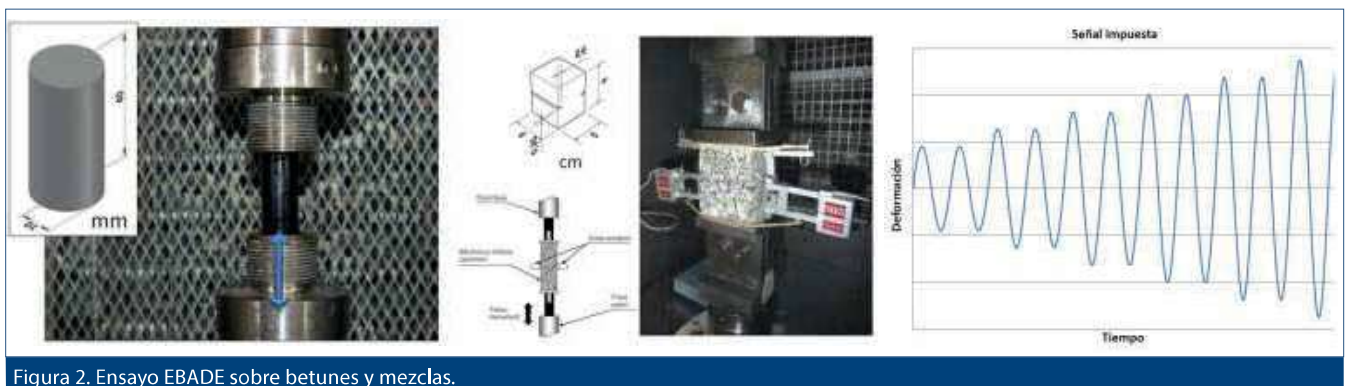


Figura 2. Ensayo EBADE sobre betunes y mezclas.

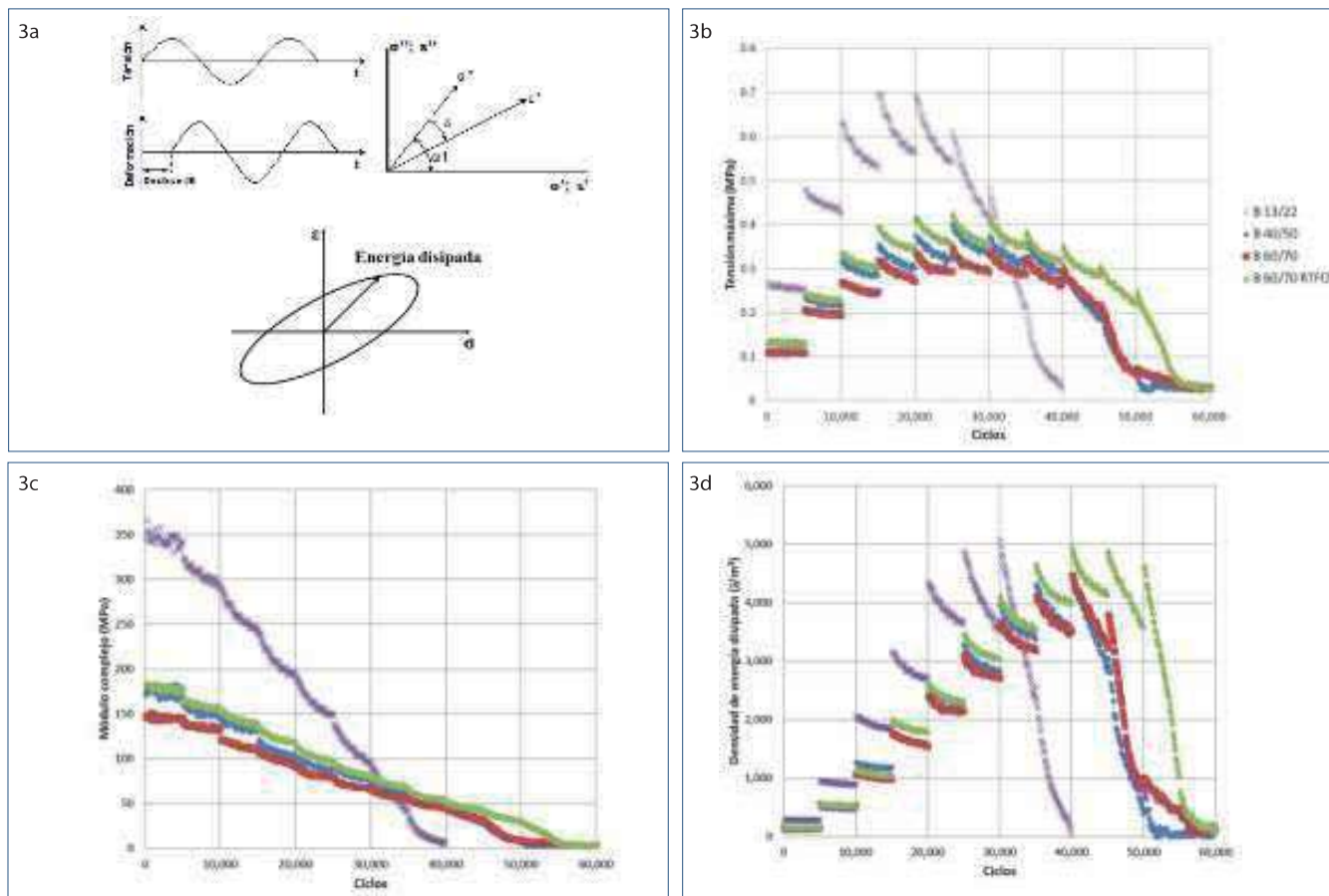


Figura 3. Resultados del ensayo EBADE aplicado a la caracterización de cuatro betunes

caso se observa que el módulo siempre decrece tanto al aumentar el nivel de deformación como con cada ciclo.

Por último, se ha representado también la evolución de la energía disipada, Figura 3d. Esta aumenta con cada escalón de deformación y disminuye con cada ciclo de carga. Sin embargo, en los últimos ciclos, la energía ya no aumenta con el nivel de deformación y se produce una brusca caída con cada ciclo de carga. Esta brusca caída de la energía disipada se asocia al fallo del material. La deformación de fallo se asocia con el nivel de deformación en que la energía disipada desciende por debajo del 50% del valor máximo de energía registrada durante el ensayo.

Como parámetros más significativos del ensayo se consideran el módulo inicial y la deformación de fallo. Así los resultados recogidos en esas figuras muestran que hay un betún duro B13/22 con un alto módulo y baja deformación de fallo, que apenas hay diferencia en la respuesta

de los betunes B40/50 y B60/70, similares módulos y el mismo nivel de deformación de fallo, y que el betún modificado presenta un módulo inicial ligeramente más bajo pero su deformación de fallo es sensiblemente más alta.

3. Energía disipada y deterioro mecánico de la mezcla. Ensayos de barrido de tiempo y barrido de deformaciones.

Al aplicar el ensayo EBADE en la caracterización de materiales bituminosos una de las cuestiones que se planteaba era si el ensayo de barrido de deformaciones podía modificar la respuesta de los materiales bituminosos frente a los ensayos de barrido de tiempo. Si, por ejemplo, el ensayo de barrido de deformaciones podría dar lugar a una deformación plástica de la probeta y produciría su fallo en una deformación más alta. Por ello se llevaron a cabo sobre los mismos ma-

teriales bituminosos-betunes o mezclas-ensayos de barrido de tiempo y barrido de deformaciones, comparando sus resultados. En la Figura 4 se han recogido los resultados de ambos tipos de ensayo para un betún B60/70. [5].

Los ensayos de barrido de tiempo presentan una caída del módulo al principio, tanto mayor cuanto más alta es la deformación aplicada, y posteriormente un tramo más o menos horizontal. Salvo en los dos ensayos realizados con un mayor nivel de deformación, donde se produce al final del ensayo una caída importante del módulo, fase III. El ensayo de barrido de deformaciones es una única curva que representa la caída del módulo con cada nivel de deformación y con los ciclos de carga aplicados en cada nivel de deformación.

Al comparar los resultados se aprecia claramente que para el mismo nivel de deformación el ensayo de barrido de deformaciones tiende a superponerse a la curva obtenida en el barrido de tiempo. Es decir:

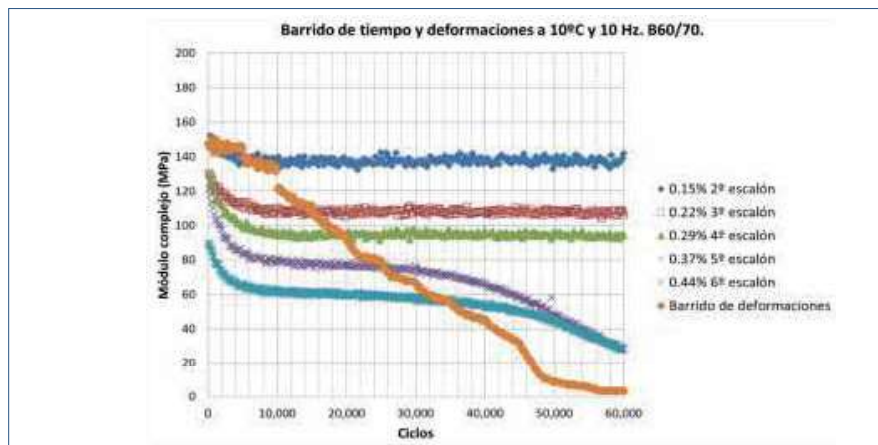


Figura 4. Resultados ensayos de barrido de tiempo y deformaciones (EBADE) sobre un betún B60/70

que la respuesta que presenta un material bituminoso al inicio de la fase II de los ensayos de fatiga depende básicamente del nivel de deformación aplicada. El material va cambiando su rigidez en el ensayo de barrido de deformaciones, adaptándose de forma progresiva al nivel de deformaciones aplicado, mientras que en el ensayo de barrido de tiempo se produce una caída brusca en la fase I para adaptarse lo antes posible al nivel de deformación aplicado.

La igualdad de respuesta de estos materiales para el mismo nivel de deformaciones puede apreciarse también en la Figura 5, donde se ha representado para cada nivel de deformación la relación entre el módulo y la energía disipada. [3]. Al representar los resultados del barrido de deformaciones se obtienen unas líneas rectas cuyas pendientes aumentan

con el nivel de deformación. Los resultados de los ensayos de barrido de tiempo se superponen con los de barrido de deformaciones para el mismo nivel de deformación. Además, los resultados que corresponden a la fase I y fase II en el barrido de tiempo se encuentran en la misma línea recta para el mismo nivel de deformaciones. El cambio de la rigidez del material obedece en ambos casos a la energía disipada. No habría que asociar los resultados de los ensayos de fatiga en fase I y fase II a diferentes mecanismos de deterioro, ya que ambos están asociados con la evolución de la energía disipada durante el proceso. En la fase I pasa el material de estar en reposo a tener que disipar una elevada energía, lo que hace bajar rápidamente su rigidez, hasta llegar a un nivel en que tanto la variación de la energía disipada por ciclo como la del módulo, es más pequeña, fase II.

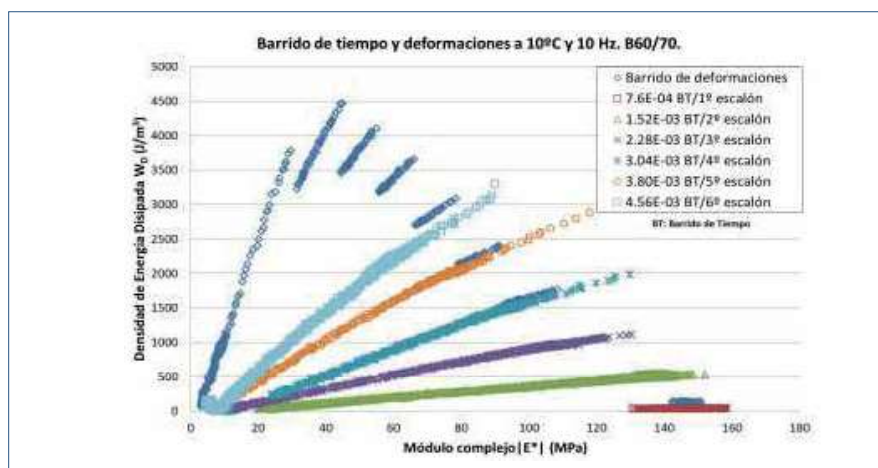
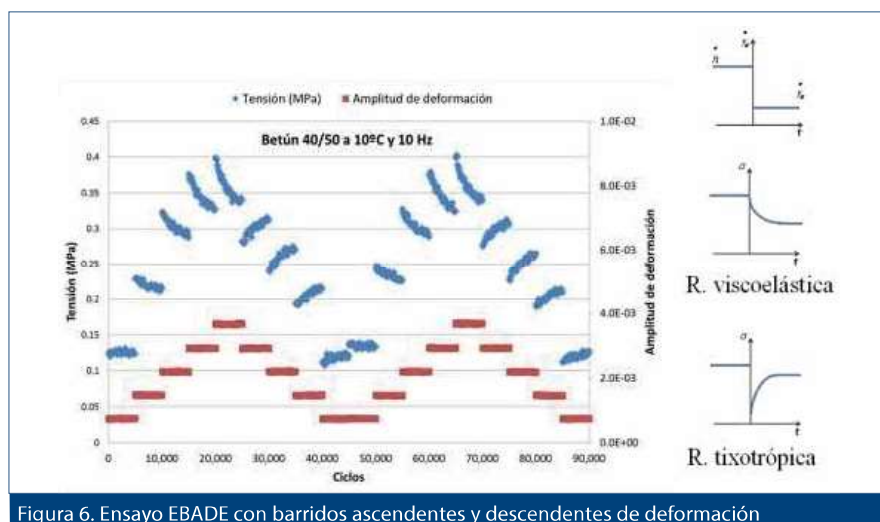


Figura 5. Relación entre la variación del módulo y de la energía disipada en los ensayos de barrido de tiempo y de deformaciones, para el mismo nivel de deformaciones

4. El efecto de la disminución de las solicitaciones aplicadas y periodos de reposo

Al observar en la figura 4 la superposición de la evolución del módulo en ambos tipos de ensayos, se concluye que, el módulo que adopta el material depende fundamentalmente del estado de sollicitación al que está sometido. No importa el camino seguido, ni el número de aplicaciones de carga, sino el estado de sollicitación aplicado. Por tanto, podría desaparecer el deterioro observado, si se entiende éste como una disminución de la rigidez, al reducir o eliminar por completo la sollicitación impuesta. Para comprobar hasta qué punto se podría admitir esta hipótesis se hicieron ensayos de barrido de deformaciones en que al principio se iba incrementando los escalones de deformación cada 5000 ciclos y luego se iba disminuyendo estos escalones cada 5000 ciclos también. En la Figura 6 aparecen estos resultados en el caso del ensayo de un betún B40/50 a 10°C. [6]. Se ha repetido dos veces el procedimiento de ensayo mencionado y en ambos casos se ha llegado hasta el quinto escalón. Se observa que al ir subiendo el nivel de la deformación aplicada aumenta la tensión para luego descender con el número de ciclos dentro de cada escalón. En el quinto escalón la pérdida de módulo por ciclo es bastante significativa, (50 % porcentaje del inicial); pero al ir bajando el escalón de deformación el módulo se va recuperando, y al final del último ciclo de este escalón se llega a un módulo similar al inicial. Es decir, lo que a veces consideramos como deterioro por fatiga no es tal, sino que se corresponde con la respuesta tixotrópica del material. El módulo que tiene se corresponde con el nivel de deformación impuesto.

Los materiales tixotrópicos se diferencian de los viscoelásticos, esquema a la derecha de la Figura 6, en que en estos al reducir la deformación aplicada



la tensión a la que está sometido el material disminuye progresivamente. Mientras que en los tixotrópicos se produce una pérdida notable de la tensión y luego esta aumenta hasta llegar a una tensión de equilibrio. Esto

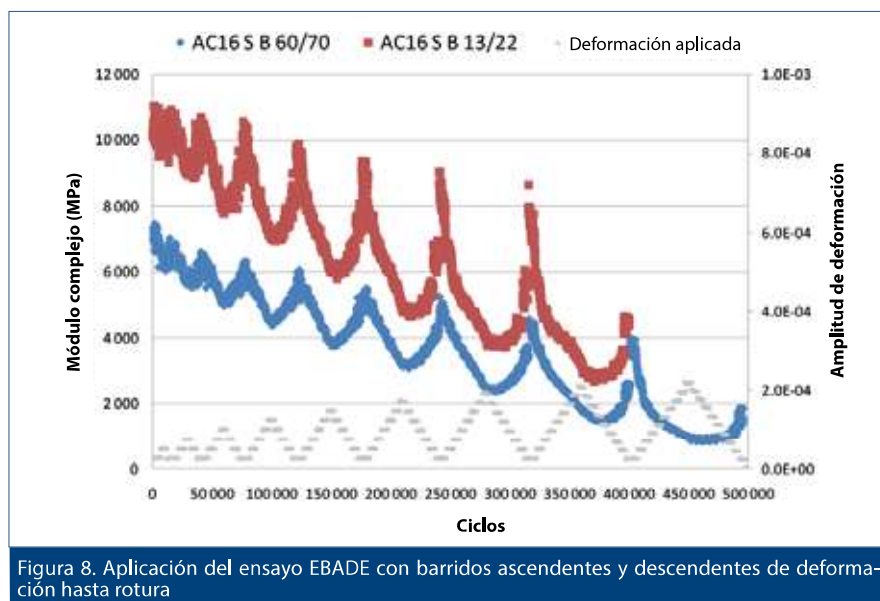
es claramente lo que ocurre con el betún ensayado al reducir progresivamente los escalones de deformación.

La respuesta mecánica que presentan estos materiales ante la subida y bajada de los escalones de de-

formaciones la podríamos comparar, Figura 7, con lo que ocurre en una bicicleta cuando en llano cambiamos a un piñón con más dientes porque deseamos reducir la velocidad. Apreciamos al principio que disminuye bruscamente el esfuerzo que tenemos que dar a los pedales; pero a medida que la bicicleta pierde velocidad e inercia, nuevamente nos tenemos que esforzar con los pedales hasta llegar al nivel de esfuerzo que mantenga constante la nueva velocidad de la bicicleta. Al ser esta menor también lo será el esfuerzo.

Al ensayar un material menos dúctil se aprecia que, al reducir el escalón de deformación, ya no recupera el material todas sus propiedades; y al repetir un nuevo ciclo de carga la resistencia del material baja progresivamente hasta que se produce su fallo, es decir, que también puede haber un deterioro que no se recupera al detener el ensayo o bajar la deformación más bajos. En la Figura 8 se han representado los resultados de una serie de ensayos de barrido ascendente y descendente en lo que se ha ido aumentando el nivel máximo de deformación. [6]. En esta figura se observa como la mayor parte de la pérdida de módulo es por tixotropía; y que este se recupera en su mayor parte al detener el ensayo, para los niveles de deformación. Pero si pasamos a niveles más altos, cerca de la deformación de fallo, la recuperación de propiedades es menor y al final acaba fallando.

Cuando detenemos un ensayo de barrido de tiempo se observa también una recuperación importante de las propiedades del material, pero queda también un daño permanente y el material rápidamente vuelve a este estado de deterioro en cuanto se reanuda el ensayo, Figura 9. No hay, por tanto, una recuperación del daño, "self-healing", sino que lo único que se observa es cómo cambian las propiedades mecánicas del material por tixotropía pero manteniendo el nivel de daño producido. En la Figura 9 se representa los resultados del ensayo



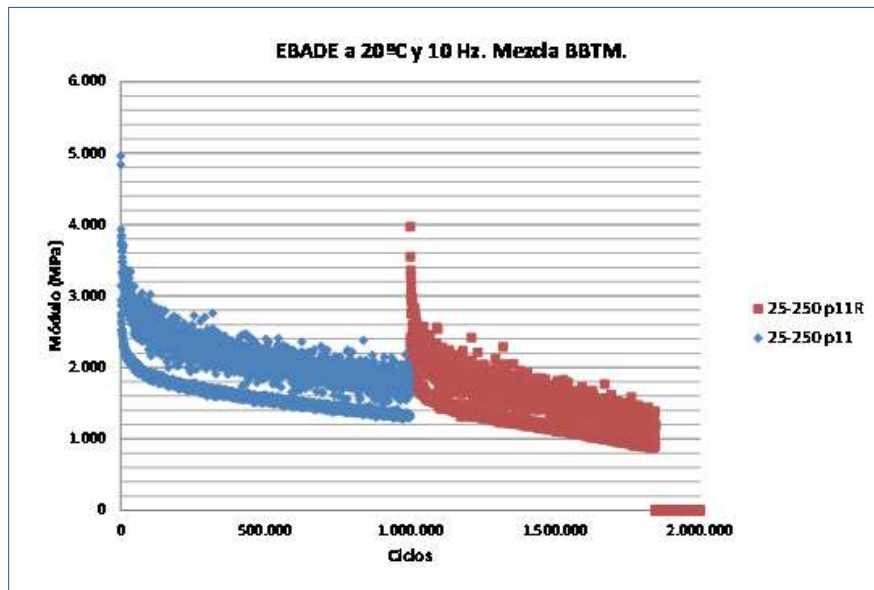


Figura 9. Ensayo de barrido de tiempo para los dos niveles de deformación. Periodo de reposo a los 1,2·10⁶ ciclos

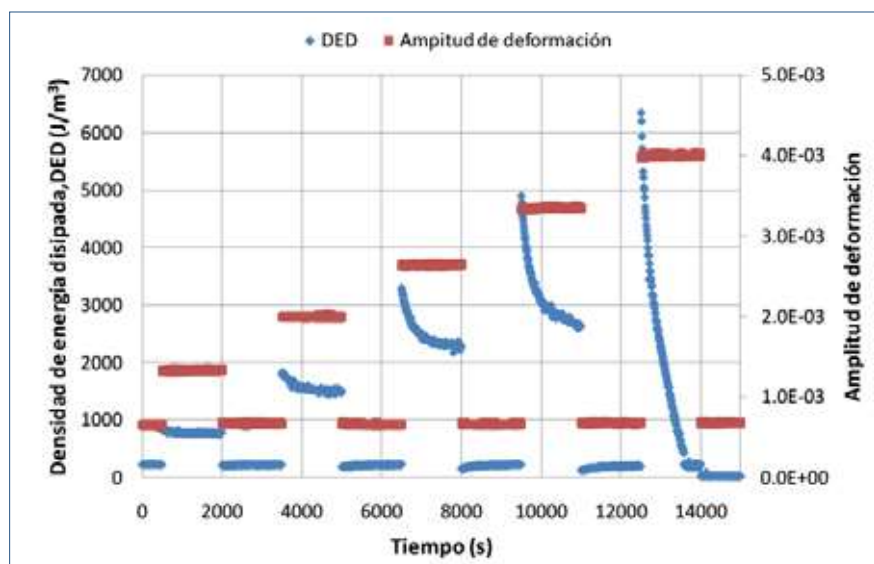


Figura 10. Medida de la energía disipada

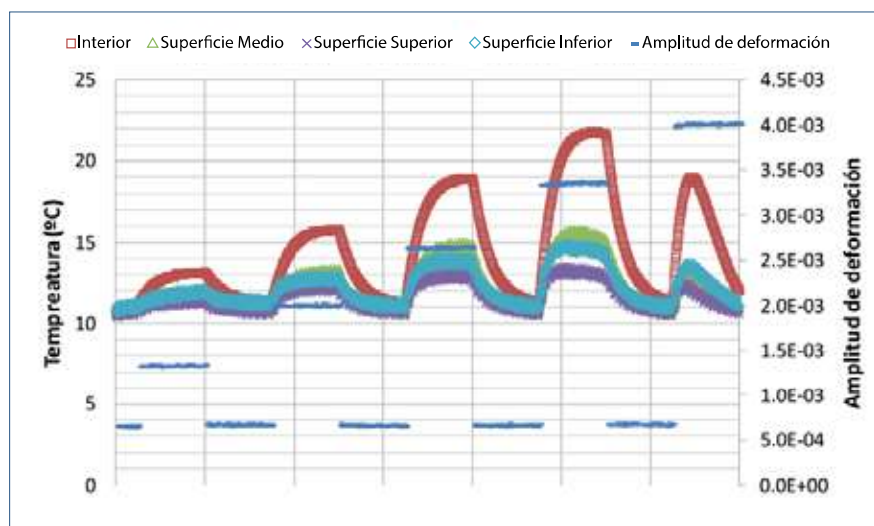


Figura 11. Medida de temperatura

de barrido de tiempo en que se iban intercalando los niveles de deformación cada 5000 ciclos y en el que se detuvo el ensayo durante 8 horas a los 1,2·10⁶ ciclos.

5. Energía disipada e incremento de temperatura

En la realización de algunos ensayos con betunes se han medido los cambios de temperatura que se producen en el interior de la muestra de betún ensayada. Estos ensayos han consistido en realizar un ensayo de barrido de deformaciones pero intercalando entre cada escalón 5000 ciclos a la deformación inicial. En la Figura 10 se representa la variación de la energía disipada durante el ensayo. Se observa cómo esta se incrementa al cambiar cada escalón de deformación y disminuye dentro de los 5000 ciclos del escalón correspondiente. Cuando se regresa al escalón inicial la energía es más baja y se mantiene prácticamente constante. En el último escalón de fallo, la energía decrece bruscamente hasta unos niveles bajos, prácticamente despreciables.

En la Figura 11 se representa la evolución de la temperatura. Se observa que aunque el ensayo se hace en una cámara que mantiene la temperatura a 10°C, la temperatura en el interior de la probeta sube con los escalones de carga para reducirse cuando se vuelve al escalón inicial. Al aumentar la deformación aplicada el incremento de la temperatura es cada vez mayor. Se han registrado temperaturas de 22°C en el interior de la probeta, lo que supone un incremento de 12°C respecto de la temperatura inicial. En el último escalón, aunque se registran niveles altos de energía disipada en más del 50% de los 5000 ciclos aplicados, solo inciden en el aumento de la temperatura de la probeta los ciclos iniciales, y luego se produce un rápido descenso de la temperatura. Esto puede ser debido a que en este escalón la mayor parte de la energía disipada esté produciendo la rotura de la muestra y no su calentamiento.

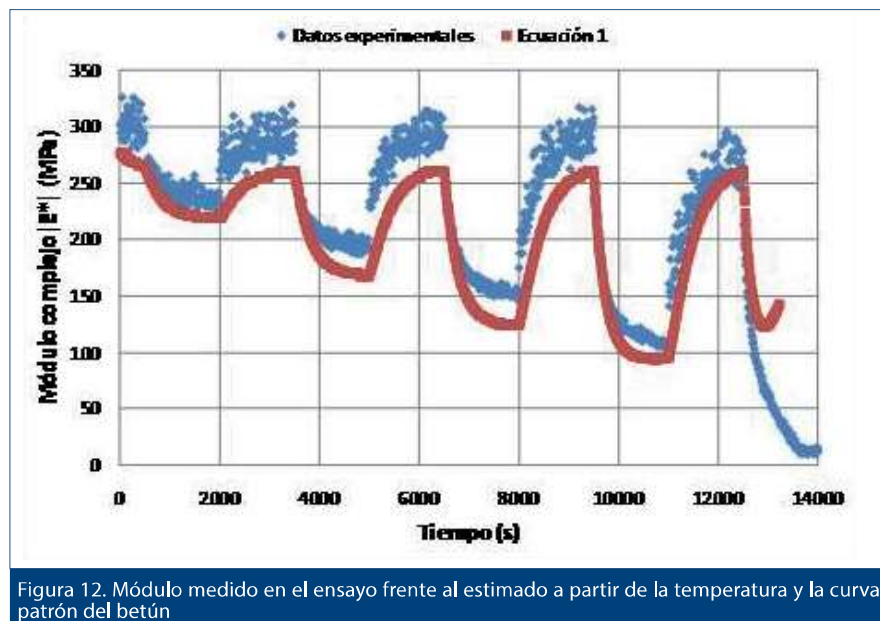


Figura 12. Módulo medido en el ensayo frente al estimado a partir de la temperatura y la curva patrón del betún

De este betún se ha obtenido su curva patrón que relaciona su módulo con la temperatura de ensayo, ecuación [1]. Esto ha permitido transformar la curva de evolución de temperaturas en una curva de módulos y comparar esta nueva curva de evolución de módulo con los módulos medidos durante el ensayo, Figura 12.

$$|E^*| = 780 \cdot 14 \cdot e^{-0.097T} \quad [1]$$

siendo:

T = Temp ($^{\circ}\text{C}$)

$|E^*|$ = [MPa]

Se aprecia una buena similitud y aproximación entre los valores estimados a través de la temperatura y los medidos experimentalmente. De acuerdo con esta gráfica se podría decir que ha sido la variación de temperatura la responsable de los cambios mecánicos y de rigidez observada durante el ensayo. Cuando aumenta la temperatura el módulo disminuye y cuando disminuye la temperatura se recuperan los valores iniciales del módulo de la muestra. Esta variación de temperatura explicaría también la respuesta tixotrópica de los betunes.

Siempre se ha admitido el comportamiento reológico simple de los betunes en que el efecto tiempo o velocidad de aplicación de carga y temperatura son intercambiables. Esto

sería una nueva muestra de este comportamiento, ya que podemos llegar a la misma respuesta mecánica del betún cambiando su temperatura o la velocidad de la deformación aplicada.

6. Aportaciones derivadas del estudio

El amplio estudio realizado en el Laboratorio de Caminos desde el desarrollo del ensayo EBADE ha servido para conocer mejor los mecanismos de deterioro en los ensayos de fatiga, y poner de manifiesto el importante papel que desempeña la energía disipada a lo largo del proceso. También ha tenido una consecuencia de tipo más práctico, implementar un procedimiento que permite estimar las leyes de fatiga de manera más rápida y eficiente. [2]. Otra consecuencia que también ha tenido el estudio es poner de manifiesto la enorme importancia que tiene la secuencia de las cargas aplicadas en los resultados obtenidos. [1]. Esto cuestiona la aplicación de las leyes de fatiga determinadas en ensayos cíclicos continuos para estimar la vida de fatiga de los pavimentos asfálticos, donde la aplicación de cargas tiene otra cadencia y es mucho más lenta, con amplios intervalos de tiempo, en algunos momentos, entre sucesivas aplicaciones de cargas.

6.1. Estimación de la ley de fatiga bajo cargas cíclicas continuas

El estudio realizado pone de manifiesto que la energía disipada tiene una gran incidencia en el proceso de fatiga. Esta energía es capaz de cambiar la temperatura en el interior de la muestra ensayada y producir en algunos casos su fallo.

Se observa que este fallo ocurre cuando la energía disipada va siempre decreciendo a lo largo del ensayo. Existen escalones en que la energía disipada se mantiene constante, aunque puede dar lugar a un cambio de módulo como consecuencia del aumento de la temperatura.

Esto puede observarse en la Figura 5, donde se ha representado la evolución del módulo respecto a la energía disipada para diferentes escalones de deterioro. En ella aparecen los resultados de los ensayos de barrido de tiempo, y se observa que solo fallan los que presentan una cierta pendiente en la relación energía-módulo. En estos casos, la energía disipada, bien por aumentar la temperatura o por microfisuración, va bajando el módulo y, por tanto, la energía disipada en el siguiente ciclo. Si continua este proceso iterativo se produce el fallo, con una caída más brusca del módulo hasta llegar a valores muy bajos.

Esto nos ha llevado a seleccionar, en los ensayos de barrido de deformaciones, dos escalones de deformación: uno que asociamos al no fallo, $\epsilon_{\text{no fallo}}$, en el que la energía disipada se mantiene constante; y otro al fallo rápido, $\epsilon_{\text{fallo rápido}}$, que se asocia con el escalón anterior al fallo del material en el ensayo EBADE. Asociando estas dos deformaciones con los niveles de ciclos abajo reseñados, se ha implementado un procedimiento para estimar las leyes de fatiga de materiales bituminosos bajo cargas cíclicas. [2].

$\epsilon_{\text{no fallo}}$: 10^7 aplicaciones de carga. Para esta deformación la mezcla soportaría infinitas aplicaciones de carga. Se ha considerado un número muy superior a la que suele ocurrir el

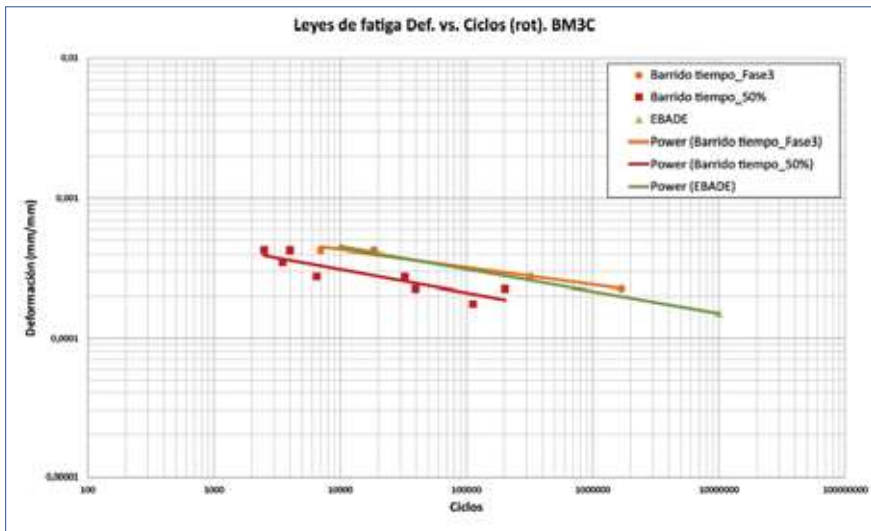


Figura 13. Leyes de fatiga estimadas por el procedimiento convencional y ensayo EBADE

fallo en los ensayos de laboratorio, entre 20 000 y $2 \cdot 10^6$ ciclos.

$\epsilon_{\text{fallo rápido}}: 10^4$ aplicaciones de carga. En ese escalón el material supera las 5000 aplicaciones de carga, aunque con un deterioro muy notable. En el siguiente escalón falla.

Las leyes así obtenidas, Figura 13, muestran una excelente similitud con las obtenidas en los ensayos de fatiga de barrido de tiempo, cuando se establece su fallo en la Fase III y no para el 50% de pérdida de tensión. Parecen más adecuadas estas leyes para caracterizar estos materiales que las usadas actualmente, ya que parten del fallo real del material y no del criterio del 50%. Por otra parte, el aplicar este procedimiento resultaría mucho más rápido y es una buena estimación de la respuesta de estos materiales.

6.2. Cadencia de las aplicaciones de carga

Otro de los fenómenos observados en el estudio es la rápida caída de módulo que experimentan estos materiales en los primeros ciclos de carga, y cómo se recupera esta pérdida de módulo al descender la deformación impuesta o detener el ensayo. Esto hizo pensar en que la secuencia de aplicación de carga podría tener un gran efecto en el proceso de deterioro. Se pueden aplicar las cargas de

forma continua y entrar en una fase de deterioro progresivo, o bien detener el ensayo, recuperarse el material, y volverlo a cargar controlando el deterioro. Si se deja un periodo entre ciclos de cargas y el deterioro de los nuevos ciclos no supera la recuperación habida, el material puede tener una vida mayor.

El efecto que puede tener la cadencia de las aplicaciones de carga se ha analizado en diferentes tipos de mezclas y en estos ensayos se ha podido observar como al aplicar un nivel de deformación de $200 \mu\text{m/m}$ que produce el fallo de la mezcla en 100 000 ciclos de carga cuando se aplica de forma continua, no se llega a la rotura del ma-

terial aplicando una serie de 200 ciclos de este mismo nivel de deformación e intercalando un reposo de 10 minutos entre ciclos, Figura 14.

Aunque la secuencia de carga puede que no sea la habitual de una carretera, el periodo de reposo o el número de cargas seguidas aplicadas puedan ser excesivos; los resultados de los ensayos muestran el importante efecto que tiene la alternancia de los periodos de reposo y carga.

De acuerdo con estos resultados no parece que las leyes de fatiga obtenidas a partir de ensayos cíclicos continuos de fatiga puedan ser aplicadas directamente en el cálculo de la vida a fatiga de los firmes, como se hace hoy día en los métodos analíticos: habría que considerar cómo es la secuencia de cargas. Por otra parte, tampoco se podría usar la ley de Miner para la suma de deterioros, ya que esto supone un deterioro asociado a cada aplicación de carga.

$$D = \sum d_i = \sum n_i / N_i$$

donde:

d_i : deterioros por las cargas tipo i

n_i : número de cargas tipo i

N_i : número de cargas tipo i para producir el fallo

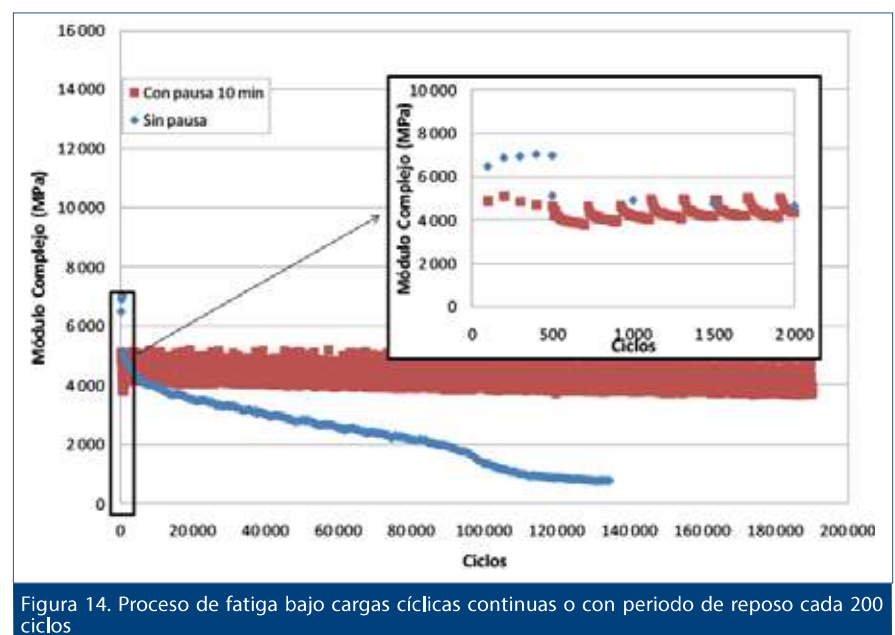


Figura 14. Proceso de fatiga bajo cargas cíclicas continuas o con periodo de reposo cada 200 ciclos

Estos resultados cuestionan ambos supuestos, ya que no se puede asociar un deterioro con una carga: este es el inverso del número de ciclos que aguanta esta carga en los ensayos de fatiga, N_f , 200 000 o infinito según la secuencia de cargas. Ni tampoco hay una suma continua de deterioros, cuando hay periodos de reposos entre ciclos de carga. En este caso desaparece el deterioro del ciclo anterior.

Conclusiones

Los estudios realizados en el Laboratorio de Caminos de la UPC sobre la respuesta de los materiales bituminosos bajo cargas cíclicas han servido para poder profundizar en el proceso de deterioro que va apareciendo, en estos materiales, al ir cambiando sus características en función de la energía disipada en cada ciclo. En este estudio se han deducido las siguientes conclusiones.

- No se debe diferenciar en los ensayos de fatiga la fase I de la fase II. Es un proceso continuo que está relacionado con la pérdida de energía disipada en cada ciclo de carga.
- La magnitud del descenso que experimenta el módulo en la fase inicial del ensayo está relacionado con el nivel de deformación aplicado. Respuesta no lineal de los materiales bituminosos.
- La respuesta de estos materiales en los ensayos cíclicos varía al cambiar el nivel de la deformación aplicada. Esto hace que recuperen sus propiedades mecánicas al disminuir la deformación aplicada o al detener el ensayo (self-healing). No obstante, si se continúa el ensayo se puede llegar a la fase III y al fallo del material, dependiendo del nivel de deformación aplicado.
- El ensayo EBADE permite estimar los niveles de deformaciones que no llegan a producir ningún tipo de deterioro, y los

que producen su rápido fallo. Esto permite estimar la ley de fatiga de forma más rápida y eficiente.

- En el ensayo de betunes con el proceso EBADE se ha podido medir el aumento de temperatura que se produce en su interior durante el proceso de fatiga. Esto lleva a considerar esta variación interna de la temperatura como un factor que explica el proceso de deterioro de los materiales bituminosos en los ensayos de fatiga, así como su recuperación al cambiar el nivel de deformación aplicada o detener el ensayo.

Al aplicar en los métodos analíticos las leyes de fatiga obtenidas en ensayos continuos obtendríamos unos valores mínimos para la vida de fatiga del firme. En el firme, el proceso de aplicación de cargas no es continuo y, como se ha puesto de manifiesto, cualquier periodo de reposo dará lugar a una recuperación y a un aumento de la vida del firme.

Bibliografía

- [1] Pérez-Jiménez, F., Botella, R., López-Montero, T., Miró, R., Martínez, A.H.; *Complexity of the behaviour of asphalt materials in cyclic testing. International Journal of Fatigue*, 98, pp. 111-120; 2017.
- [2] Botella, R., Pérez-Jiménez, F.E., Miro, R., Martínez, A.H.; *New methodology to estimate the fatigue behavior of bituminous mixtures using a strain sweep test. Construction and Building Materials*, 135, pp. 233-240; 2017.
- [3] Pérez-Jiménez, F.E., Botella, R., Miró, R., Martínez, A.H.; *Analysis of the thixotropic behavior and the deterioration process of bitumen in fatigue tests. Construction and Building Materials*, 101, pp. 277-286; 2015.
- [4] Botella, R., Pérez-Jiménez, F.E., Miró, R.; *Application of a strain sweep test to assess fatigue behavior of asphalt binders. Construction and Building Materials*, 36, pp. 906-912; 2012.
- [5] Pérez-Jiménez, F., Botella, R., Miró, R.; *Damage and thixotropy in asphalt mixture and binder fatigue tests. Transportation Research Record*, (2293), pp. 8-17; 2012.
- [6] Pérez-Jiménez, F.E., Botella, R., Miró, R.; *Differentiating between damage and thixotropy in asphalt binder's fatigue tests. Construction and Building Materials*, 31, pp. 212-219; 2012.
- [7] Pérez-Jiménez, F., Valdés, G., Miró, R., Botella, R., Campana, J.M.; *Effect of thermal stresses on fatigue behavior in bituminous mixes. Transportation Research Record*, (2210), pp. 90-96; 2011.
- [8] Pérez-Jiménez, F.; Miró, R.; Martínez, A.; Botella, R.; Reyes, O.; Valdés, G.; *False failure in flexural fatigue tests. 4PBB Workshop. Proceedings of the 2nd Workshop Four Point Bending Beam*. pp. 47-57; 2009.
- [9] Mangiafico, S., Sauzéat, C., Di Benedetto, H., Pouget, S., Olard, F., Planque, L.; *Quantification of biasing effects during fatigue test on asphalt mixes: Non-linearity, self-heating and thixotropy. Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, 84, pp. 143-180; 2015.
- [10] Hintz, C., Velasquez, R., Johnson, C., Bahia, H.; *Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification. Transportation Research Record*, (2207), pp. 99-106; 2011.
- [11] Di Benedetto, H., De la Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., Lundström, R.; *Fatigue of bituminous mixtures. Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 37 (267), pp. 202-216; 2004.
- [12] Kim, Y.-R., Little, D.N., Lytton, R.L.; *Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures. Journal of Materials in Civil Engineering*, 15 (1), pp. 75-83; 2003. ♦