

EFECTO DE LOS PERIODOS DE REPOSO EN LOS ENSAYOS CÍCLICOS DE MEZCLAS BITUMINOSAS

TERESA LÓPEZ-MONTERO

Universidad Politécnica de Cataluña
teresa.lopez@upc.edu

RAMÓN BOTELLA

Universidad Politécnica de Cataluña
ramon.botella@upc.edu

FÉLIX E. PÉREZ-JIMÉNEZ

Universidad Politécnica de Cataluña
edmundoperez@upc.edu

RODRIGO MIRÓ

Universidad Politécnica de Cataluña
r.miro@upc.edu

ADRIANA H. MARTÍNEZ

Universidad Politécnica de Cataluña
adriana.martinez@upc.edu

EFFECTO DE LOS PERIODOS DE REPOSO EN LOS ENSAYOS CÍCLICOS DE MEZCLAS BITUMINOSAS

RESUMEN

La estimación de la vida de un firme se suele basar en la combinación de las tensiones y deformaciones teóricas predichas por un modelo multicapa elástico lineal e isotrópico y la ley de fatiga de la mezcla bituminosa destinada a la capa de base del firme. Esta ley de fatiga relaciona la sollicitación impuesta al material con el número de ciclos de carga que debería soportar. La simplificación que se realiza consiste en considerar que el número de ciclos de carga que el material puede soportar no depende de la distribución de éstas en el tiempo, y por lo tanto, la mayoría de ensayos de fatiga se realizan distribuyendo homogéneamente en el tiempo dichos ciclos de carga. Sin embargo, la distribución horaria del tráfico en una carretera cualquiera es muy heterogénea.

Este trabajo muestra cómo el orden en el que se imponen las cargas a una mezcla bituminosa tiene una influencia capital en la resistencia a fatiga de la misma. Es decir, el número de ciclos que la mezcla puede soportar bajo un mismo nivel de carga depende fuertemente de cómo estas cargas se distribuyen en el tiempo. Para llevar a cabo este objetivo, se han realizado ensayos cíclicos de amplitud de deformación constante, con y sin periodos de reposo cada cierto número de ciclos de carga. Los resultados han mostrado, como el comportamiento del material depende más del régimen de sollicitación al que se ve sometido y de la duración de éste, que del número de ciclos de carga aplicados.

1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos a lo largo de su vida útil se encuentran sometidos a diversas sollicitaciones como el tráfico y las variaciones térmicas. Estas sollicitaciones hacen que el pavimento se encuentre sometido a ciclos de carga y descarga, los cuales provocan la fatiga del pavimento. En ingeniería de pavimentos, para predecir su vida a fatiga normalmente se recurre a la ley de fatiga de las mezclas bituminosas. Estas leyes de fatiga tienen la siguiente expresión:

$$\log N = a - b \cdot \log \epsilon$$

donde N es el número de aplicaciones de carga hasta producir el fallo por fatiga del material y ϵ es la deformación a la que se encuentra sometido el material en cada aplicación de carga.

Para obtener estas leyes de fatiga se realizan ensayos cíclicos a carga o deformación constante a diferentes niveles de sollicitación y se ajusta la ecuación 1 a los valores de deformación y número de ciclos hasta fallo, obtenidos en estos ensayos.

Sin embargo cuando una probeta de mezcla bituminosa se somete a una sollicitación cíclica de amplitud constante se obtiene una respuesta compleja que se puede dividir en tres fases, (Baaj y Di Benedetto, 2005):

- En la Fase I, también llamada etapa de adaptación, se produce un descenso importante y brusco del módulo dinámico que puede deberse al calentamiento interno de la mez-

cla, la tixotropía u otros fenómenos desconocidos.

- En la Fase II, también denominada fase de fatiga, el módulo decrece de forma lineal, con una pendiente mayor o menor en función de la amplitud de deformación aplicada.
- Por último, en la Fase III, denominada etapa de ruptura, se produce un descenso súbito del módulo debido a la interconexión de microfisuras, las cuales progresan rápidamente hasta el fallo total de la mezcla.

Los valores de número de ciclos hasta fallo estarán afectados pues, por la duración de estas tres fases, o procesos de reducción de la rigidez. No obstante, algunos de estos procesos tienen un carácter reversible (calentamiento y tixotropía) y otros no (daño, creación de micro y macro fisuras). Esto implica que el número de ciclos total hasta fallo dependerá de la secuencia o el tiempo en que estos ciclos carga sean aplicados al material. En otras palabras, la ley de fatiga descrita en la ecuación 1 omite la reversibilidad de algunos procesos de reducción de la rigidez.

En anteriores trabajos se ha observado un calentamiento importante durante ensayos de fatiga realizados sobre las mezclas (Lundström, *et al.*, 2004; Pronk, *et al.* 1996) y estudios llevados a cabo en betunes y mezclas han demostrado que el descenso del módulo observado en los ensayos cíclicos puede ser recuperado al reducir la amplitud de la sollicitación impuesta al material, lo cual es coherente con la teoría del aumento de la temperatura interna del material en ensayos cíclicos (Pérez-Jiménez, *et al.* 2012).

Además, las mezclas bituminosas se encuentran en el pavimento sometidas a un proceso de carga que no es continuo, habiendo un intervalo de tiempo grande entre el paso de un vehículo pesado y el siguiente. A esto hay que añadir el hecho de que los camiones no siguen la misma trazada, y por lo tanto, para que un camión pase dos veces por el mismo punto puede pasar aún un mayor periodo de tiempo. Por lo tanto, una acumulación de temperatura como la observada en los ensayos cíclicos

continuos de laboratorio es altamente improbable en campo. Es por este motivo que el estudio del efecto de los periodos de reposo en el comportamiento a fatiga de las mezclas debería ser considerado a la hora de analizar el comportamiento de las mezclas en campo.

Para analizar el grado de recuperación de las propiedades mecánicas de la mezcla cuando disminuye o cesa la sollicitación, se ha realizado, por una parte, un ensayo de barrido de deformaciones, ensayo EBADE, haciendo disminuir la deformación al finalizar cada uno de los escalones de carga del ensayo hasta el valor inicial, y por otra, un ensayo de barrido de tiempo manteniendo la amplitud de deformación constante e introduciendo periodos de reposo entre las series de carga, determinado en ambos casos la recuperación del módulo que se produce.

2. METODOLOGÍA

2.1 Ensayo EBADE

El ensayo EBADE (Pérez-Jiménez, *et al.* 2011) es un ensayo cíclico de tensión-compresión en el que se aplican series de ciclos de carga a una amplitud de deformación constante, cuyo valor aumenta progresivamente hasta que se produce el fallo del material. Cada amplitud de deformación considerada se ha denominado escalón de carga; el número de ciclos en cada escalón de carga se ha fijado en 5000 y la amplitud de deformación inicial es de 25 $\mu\text{m/m}$, aumentando en 25 $\mu\text{m/m}$ en cada escalón de carga. El ensayo se realiza a una frecuencia de 10 Hz.

Para la ejecución del ensayo EBADE se utiliza una probeta prismática con dos ranuras en su zona central para reducir el área de la probeta e inducir el fallo en su sección media. Las dimensiones de la probeta, aunque no son fijas, suelen ser de 5-6 cm de ancho, similar espesor y 6-9 cm de altura. Estas probetas son pegadas a unas placas de acero mediante una resina epoxi, que permite fijarlas a las mordazas de la prensa. En la zona de fallo previamente inducida se colocan dos extensóme-

tros, uno a cada lado de la probeta, para medir las deformaciones de la misma durante el ensayo (Figura 1).

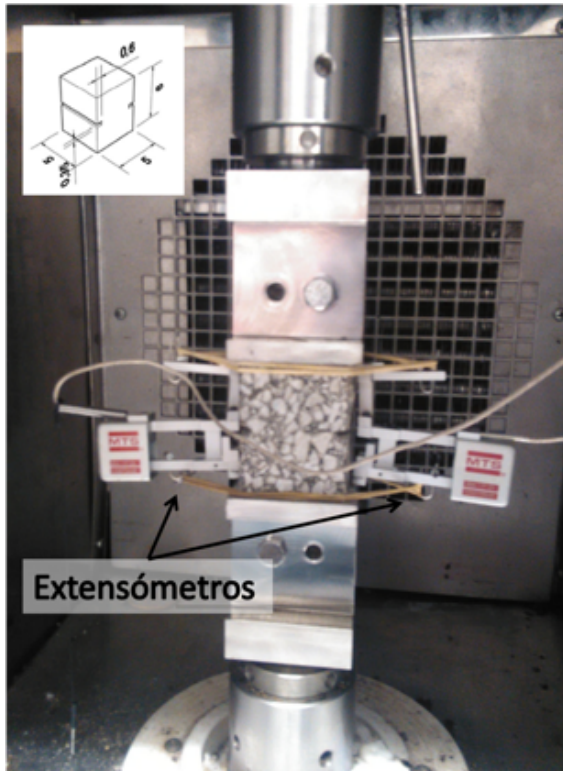


Figura 1. Configuración del ensayo EBADE (López-Montero y Miró, 2016).

Los parámetros más importantes que se pueden obtener a partir del ensayo son: la tensión máxima, σ_{max} , el módulo complejo, $|E^*|$, y la densidad de energía disipada, DED, durante cada ciclo, y su evolución con el número de ciclos.

$$\epsilon = \epsilon_{max} \sin(\omega t)$$

$$\sigma = \sigma_{max} \sin(\omega t + \delta)$$

$$|E^*| = \sigma_{max} / \epsilon_{max}$$

$$DED = 1/2 |(\sigma_1 \epsilon_2 + \sigma_2 \epsilon_3 + \dots + \sigma_{n-1} \epsilon_n + \sigma_n \epsilon_1) - (\sigma_2 \epsilon_1 + \sigma_3 \epsilon_2 + \dots + \sigma_n \epsilon_{n-1} + \sigma_1 \epsilon_n)|$$

donde ϵ y σ representan la señal de entrada de la deformación y la señal de salida de la tensión, respectivamente, y δ es el desfase entre ambas señales.

2.2 Plan de ensayos

Con objeto de analizar el grado de recuperación de las propiedades mecánicas de la mezcla cuan-

do disminuye o cesa la sollicitación, a partir del ensayo cíclico de tensión-compresión, se ha diseñado el siguiente plan de ensayos:

- En primer lugar, se aplicarán los sucesivos escalones de carga, en los que la amplitud de deformación va aumentando progresivamente (ensayo EBADE), pero al finalizar cada escalón de carga, la deformación se reducirá hasta el valor correspondiente al del primer escalón de carga, es decir, 25 $\mu\text{m}/\text{m}$ (Figura 2). Dado que el módulo que adopta la mezcla dependerá fundamentalmente del estado de sollicitación al que está sometida, con esta secuencia de cargas se pretende comprobar el grado de recuperación del mismo al bajar considerablemente la deformación. El tiempo de aplicación para cada amplitud de deformación es de 500 segundos (o 5.000 ciclos) para mantener la duración del ensayo dentro de límites prácticos. El ensayo se ha realizado a 20°C y 10 Hz.

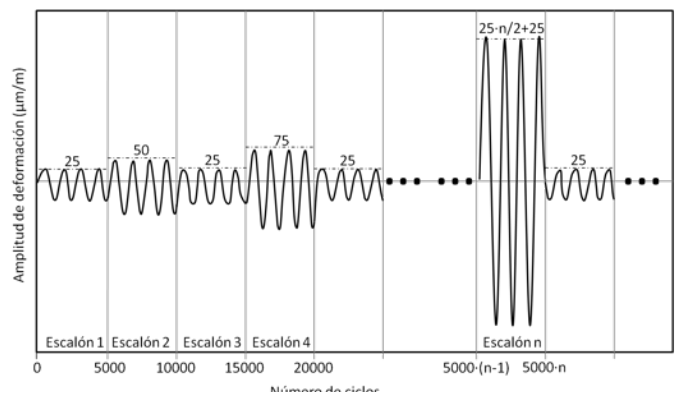


Figura 2. Esquema representativo del ensayo EBADE donde al finalizar cada escalón de carga la deformación vuelve a ser la del primer escalón.

- En segundo lugar, se evaluará el efecto de introducir periodos de reposo en un ensayo de barrido de tiempo, esto es, se aplicarán sucesivas series de 200 ciclos de carga, con una misma amplitud de deformación de 200 $\mu\text{m}/\text{m}$, dejando pasar un periodo de tiempo de 10 minutos entre cada serie de carga (Figura 3). Este periodo de reposo es suficientemente largo para que se pro-

duzca una disminución de la temperatura generada por la sollicitación precedente, pudiendo comprobar así si es posible la recuperación total del módulo inicial.

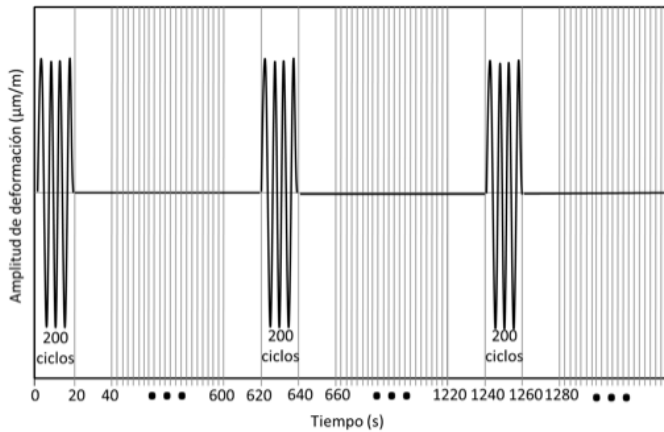


Figura 3. Esquema representativo del ensayo de barrido de tiempo introduciendo periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos de carga.

2.3 Materiales

Para el estudio llevado a cabo, se ha seleccionado una mezcla asfáltica discontinua (BBTM), con tamaño máximo de árido de 8 mm (Tabla 1) y fabricada con dos tipos de ligantes, uno convencional (50/70), de penetración 61 mm y punto de reblandecimiento 50,9°C, y otro modificado con polímeros (PMB 45/80-65) de penetración 57 mm, punto de reblandecimiento 65°C y recuperación elástica 88%. El contenido de ligante ha sido del 5% sobre el peso de la mezcla y el porcentaje de huecos promedio fue aproximadamente del 3,6% para la mezcla fabricada con betún 50/70 y del 3,3% para la mezcla fabricada con PMB 45/80-65.

Tamiz (mm)	11,2	8	5,6	4	2	0,5	0,063
% Pasa	100	95	52	22	20	12	5

Tabla 1. Granulometría de la mezcla BBTM8B.

3. RESULTADOS

La Figura 4 muestra la evolución del módulo obtenida para la mezcla fabricada con los dos ligantes (50/70 y PMB 45/80-65), así como la deformación

impuesta en el ensayo. En esta figura se observa que al disminuir la deformación hasta el valor inicial, los valores de módulo se recuperan. Sin embargo, no recuperan el valor inicial del módulo, ni tan solo para los niveles de deformación más bajos. Esto puede deberse a la corta duración de los escalones de deformación del ensayo (5.000 ciclos), la cual no permite que el material se enfríe en su totalidad después de haber sido calentado a una deformación más alta, o también puede deberse a que se produjeron cambios irreversibles en la mezcla durante los escalones de deformación más altos. Sin embargo, la tendencia observada en la evolución del módulo es una caída importante de este valor cuando la amplitud de deformación aumenta, seguida por un aumento notable cuando la amplitud de deformación disminuye.

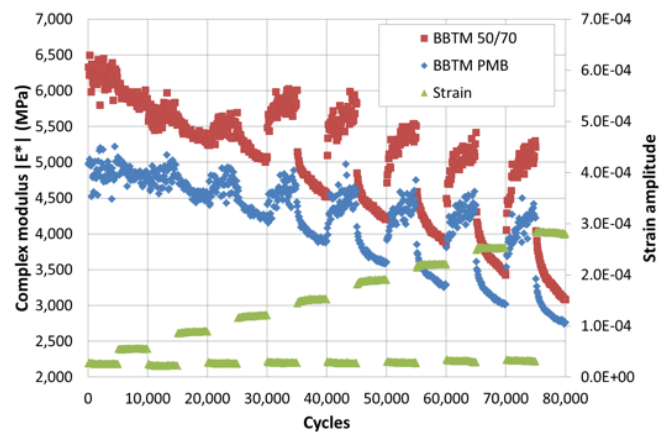


Figura 4. Evolución del módulo en un ensayo de barrido de deformaciones durante los primeros 80.000 ciclos. Ensayo a 20°C y 10 Hz.

La incorporación de una sonda termopar dentro de una probeta de mezcla asfáltica que permita analizar la temperatura en el interior de la probeta durante todo el ensayo representa un problema técnico. Si se hace durante su fabricación, la sonda puede ser triturada durante la compactación. Si se coloca una vez que la mezcla se ha endurecido, se requiere taladrado, lo que causaría un defecto en la mayor parte del material, incluso si se rellena después con ligante. En cualquier caso, la integridad de la sonda termopar puede verse comprometida.

Sin embargo, el ensayo de barrido de tiempo introduciendo periodos de reposo puede indicar

muy claramente si la pérdida del módulo es causada por *self-heating* o por cualquier otro fenómeno irreversible, es decir, daño. Ensayos sobre ligantes han mostrado que la temperatura aumenta durante la primera fase de los ensayos cíclicos hasta que se alcanza un régimen estacionario. Si la amplitud de la deformación es suficientemente alta, la temperatura de estabilización en un cierto punto de la probeta de mezcla aumenta más allá de un límite para el cual esta zona se convierte en un defecto que causa el fallo. ¿Qué pasaría si se aplica la misma amplitud de deformación, pero antes de que se alcance la temperatura de estabilización, se detiene el ensayo y se deja enfriar la probeta antes de volver a arrancar? Si es sólo el aumento de temperatura el que está causando el fallo, entonces el ensayo podría continuar indefinidamente, siempre y cuando no se alcance este umbral de temperatura.

La Figura 5 muestra la evolución del módulo complejo al introducir periodos de reposo en el ensayo de barrido de tiempo, realizado a una deformación de 200 $\mu\text{m}/\text{m}$, a una temperatura de 20°C y a una frecuencia de 10 Hz, para la mezcla fabricada con el ligante convencional. El período de reposo aplicado es de 10 minutos cada 200 ciclos. Los resultados obtenidos se han comparado con los obtenidos en un ensayo de fatiga clásico sin periodos de reposo, en el que se ha aplicado continuamente la misma amplitud de deformación. Como se puede observar, el efecto de introducir periodos de reposo ha sido muy importante si se compara con el proceso de deterioro en el cual se mantiene la sollicitación de forma continuada (ensayo de barrido de tiempo). En el caso del ensayo clásico de barrido de tiempo con una misma deformación, se observa cómo se produce una caída importante del módulo, correspondiente a la fase I, para después continuar el deterioro de forma continuada e importante, fase II, hasta que en pocos ciclos se produce el fallo total de la mezcla. Al introducir periodos de reposo, se observa que el módulo decrece muy rápidamente al aplicar la sollicitación durante los 200 ciclos. Sin embargo, al llegar al periodo de reposo el módulo se recupera, para nuevamente volver a bajar en los siguientes 200

ciclos de sollicitación. Al final de los 200 ciclos el estado de deterioro de la mezcla es similar al producido en los 200 primeros ciclos del barrido de tiempo sin periodos de reposo, sin que apenas se incremente el deterioro. Es decir, a diferencia del ensayo de barrido de tiempo sin periodos de reposo, al ir aplicando estas secuencias de paradas y ciclos de carga se observa que, durante los periodos de reposo, el deterioro producido en la serie de carga anterior se recupera, y el daño producido en la siguiente serie de carga es prácticamente el recuperado. Esto está indicando que es posible aplicar un mayor número de cargas sin llegar a producir el fallo de la mezcla. Mangiafico, *et al.* (2015) pudieron medir el cambio de temperatura dentro de una muestra de mezcla bituminosa y encontraron resultados similares en un ensayo similar, observando un aumento de la temperatura durante los ciclos de carga y una disminución a la temperatura original durante el reposo.

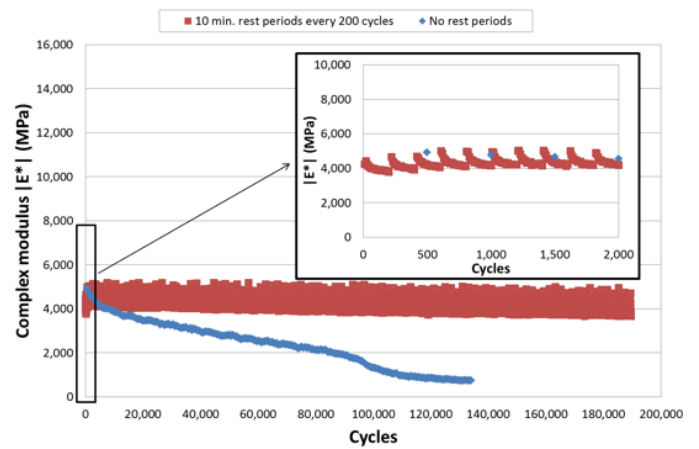


Figura 5. Comparación del módulo en el ensayo con y sin periodos de reposo. Mezcla BBTM con ligante 50/70. Ensayo a 20°C y 10 Hz. Amplitud de deformación 200 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Los resultados mostrados en la Figura 5 no sólo indican que existe una alta probabilidad de que el fenómeno de *self-heating* cause la mayor parte de la pérdida de módulo observada durante los ensayos cíclicos en mezclas asfálticas, sino que cuestiona la validez de la ley de Miner del concepto de ley de fatiga para este tipo de materiales.

4. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo ha sido estudiar el efecto de la introducción de periodos de reposo en el proceso de fatiga de una mezcla bituminosa discontinua tipo BBTM. Para ello, se ha realizado un ensayo con una configuración similar al ensayo EBADE, donde la deformación al finalizar cada uno de los escalones de carga considerados en el ensayo EBADE baja hasta la deformación inicial del ensayo manteniéndose durante 5.000 ciclos. Además, se ha estudiado el efecto de añadir periodos de reposo en un ensayo clásico de fatiga donde la deformación permanece constante durante todo el ensayo.

Los resultados obtenidos en este trabajo ponen de manifiesto la importancia de considerar la secuencia de la aplicación de sollicitaciones en los ensayos de fatiga, ya que no es lo mismo aplicarlos de forma rápida y continuada (como es el caso de los ensayos de fatiga actuales) que aplicarlos de forma más lenta (como ocurre en el firme de una carretera).

Al comparar el efecto de los periodos de reposo en el comportamiento de la mezcla al someterla a un proceso de fatiga se puede concluir que existe una alta probabilidad de que el fenómeno de *self-heating* cause la mayor parte de la pérdida de módulo observada en los ensayos cíclicos en mezclas asfálticas, cuestionando la validez de la ley de Miner sobre el concepto de ley de fatiga para este tipo de materiales.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad (España) la ayuda recibida para la realización del proyecto RESTPER (BIA2015-67494-P), desarrollado dentro del Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia, Subprograma Estatal de Generación de Conocimiento, convocatoria 2015, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016, cofinanciado por la Unión Europea, a través de fondos FEDER, con el

objetivo principal de *Promover el desarrollo tecnológico, la innovación y una investigación de calidad*, así como la concesión de la beca FPI (BES-2013-065678). Los autores también desean agradecer a la empresa CEPSA el suministro y la caracterización de los betunes utilizados en este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

H. Baaj y H. Di Benedetto. "Effect of Binder Characteristics on Fatigue of Asphalt Pavement using an intrinsic damage approach". *Road materials and Pavement Design*, 6, pp. 147-174, 2005.

R. Lundstrom, J. Ekblad y U. Isacson. "Influence of hysteretic heating on asphalt fatigue characterization". *Journal of Testing and Evaluation*, 32(6), 484-493, 2004.

A.C. Pronk, R.L. Krans y F. van Gogh. "Temperature increase in an asphalt beam during fatigue". *Theory and practice. Proceedings of Wegbouwkundige Werkdagen, CROW, Ede. ISBN 90-6628-221-5*, 1996.

F.E. Pérez-Jiménez, R. Botella y R. Miró. "Differentiating between damage and thixotropy in asphalt binder's fatigue tests". *Construction and Building Materials*, 31, pp. 212-219, 2012.

Félix Pérez-Jiménez, Gonzalo Valdés, Rodrigo Miró, Ramón Botella y Juan Campana. "Effect of thermal stresses on fatigue behavior in bituminous mixes". *Transportation Research Record*, 2210, pp. 90-96, 2011.

Teresa López-Montero y Rodrigo Miró. "Differences in cracking resistance of asphalt mixtures due to aging and moisture damage". *Construction and Building Materials*, 112, pp. 299-306, 2016.

S. Mangiafico, C. Sauzéat, H. Di Benedetto, S. Pouget, F. Olard y L. Planque. "Quantification of biasing effects during fatigue tests 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.