

## PERIODOS DE REPOSO Y CALENTAMIENTO INTERNO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Ramón Botella<sup>1</sup>, Félix E. Pérez Jiménez<sup>2</sup>, Teresa López-Montero<sup>3</sup>, Rodrigo Miró<sup>4</sup>, Adriana H. Martínez<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España, ramon.botella@upc.edu

<sup>2</sup> Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España, eduardo.perez@upc.edu

<sup>3</sup> Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España, teresa.lopez@upc.edu

<sup>4</sup> Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España, r.miro@upc.edu

<sup>5</sup> Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España, adriana.martinez@upc.edu

### Resumen

Los ensayos cíclicos son el método más común para caracterizar el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas. Los conceptos heredados del estudio de la fatiga en otros materiales, como el acero, han dominado las líneas de investigación que abordan este problema. Por lo tanto, la mayoría de los procedimientos desarrollados para caracterizar el comportamiento a fatiga de estos materiales se basan en encontrar el número de ciclos hasta fallo a cualquier sollicitación en ensayos cíclicos a altas frecuencias. Sin embargo, el complejo comportamiento de los ligantes, y por lo tanto las mezclas bituminosas, bajo cargas cíclicas, hace que sea completamente inadecuado usar este tipo de razonamiento para tratar de simular el comportamiento de las mezclas en el campo.

Este artículo presenta un estudio enfocado a manifestar la importancia de los fenómenos reversibles que tienen lugar en los ensayos cíclicos de mezclas. Se diseñaron varios ensayos para cuantificar la importancia de estos fenómenos, centrándose especialmente en el calentamiento debido a la disipación viscosa durante el ciclado. Los resultados mostraron que la disminución en la rigidez observada durante las pruebas cíclicas de alta frecuencia, y normalmente asumida como daño por los procedimientos convencionales de caracterización de fatiga, es en realidad causada por fenómenos reversibles que son característicos de los materiales visco-elasto-plásticos en estas condiciones (calentamiento, tixotropía, no linealidad y autorreparación).

**Palabras Clave:** mezcla asfáltica, fatiga, calentamiento, tixotropía, ensayos cíclicos, barrido de deformaciones.

### 1 Introducción

Los ensayos cíclicos son el método más común para caracterizar el comportamiento de fatiga de las mezclas asfálticas. Los conceptos heredados del estudio de la fatiga de otros materiales, como el acero, han dominado las líneas de investigación que abordan este problema. Por lo tanto, la mayoría de los procedimientos desarrollados para caracterizar el comportamiento a fatiga de estos materiales se basan en encontrar el número de ciclos hasta el fallo para cualquier amplitud de carga, deformación o desplazamiento utilizando ensayos cíclicos a altas frecuencias. Es decir, hallar la ley de fatiga del material.

Esta ley de fatiga, que no es más que una relación empírica sin justificación teórica, se obtiene en laboratorio a partir de pruebas cíclicas a sollicitación constante. Se deben realizar varios ensayos a diferentes niveles de sollicitación para obtener la ley de fatiga. Estos ensayos se conocen como barridos de tiempo. La evolución de la rigidez durante estos ensayos se ha dividido clásicamente en tres fases [1]. En la fase I, se observa una disminución rápida e importante del módulo dinámico. En la fase II, el módulo disminuye linealmente y la pendiente de esta disminución dependerá de la amplitud de sollicitud aplicada. Finalmente, en la fase III se observa una disminución repentina del módulo. Esta fase es normalmente asociada con la falla total del material.

La mayoría de los métodos que tratan de caracterizar el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas se basan en obtener el número de ciclos necesario para alcanzar la fase III para cada nivel de

solicitud, en barridos de tiempo. Este enfoque supone que toda la reducción de la rigidez observada durante los ensayos cíclicos está asociada con el daño. Sin embargo, varios estudios han demostrado que los materiales asfálticos experimentan cambios reversibles en la rigidez durante las pruebas cíclicas [2, 3]. En 2012, Pérez-Jiménez, et al., al utilizar por primera vez en betunes un ensayo uniaxial de barrido de deformaciones alternativas, mostró que la gran parte de la reducción de la rigidez observada en los ensayos cíclicos de estos materiales se puede recuperar al reducir la amplitud de la deformación. aplicada [4, 5]. En el mismo estudio, se demostró que el valor de la estabilización de la rigidez durante el ciclado era independiente de la historia de carga anterior, dando más peso a la importancia de los fenómenos reversibles.

Desde entonces, muchos investigadores se han centrado en cuantificar la importancia de los fenómenos reversibles [6–9], demostrando que ignorarlos en la caracterización de la fatiga de las mezclas puede llevar a conclusiones erróneas o clasificaciones inexactas con respecto a su desempeño final en campo. En 2015 Pérez-Jiménez et al. [10], al comparar los resultados de un nuevo ensayo de barrido de tiempo y deformaciones para ligantes [11], concluyó que la relación entre el módulo complejo y la densidad de energía disipada fue lineal durante la fase I y II, cuestionando la supuesta diferencia en comportamiento entre ambas fases. Además, se encontró una relación lineal entre el cambio de módulo con los ciclos y el cambio de energía con el módulo. Esta relación lineal fue característica de cada betún a una temperatura y frecuencia determinadas y podría usarse para predecir la tasa de deterioro en un ensayo de barrido de tiempo, utilizando ensayos de barrido de deformaciones mucho más cortos.

Entre los fenómenos irreversibles que pueden afectar los ensayos cíclicos de materiales asfálticos, el más fácil de medir experimentalmente es el calentamiento. Por eso en 2017, Botella et al. [12] llevó a cabo un ensayo cíclico de barrido de deformaciones alternativas en probetas de betún con sondas termopar en el interior. Los resultados mostraron que el aumento de la temperatura durante el ciclado era muy importante y podía explicar hasta el 90% de la reducción de la rigidez observada experimentalmente. En el mismo proyecto de investigación, la misma configuración de ensayo se aplicó a mezclas que mostraron una recuperación importante en la rigidez, lo cual sería consistente con el calentamiento. Sin embargo, los investigadores no pudieron medir los aumentos de temperatura dentro de las muestras de la mezcla. Esto fue realizado previamente por otros investigadores [13, 14] que pudieron medir el cambio de temperatura dentro de una probeta de mezcla bituminosa al introducir períodos de reposo. Se observó un aumento de la temperatura durante los ciclos de carga seguido de una disminución a la temperatura original durante el período de reposo.

Estos resultados en betunes se acompañaron con el modelado numérico de estos fenómenos en betunes y mezclas. Riahi et al. [7, 15] modelaron el aumento de temperatura en una mezcla durante el ciclado utilizando un modelo numérico heterogéneo en el que los áridos y el mástico presentaban diferentes propiedades térmicas. Al utilizar la densidad de energía disipada predicha localmente como fuente de calor, se obtuvo una estimación del aumento de temperatura de la muestra y el módulo complejo resultante. La conclusión de este estudio fue que el cambio de temperatura en la mezcla podría explicar un tercio de la reducción de la rigidez.

Siguiendo esta línea de investigación, este trabajo presenta los esfuerzos para cuantificar la importancia de los fenómenos reversibles que tienen lugar en los ensayos cíclicos de mezclas de bituminosas, centrándose en el calentamiento interno debido a la disipación viscosa. Se diseñaron diferentes tipos de ensayos con períodos de reposo y cambios alternativos de amplitud de deformación para cuantificar el aumento de temperatura interna, su importancia y la contribución total de todos los fenómenos reversibles a la reducción de la rigidez durante los ensayos cíclicos. Estos resultados se compararon con las propiedades térmicas y termo-mecánicas de las mezclas para confirmar la importancia del calentamiento

## 2 Metodología

Todos los ensayos llevados a cabo en este proyecto de investigación se realizaron utilizando la configuración EBADE (Ensayo de BArrido de DEformaciones), Figura 1. El EBADE es un ensayo de barrido de deformaciones por compresión uniaxial que utiliza probetas prismáticas con una muesca en dos de sus caras planas. Se realizaron cuatro tipos diferentes de ensayos, barridos de tiempo

convencionales, barridos de tiempo con períodos de reposo, barridos de deformaciones incrementales con el retorno al nivel de deformación más bajo y barridos de frecuencias. Todos ellos a deformación controlada. La mezcla empleada fue una BBTM8A (granulometría discontinua), de acuerdo con los estándares europeos, con un contenido de ligante del 5% en la masa de la mezcla y un betún de penetración 50/70. A partir de ahora, la mezcla de estudio se denominará mezcla 50/70.

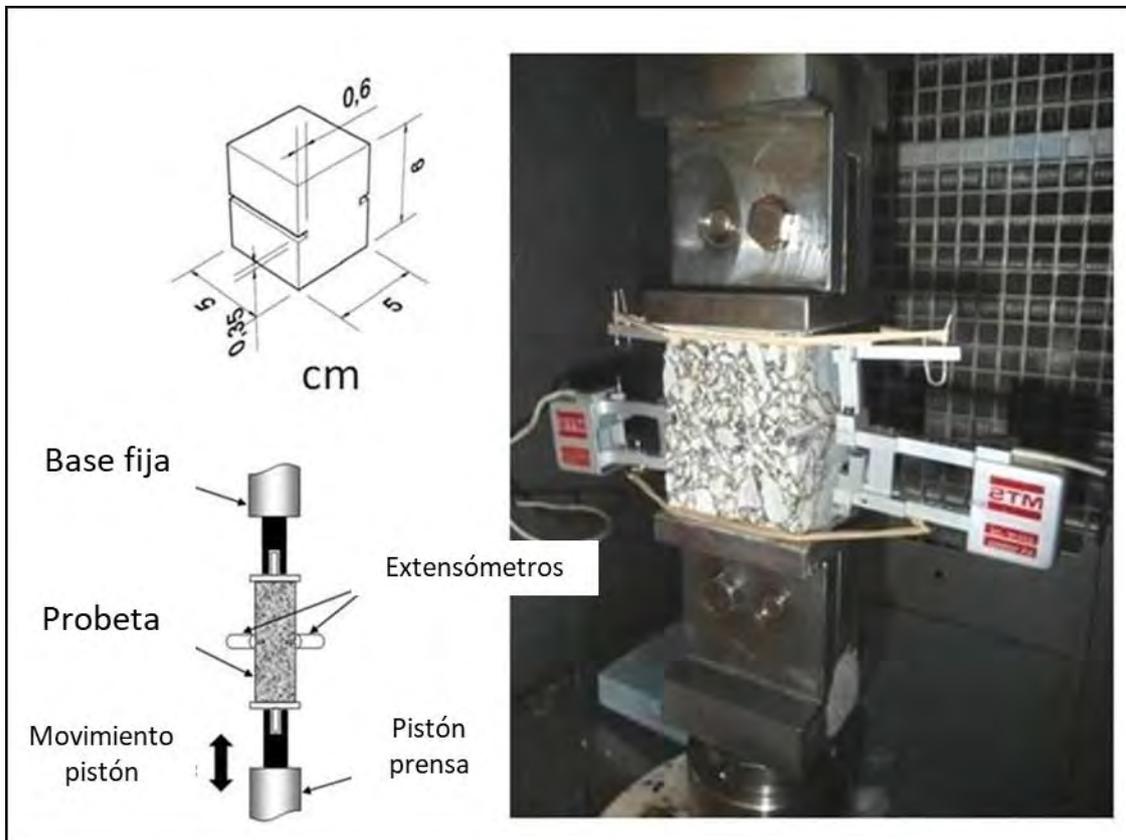


Figura 1. Configuración EBADE.

### 3 Resultados

Esta sección está dividida en tres subsecciones. En la primera subsección, las mediciones de temperatura en los barridos de tiempo sin períodos de reposo se comparan con los resultados de susceptibilidad a la temperatura obtenidos para la mezcla 50/70. En la segunda subsección, el efecto de los períodos de reposo se analiza comparando los resultados de los barridos de tiempo con y sin períodos de reposo obtenidos para la mezcla 50/70. En la tercera subsección, los resultados obtenidos en los barridos de deformaciones incrementales con el retorno al nivel de deformación más bajo se analizan para la mezcla 50/70 a 20°C y 10 Hz.

#### 3.1 Susceptibilidad a la temperatura y calentamiento

La Figura 2 muestra la evolución del módulo complejo y la temperatura dentro de la probeta de la mezcla 50/70 durante un barrido de tiempo a 20°C y 10 Hz a una amplitud de deformación de 225 microdeformaciones.

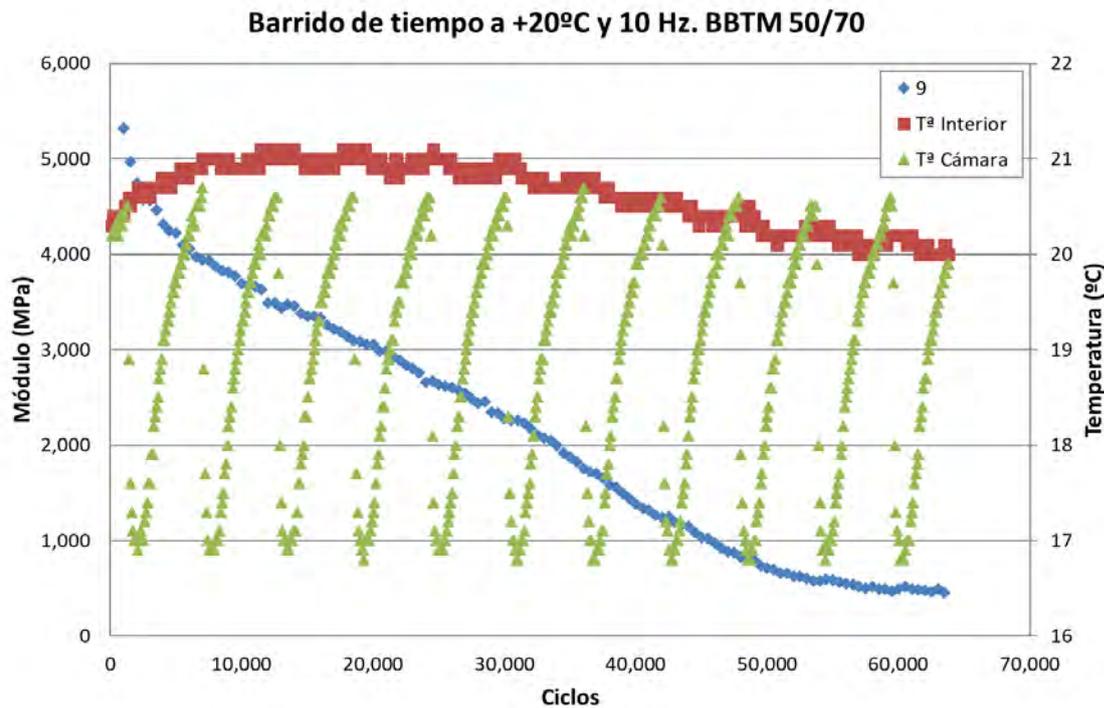


Figura 2. El módulo complejo y evolución de la temperatura interior durante un barrido de tiempo a 20°C, 10 Hz y 225 microdeformaciones.

Antes de comenzar el barrido de tiempo a 225 microstrains, se aplican 500 ciclos a la muestra al nivel de deformación más bajo posible para el equipo de ensayo, es decir, 25 microdeformaciones. Este acondicionamiento inicial se usa para obtener un módulo complejo y ángulo de fase fiable para la comparación entre diferentes réplicas probadas a diferentes niveles de deformación. El grupo de puntos azules entre 7.000 y 8.000 MPa (7.530 MPa en promedio) representa los datos obtenidos durante este acondicionamiento inicial. La temperatura interior se mantuvo constante a 20.4°C durante este acondicionamiento inicial. El primer valor registrado a 225 microdeformaciones para el ciclo 1.000, 500 ciclos después de comenzar la prueba con el nivel de deformación objetivo, fue un 30% más bajo que el módulo registrado a las 25 microdeformaciones.

Durante los primeros 10.000 ciclos, la temperatura interior experimentó un aumento relativamente rápido que se detuvo en 21.1°C, y luego fluctuó entre este valor y 20.8°C hasta el ciclo 32.500. En este momento, el módulo complejo había experimentado una disminución del 72% con respecto al valor de 25 microdeformaciones y del 40% del valor del módulo a 500 ciclos a 225 microdeformaciones. Por lo tanto, según el criterio de fallo convencional, la probeta ya habría fallado.

El aumento de temperatura registrado fue muy bajo, inferior a 1°C. La curva maestra obtenida para esta mezcla usando la misma configuración de carga no predijo la disminución del módulo complejo observado, figura 3.

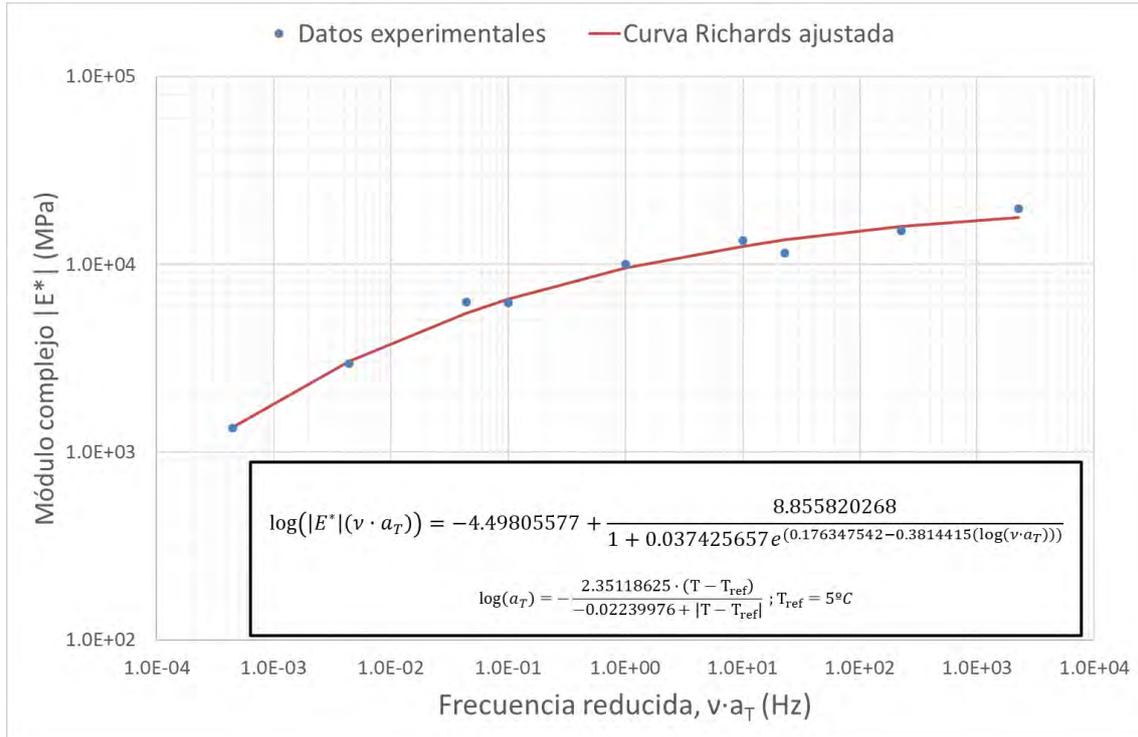


Figura 3. Curva maestra obtenida para la mezcla 50/70 utilizando la configuración EBADE.

Una posible explicación a la diferencia entre la temperatura interna medida y la correspondiente los módulos obtenidos según la curva maestra puede ser la siguiente. La sonda de termopar se insertó en un agujero taladrado en la probeta. Como la gran parte de la mezcla en volumen son áridos, el ligante representa menos del 12% del volumen con respecto a estos, existe una gran probabilidad de que la punta de sonda esté rodeada de árido. Los áridos son en su mayoría elásticos, por lo que solo pueden calentarse por fricción con otros áridos, o por contacto con el asfalto hipotéticamente calentado, pero los movimientos relativos entre ellos deben ser muy pequeños. Además, es prácticamente imposible hacer un orificio en el espécimen que asegure que la punta del termopar caiga sobre la matriz de mástico, que es el material que puede experimentar el calentamiento por disipación viscosa [11].

### 3.2 Barridos de tiempo con y sin periodos de reposo

Los barridos de tiempo con y sin periodos de reposo se llevaron a cabo a 20°C y 10 Hz y dos amplitudes de deformación diferentes, es decir, 200 y 225 microdeformaciones. Los periodos de reposo introducidos en el ensayo de 200 microdeformaciones consistieron en 10 minutos cada 200 ciclos, mientras que en el ensayo de 225 microdeformaciones fueron de 5 minutos cada 200 ciclos. La evolución del módulo complejo durante los ensayos con y sin periodos de reposo se muestra en las figuras 4 y 5.

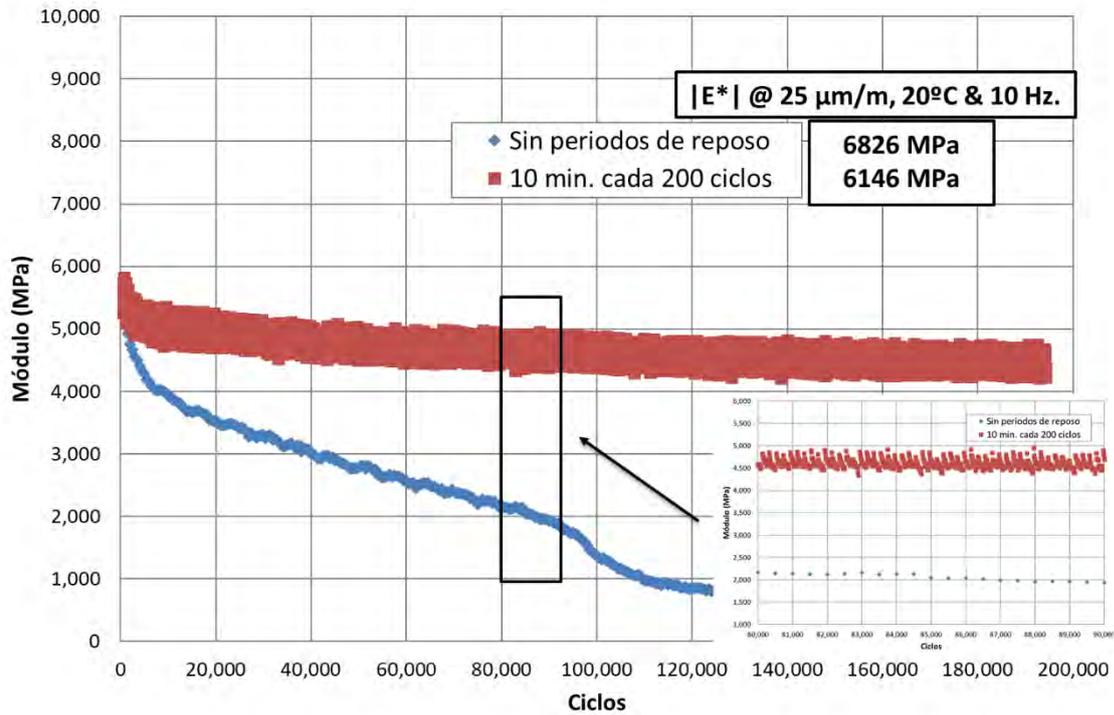


Figura 4. Barrido de deformaciones a 200 microdeformaciones, 20°C y 10 Hz con y sin periodos de reposo.

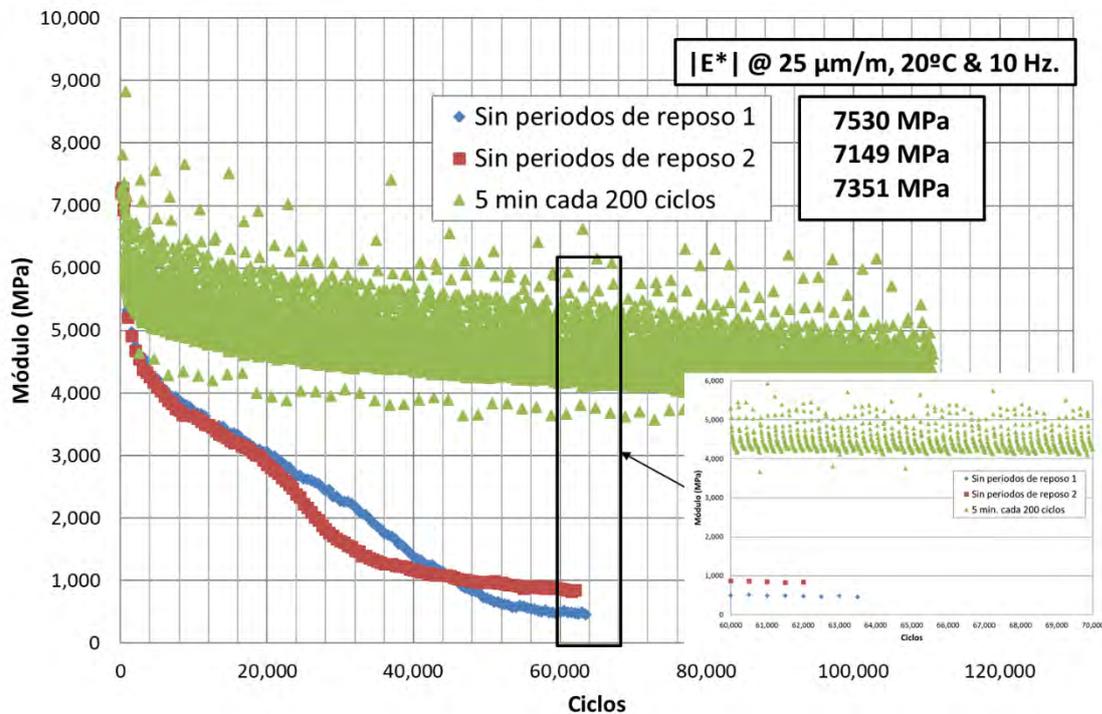


Figura 5. Barrido de deformaciones a 225 microdeformaciones, 20°C y 10 Hz con y sin periodos de reposo.

Las diferencias en la evolución del módulo complejo durante barridos de tiempo con y sin períodos de reposo fueron obvias, como muestran las figuras 4 y 5.

Los barridos de tiempo a 200 y 225 microdeformaciones causaron el fallo de las muestras aproximadamente a 100.000 y 30.000 ciclos, respectivamente. Sin embargo, no se alcanzó el fallo en ninguno de los ensayos realizados con períodos de reposo. Además, la disminución de la rigidez observada fue mucho menor. Es interesante observar el comportamiento del módulo complejo dentro de cada bloque de 200 ciclos entre períodos de reposo. La diferencia entre el módulo al comienzo y al final de cada bloque de 200 ciclos es de alrededor de 350 MPa para el ensayo a 200 microdeformaciones y alrededor de 700 MPa para el ensayo a 225 microdeformaciones. La forma de la curva del módulo complejo frente a los ciclos para cada bloque de 200 ciclos podría ajustarse con mucha precisión mediante una expresión de decaimiento exponencial, que típicamente representa el fenómeno de cambio de rigidez reversible. El calentamiento de la matriz de mástico de la probeta debido a la disipación viscosa durante el ciclado seguido del proceso de enfriamiento durante el reposo explicaría este tipo de comportamiento. La tixotropía y los efectos no lineales asociados con el alto nivel de tensión aplicado también podrían desempeñar un papel importante en esta recuperación. La autorreparación de las grietas también puede producir ese efecto, pero estudios anteriores han demostrado que sus efectos son muy inferiores a las recuperaciones observadas en estos ensayos, sobre todo a temperaturas 20°C y sin presión de cierre de la grieta [16, 17].

### 3.3 Barridos de deformaciones

Los barridos de deformaciones con retorno al nivel de deformación más bajo se realizaron a 20°C y 10 Hz en probetas de mezcla 50/70. Se fijó un nivel máximo de deformación para cada uno de los ensayos realizado: 150 y 275 microdeformaciones. Una vez que se alcanzó la deformación máxima, se mantuvo durante 5,000 ciclos y a continuación la amplitud de deformación se redujo a 25 microdeformaciones indefinidamente. Los ensayos se detuvieron después de confirmar que los valores del módulo complejo se estabilizaron. El objetivo de prolongar el ciclo a baja tensión después de alcanzar una amplitud de esfuerzo relativamente alta fue dejar que la muestra se enfriara a la temperatura de ensayo inicial, suponiendo un calentamiento hipotético durante el ciclado, figura 6

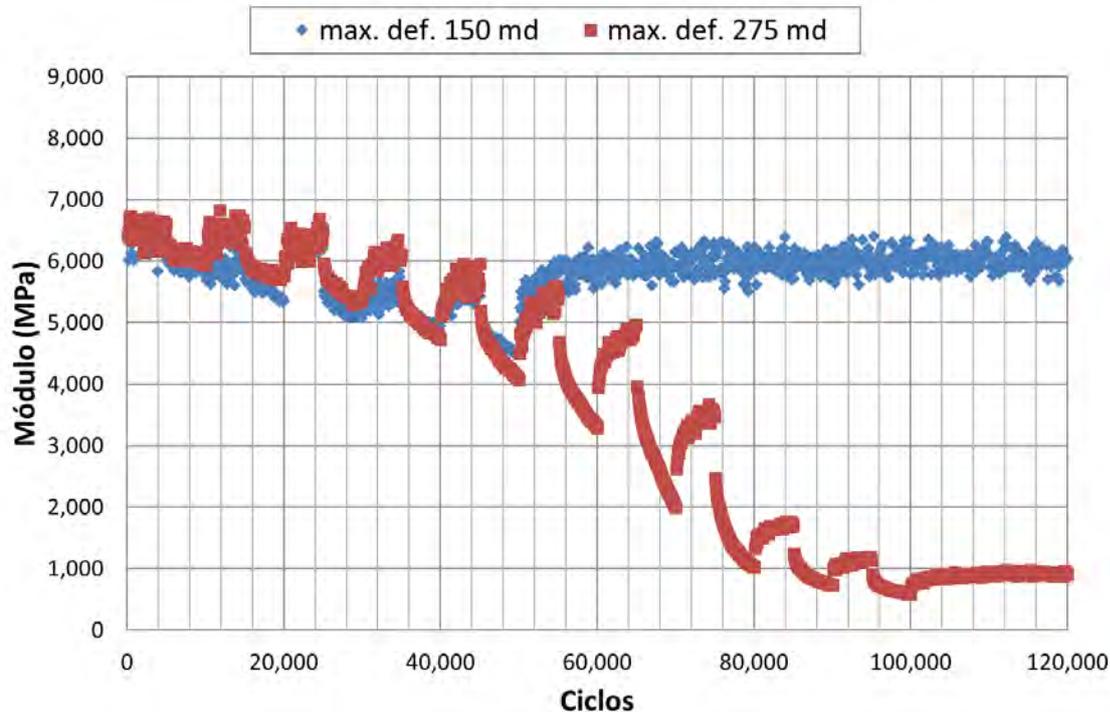


Figura 6. Barridos de deformaciones a 20°C y 10 Hz en la mezcla 50/70 con deformación máxima limitada a 150 y 275 microdeformaciones.

La Figura 6 muestra cómo ambas réplicas muestran el mismo comportamiento hasta 50.000 ciclos. La alternancia entre los niveles de deformación alta y baja se observa claramente en la gráfica, es decir, en las deformaciones altas, el módulo complejo cae después siguiendo un decaimiento exponencial, mientras que en las deformaciones bajas el módulo complejo aumenta después siguiendo una curva logarítmica. Este tipo de comportamiento es característico de los cambios de temperatura [11], como lo es la apertura de grietas y el sellado de grietas asociado con las capacidades de autorreparación del ligante. Sin embargo, a 20°C y 10 Hz, la capacidad de fluencia del ligante puede reducirse significativamente, lo que hace que sea muy difícil volver a pegar las grietas previamente abiertas. Es bastante interesante observar cómo la reducción indefinida de la amplitud de deformación después de 50.000 y 100.000 ciclos produjo dos resultados muy diferentes. La probeta que no experimentó deformaciones superiores a 150 microdeformaciones recuperó casi por completo la rigidez inicial (durante los primeros 5,000 ciclos el módulo promedio fue de 6.313 MPa y desde el ciclo 80.000 hasta 700.000 el valor promedio fue de 5.992 MPa). Por otro lado, la probeta que soportó deformaciones de 225 microdeformaciones no recuperó la rigidez inicial en absoluto. De hecho, entre 65.000 y 70.000 ciclos (200 microdeformaciones) la caída del módulo fue mucho mayor que en los escalones anteriores y su forma fue más cercana a una caída lineal que a una caída exponencial.

#### 4 Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo fue cuantificar la importancia de los fenómenos reversibles que tienen lugar en los ensayos cíclicos de mezclas bituminosas, con especial atención a la importancia del calentamiento del material debido a la disipación viscosa. El calentamiento durante el ciclado es muy importante en los ligantes [10–12], por lo tanto, debe esperarse que también lo sea en las mezclas asfálticas.

Las mediciones de la temperatura interna de las probetas durante los barridos de tiempo utilizando la configuración EBADE mostraron un aumento de la temperatura muy reducido. Las temperaturas registradas no pudieron explicar la reducción del módulo complejo. Sin embargo, la heterogeneidad de la mezcla y el diferente comportamiento termo-mecánico de los áridos y el ligante hacen muy difícil

obtener una temperatura promedio de la muestra. De todos modos, la mezcla obtiene su cohesión de la mástico, por lo tanto, la temperatura de éste es más importante que la temperatura promedio de toda la muestra. Si el mástico experimentara carga cíclica podría aumentar su temperatura muy rápidamente y reducir su rigidez [10–12]. Este aumento en la temperatura del mástico no afectaría la temperatura de los áridos, ya que solo su superficie se calentaría por conducción y su porosidad los convierte en malos conductores térmicos. Dado que la relación de volumen de betún con respecto a los áridos es tan baja, un aumento en la temperatura del mástico no afectaría mucho la temperatura promedio de la probeta. Las simulaciones que siguen esta línea concluyen que el calentamiento explicó un tercio de la reducción de la rigidez [12].

Fue imposible demostrar que el calentamiento debido a la disipación viscosa es la razón principal de la reducción de la rigidez. Los resultados no pudieron diferenciar entre calentamiento y curación, ya que la apertura de grietas y el pegado dentro de la muestra pueden tener el mismo efecto en su evolución de rigidez.

Los resultados muestran la gran importancia de los períodos de reposo y la capacidad de la mezcla de recuperar la rigidez, si se retira la sollicitación impuesta. La comparación entre los barridos de tiempo con y sin períodos de reposo demostró que estos tipos de ensayos no son adecuados para simular el comportamiento de la mezcla en el campo, en el que las cargas son prominentemente discontinuas. Claramente, hay un fenómeno de acumulación, que puede ser una combinación de calentamiento, tixotropía y no linealidad que reduce la rigidez muy rápidamente en los ensayos cíclicos, pero completamente reversible si la sollicitación aplicada se mantiene por debajo de cierto límite. Para la mezcla estudiada a 20°C y 10 Hz, este límite se situó por encima de 150 microdeformaciones y por debajo de 275 microstrains, figura 6.

El límite de deformación por debajo del cual la mezcla solo experimenta fenómenos reversibles, a una temperatura y frecuencia determinadas, debe utilizarse para caracterizar el llamado comportamiento a fatiga de la mezcla y sustituir el enfoque clásico relacionado con el número total de ciclos hasta fallo.

En vista a los resultados presentados en esta ponencia, parece probable que el calentamiento interno desempeñe un papel importante en la reducción de la rigidez de las mezclas asfálticas durante el ciclado. Sin embargo, esta acumulación de temperatura es altamente improbable en el campo. Las mezclas se someten a un proceso de carga no continuo en el pavimento donde se producen períodos de diferente duración entre el paso de una carga y la siguiente. Además, estos períodos pueden ser aún más largos para que dos cargas se apliquen dos veces en el mismo punto. Por esta razón, es importante reconocer este comportamiento y considerarlo al escoger una mezcla bituminosa.

## 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*.

## 6 Referencias

- [1] H. Baaj, H. Di Benedetto, and P. Chaverot, "Effect of binder characteristics on fatigue of asphalt pavement using an intrinsic damage approach," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 6, no. 2, pp. 147–174, 2005.
- [2] L. Shan, Y. Tan, B. S. Underwood, and Y. R. Kim, "Separation of Thixotropy from Fatigue Process of Asphalt Binder," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2207, no. 1, pp. 89–98, 2011.
- [3] H. Di Benedetto, Q. T. Nguyen, and C. Sauzéat, "Nonlinearity, heating, fatigue and thixotropy during cyclic loading of asphalt mixtures," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 12, no. 1, pp. 129–158, 2011.
- [4] F. Pérez-Jiménez, R. Botella, and R. Miró, "Damage and Thixotropy in Asphalt Mixture and Binder Fatigue Tests," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2293, no. 2293, pp. 8–17, 2012.

- [5] F. E. Pérez-Jiménez, R. Botella, and R. Miró, “Differentiating between damage and thixotropy in asphalt binder’s fatigue tests,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 212–219, 2012.
- [6] F. Canestrari, A. Virgili, A. Graziani, and A. Stimilli, “Modeling and assessment of self-healing and thixotropy properties for modified binders,” *Int. J. Fatigue*, vol. 70, pp. 351–360, 2015.
- [7] E. Riahi, F. Allou, R. Botella, F. Dubois, J. Absi, and C. Petit, “Quantification of self-heating and its effects under cyclic tests on a bituminous binder,” *Int. J. Fatigue*, vol. 104, pp. 334–341, 2017.
- [8] I. Isailović, M. P. Wistuba, and A. Cannone Falchetto, “Influence of rest period on asphalt recovery considering nonlinearity and self-heating,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 140, pp. 321–327, 2017.
- [9] I. Isailović, M. P. Wistuba, and A. C. Falchetto, “Experimental study on asphalt mixture recovery,” *Mater. Struct. Constr.*, 2017.
- [10] F. E. Pérez-Jiménez, R. Botella, R. Miró, and A. H. Martínez, “Analysis of the thixotropic behavior and the deterioration process of bitumen in fatigue tests,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 277–286, 2015.
- [11] R. Botella, F. E. Pérez-Jiménez, and R. Miró, “Application of a strain sweep test to assess fatigue behavior of asphalt binders,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 906–912, 2012.
- [12] R. Botella, F. E. Pérez-Jiménez, E. Riahi, T. López-Montero, R. Miró, and A. H. Martínez, “Self-heating and other reversible phenomena in cyclic testing of bituminous materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 809–818, 2017.
- [13] R. Lundström, J. Ekblad, and U. Isacson, “Influence of Hysteretic Heating on Asphalt Fatigue Characterization,” *J. Test. Eval.*, 2004.
- [14] S. Mangiafico, C. Sauzéat, H. Di Benedetto, S. Pouget, F. Olard, and L. Planque, “Quantification of biasing effects during fatigue tests on asphalt mixes: Non-linearity, self-heating and thixotropy,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 16, no. Supplement 2, pp. 143–180, 2015.
- [15] E. Riahi *et al.*, “Modelling self-heating and thixotropy phenomena under the cyclic loading of asphalt,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 18, pp. 155–163, May 2017.
- [16] P. Ayar, F. Moreno-Navarro, M. Sol-Sánchez, and M. C. Rubio-Gómez, “Exploring the recovery of fatigue damage in bituminous mixtures: the role of rest periods,” *Mater. Struct. Constr.*, 2018.
- [17] F. Moreno-Navarro, M. Sol-Sánchez, and M. C. Rubio-Gómez, “Exploring the recovery of fatigue damage in bituminous mixtures: the role of healing,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 16, pp. 75–89, 2015.