

Recuperación de daño en mezclas bituminosas. Análisis de su capacidad auto-reparadora para optimizar la conservación de firmes de carreteras

Fernando Moreno Navarro, fmoreno@ugr.es
Miguel del Sol Sánchez, msol@ugr.es

Gema García Travé, labic@ugr.es
M^a Carmen Rubio Gámez, mcrubio@ugr.es

LabIC.UGR. E. T. S. I. C. C. P. (Universidad de Granada)

Durante los últimos años, son muchos los estudios que están siendo llevados a cabo en torno al análisis de la capacidad auto-reparadora de las mezclas bituminosas, existiendo actualmente cierta controversia sobre la verdadera capacidad para recuperar el daño producido en estos materiales. Este trabajo pretende profundizar en dicho aspecto, teniendo en cuenta variables como el tipo de betún utilizado en la fabricación de la mezcla o la inducción de temperatura para favorecer el proceso de auto-reparación. Los resultados obtenidos muestran que la recuperación de propiedades mecánicas (como el módulo de rigidez) observada en materiales bituminosos sometidos a periodos de descanso sin inducción de calor, es principalmente debida a la reversibilidad de fenómenos como la tixotropía. Además, se observa que a pesar de que es posible recuperar parte del daño producido en las mezclas, aplicando únicamente la inducción de calor no es posible recuperar las propiedades iniciales del material.

Palabras clave: capacidad auto-reparadora de las mezclas bituminosas

In recent years, many studies have assessed how the healing phenomenon could recover the stiffness or the strength of bituminous materials. Nevertheless, some factors that appear during these studies have opened up a debate about whether a recovery of the damage actually occurs, and whether this recovery is lasting. This study attempts to provide an approach to these questions. For this purpose, an analysis at both a micro and macro damage level has been carried out, taking into account different variables. The main conclusions drawn from this study are that during rest periods without heating induction, the recovery produced in the material is mainly due to reversible phenomena. Furthermore, it has been demonstrated that, although healing can recover part of the damage caused by fatigue processes, it cannot restore the initial properties of the material.

Keywords: stiffness or the strength of bituminous materials

1. Introducción

Los pavimentos asfálticos son estructuras lineales diseñadas para soportar las cargas cíclicas (principalmente debidas al paso del tráfico rodado y los gradientes térmicos), que van apareciendo a lo largo de los años de servicio para los que son proyectados.

Dado que las tensiones inducidas por dichas cargas se encuentran considerablemente por debajo del límite de resistencia a rotura de los materiales bituminosos empleados en su construcción (siempre y cuando posean la estabilidad y cohesión requeridas), puede decirse que el principal modo de fallo que termina agotando la vida de servicio del pavimento es la fatiga.

Recuperación de daño en mezclas bituminosas. Análisis de su capacidad auto-reparadora para optimizar la conservación de firmes de carreteras

Por ello, este fenómeno puede considerarse como una de las principales preocupaciones en ingeniería de pavimentos, habiéndose convertido en uno de los más estudiados a nivel mundial. Algunos estudios demuestran que durante el desarrollo de los procesos de fatiga bajo carga cíclica en mezclas bituminosas pueden distinguirse tres fases (Di Benedetto, Nguyen, & Sauzéat, 2011; Florence, 2005; Jenq & Perng, 1991):

- Una inicial donde coexisten fenómenos como las deformaciones plásticas o asociados a la naturaleza visco-elástica del material (tixotropía, disipación de calor, etc.), pero en la que no aparece daño en el material (no hay rotura de enlaces químicos, solo movimiento molecular).
- Una segunda fase donde empiezan a aparecer fisuras a escala microscópica (debido a la creciente rotura de enlaces), que es considerada como la fase de inicio del daño por fatiga (micro-fisuración).
- Finalmente, durante la tercera fase se produce la coalescencia e interconexión de las micro-fisuras aparecidas en la etapa anterior dando lugar a la aparición de daño localizado a nivel macroscópico (macro-fisuras), que provoca la propagación del daño por fatiga hasta causar el fallo del material.

Tradicionalmente, durante los estudios de fatiga en estos materiales, el daño medido durante la fase de propagación ha sido considerado permanente e irreversible. No obstante, en los últimos años se han llevado a cabo estudios que demuestran que el cierre total o parcial de las macro-fisuras es posible tras largos periodos de descanso y/o la exposición del material a temperaturas elevadas (Liu, García, Schlangen, & van de Ven, 2011). Este fenómeno se conoce como "healing", y pone de manifiesto la capacidad recuperadora de daño de las mezclas bituminosas que podría contribuir notablemente a alargar la vida de servicio de los pavimentos (Little & Bhasin, 2007; Qiu, 2008; Qiu, van de Ven, Shaopeng, Molenaar, & Yu, 2014). Por ello, en los últimos años están llevándose a cabo numerosas investigaciones que pretenden desarrollar tecnologías para inducir el auto-curado, de manera que sean utilizadas como técnicas de mantenimiento de firmes (Qiu, 2008; Qiu, van de Ven, Shaopeng, Molenaar, & Yu, 2014).

En base a las investigaciones realizadas por diversos autores, se puede decir que el proceso de "healing" o recupera-

ción de daño en materiales bituminosos consta de tres etapas fundamentales (Phillips, 1998; Chowdary & Krishnan, 2010): (i) el cierre de las micro-fisuras debido a la adhesión de sus caras libres por su energía superficial; (ii) el cierre de la macro-fisura debido a la consolidación de las tensiones y la fluencia del ligante; (iii) la recuperación de las propiedades del material debido a la difusión de las estructuras de asfaltos. Sin embargo, los mecanismos de recuperación de este proceso no están claros del todo y a día de hoy, aún existe cierta controversia sobre si lo que causa la recuperación de las propiedades de la mezcla es la verdadera recuperación de daño (healing) o la reversibilidad de fenómenos viscoelásticos como la tixotropía (que tras un periodo de descanso puede provocar la recuperación de ciertas propiedades de la mezcla como el módulo de rigidez). En este mismo sentido, dado que estos fenómenos pueden coexistir, resulta también difícil cuantificar en qué grado contribuirían cada uno ellos en la recuperación de las propiedades del material, y bajo qué condiciones es más factible que lo hagan unos u otros.

Por tanto, es necesario desarrollar herramientas que permitan analizar estas cuestiones (Little & Bhasin, 2007), así como las otras variables que pueden influir en el estudio de la recuperación de daño de mezclas bituminosas (tamaño de fisura, tipo de ligante, temperatura de curado, tipo de mezcla, etc.) (García, Bueno, Norambuena-Contreras, & Partl, 2013). En base a estas consideraciones, el objetivo principal del estudio presentado en este artículo ha sido contribuir a mejorar la comprensión del fenómeno de recuperación de daño en mezclas bituminosas durante procesos de fatiga. Para ello, se ha desarrollado un nuevo método de análisis basado en el ensayo UGR-FACT, a través del cual se han evaluado diferentes tipos de materiales bituminosos (fabricados con betún convencional y modificado) y se han estudiado algunas de las principales variables que condicionan su recuperación de daño (como el tamaño de fisura o la inducción de temperatura durante los periodos de descanso para incentivar su curado).

2. Metodología

2.1 Materiales

Durante este estudio se analizó la capacidad de recuperación de daño de dos mezclas de tipo discontinuo BBTM 11A. Pa-

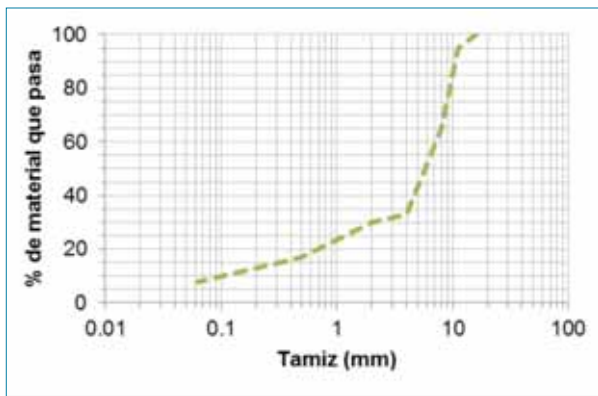


Figura 1. Esqueleto mineral de las mezclas estudiadas.

ra su fabricación se emplearon dos tipos de ligantes asfálticos para evaluar la influencia de la presencia de polímeros en la capacidad recuperadora de daño del ligante (Qiu et al., 2014), un betún convencional B 35/50 (B) y un betún modificado con polímeros BM3c (PMB). Para evitar incluir un mayor número de variables al estudio, el esqueleto mineral empleado en ambas mezclas fue el mismo (compuesto por áridos ofíticos en la fracción gruesa, calizos en la fracción arena, y filler de aportación cemento, Figura 1), así como su contenido óptimo de ligante (el cual cumple con los criterios de diseño de este tipo de materiales). Las Tablas 1 y 2 recogen las principales características de los materiales estudiados.

2.2 Descripción del Método de Estudio

Para evaluar la capacidad de recuperación de daño de las mezclas estudiadas se utilizó el método de ensayo UGR-FACT desarrollado en la Universidad de Granada (Moreno-Nava-

rro & Rubio-Gómez, 2013). Este método permite reproducir las condiciones de esfuerzos que producen la aparición de fenómenos de fatiga y fisuras en pavimentos (cargas del tráfico y gradientes térmicos). El dispositivo de ensayo está compuesto por dos apoyos deslizantes (uno de ellos dotado de un muelle recuperador para simular el efecto de las capas del cimientto), y dos elementos elásticos situados bajo los apoyos, con los que es posible inducir tensiones de flexión y cortante como las ocasionadas por el paso del tráfico, y de tracción como las debidas al efecto de los gradientes térmicos (Figura 2).

A diferencia de los métodos de estudio tradicionales, la herramienta desarrollada en esta investigación para el análisis de la aparición, propagación y recuperación de daño en mezclas bituminosas es evaluada a través de la cantidad de energía disipada por el volumen de material donde tiene lugar el fenómeno de fatiga (evitando así los problemas de análisis asociados a la aleatoriedad y dispersión tridimensional de su

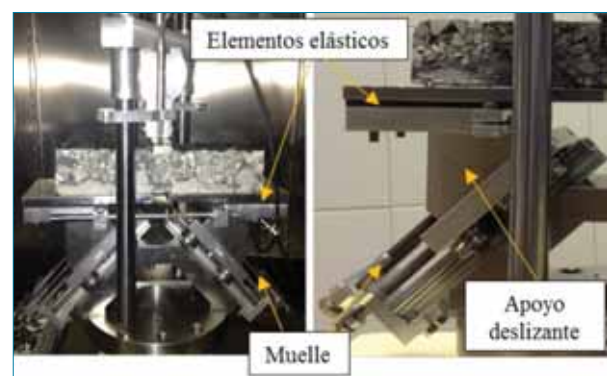


Figura 2. Dispositivo UGR-FACT.

Tabla 1. Propiedades de los ligantes empleados en la fabricación de las mezclas.

Tipo de betún	Penetración (dmm)	Punto de reblandecimiento (°C)	Viscosidad dinámica a 140°C (mPa.s)	Punto de fragilidad Fraass (°C)
B	44	53,4	700	-8
PMB	63	57,8	1.100	-14

Tabla 2. Propiedades de las mezclas estudiadas.

Tipo de mezcla	Tipo de ligante	Densidad aparente (g/cm³)	Huecos aire (%)	Estabilidad Marshall (kN)	Deformación Marshall (mm)	Rigidez a 20 °C (MPa)
BBTM-I	B	2.496	4,8	8.662	3,3	4.784
BBTM-II	PMB	2.491	5,3	9.339	3,7	4.229

Recuperación de daño en mezclas bituminosas. Análisis de su capacidad auto-reparadora para optimizar la conservación de firmes de carreteras

propagación). No obstante, los materiales visco-elásticos desde el primer ciclo de carga (en el que se encuentran intactos) disipan energía, por lo que puede afirmarse que no toda esa energía es consumida en forma de daño (existen otros fenómenos de disipación de energía que no producen daño en el material como la generación de calor, las deformaciones plásticas o la tixotropía). Por tanto, la generación de daño en estos materiales vendrá marcada por parte del incremento de energía disipada producido con respecto a la cantidad medida en el ciclo anterior. Así, una forma precisa de cuantificar el daño aparecido en el material es a través de la tasa acumulada de variación de energía disipada producida de un ciclo a otro (Ecuación 1), durante las fases del proceso de fatiga en las que dicho daño tiene lugar (fases 2 y 3 descritas en la introducción).

$$RDEC_{n+1} = \frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_n} \quad \text{[Ecuación 1]}$$

donde ω_n es la energía disipada en el ciclo n (en J/m^3), y $n+1$ es la energía disipada en el ciclo $n+1$ (en J/m^3).

Por tanto, para poder realizar este análisis será necesario distinguir entre cada una de las fases del proceso de fatiga (aparición de deformaciones plásticas y fenómenos visco-elásticos; aparición de micro-daño; y aparición de macro-daño; Figura 3). Para ello, en el método presentado en esta investigación se estudian los desplazamientos producidos en el volumen de material en el que tiene lugar el proceso de fatiga. En particular, durante el desarrollo del fenómeno de fatiga

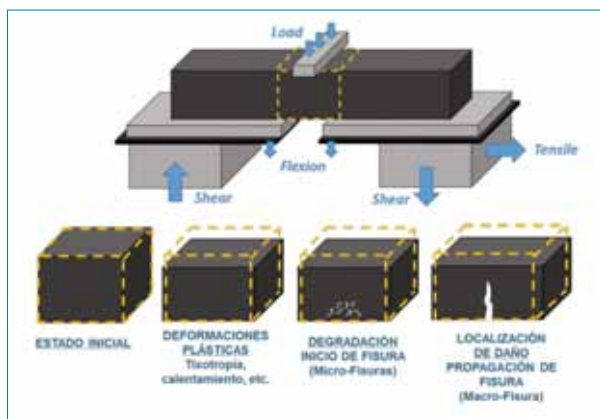


Figura 3. Esquema de los esfuerzos generados durante el ensayo UGR-FACT, así como de los diferentes estados del material durante las etapas del proceso de fatiga.

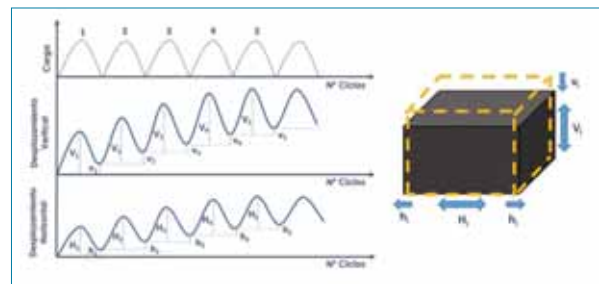


Figura 4. Resumen de los desplazamientos producidos en el volumen durante el proceso de carga cíclica.

en materiales bituminosos, pueden observarse una serie de desplazamientos “no recuperables” en cada dirección de su geometría (horizontal y vertical; h_i , v_i), los cuales están relacionados con la aparición de deformaciones plásticas o de daño (micro y macro fisuras) (Figura 4).

Analizando la evolución de dichos desplazamientos, los cuales hasta la fecha han sido obviados en el estudio del comportamiento mecánico de estos materiales, pueden obtenerse las variaciones geométricas aparecidas durante el proceso de fatiga, y por tanto las diferentes fases del mismo (Figura 5). Por tanto, utilizando esta información, y combinándola con el estudio de energía disipada por el material, es posible evaluar de manera precisa su estado de degradación así como si dicho estado de daño es recuperado (healing).

2.3 Plan de Ensayos

El primer paso de la investigación realizada se centró en evaluar la resistencia a fisuración por fatiga de los materia-

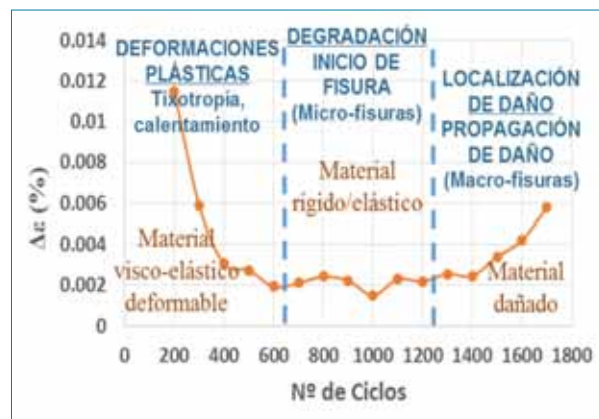


Figura 5. Etapas del proceso de fatiga observadas a través de las medidas de cambio de geometría producidas en el volumen de material afectado por el fenómeno.



Figura 6. Diferentes etapas del tratamiento térmico aplicado a las mezclas.

les utilizados. Para ello se ensayaron hasta su rotura 3 probetas de cada tipo de mezcla utilizando una amplitud de carga de 1 kN y una frecuencia de 5 Hz, a una temperatura de 15 °C (previamente a su evaluación, las probetas fueron acondicionadas durante al menos 3 horas a la temperatura de ensayo). Además de evaluar la vida de fatiga de estos materiales, dichos ensayos también fueron utilizados para definir los límites de aparición de micro y macro-daño en las mezclas.

Una vez establecidos dichos límites, 3 nuevas probetas de cada tipo de mezclas se evaluaron bajo las mismas condiciones (1 kN, 5 Hz, 15 °C), pero en esta ocasión el ensayo se detuvo antes de alcanzar el límite de macro-fisuración, para posteriormente aplicar al material un periodo de descanso de 4 horas a 15 °C (para observar su capacidad de recuperación de daño), tras el cual se volvió a reanudar el ensayo hasta inducir el fallo de las probetas. Este mismo procedimiento fue también aplicado a otras 3 probetas de cada tipo de mezcla, pero deteniendo el ensayo una vez alcanzada la fase de ma-

cro-fisuración. De esta forma, pudo definirse la influencia del nivel de daño alcanzado en la capacidad de recuperación de las mezclas estudiadas.

Finalmente, para analizar la influencia de la temperatura en la capacidad de recuperación de los materiales bituminosos, se repitió el plan de ensayos descrito en la etapa anterior, pero en esta ocasión durante el periodo de descanso de 4 horas también se aplicó un proceso de curado térmico. Dicho proceso fue definido acorde a los resultados obtenidos por otros investigadores (Daniel & Kim, 2001; García, 2011; García et al., 2013), y consistió en exponer a las probetas ensayadas durante 50 minutos a una temperatura de 60 °C. Así, tras la parada intermedia del ensayo, cada una de las probetas (tres sometidas a nivel de micro-daño y otras tres a nivel de macro-daño) de cada tipo de mezcla (las fabricadas con betún convencional y las fabricadas con betún modificado) fueron introducidas en una caja metálica rellena de arena (para evitar la fluencia, deformaciones no deseadas o el desmoronamiento de las mismas) y acondicionadas en una estufa a 60 °C durante 50 minutos (Figura 6). Tras dicho proceso, las probetas se dejaron enfriar hasta los 15 °C, para posteriormente continuar el ensayo hasta provocar su rotura.

La Figura 7 resume el plan de ensayos llevado a cabo durante este estudio.

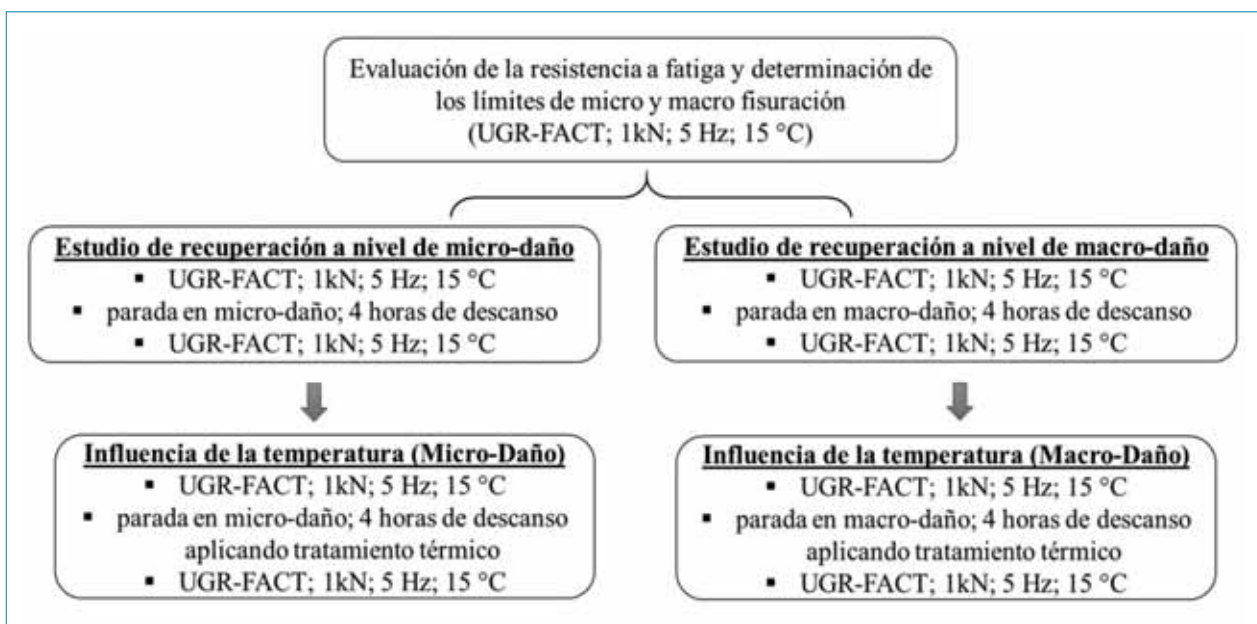


Figura 7. Esquema del plan de trabajo desarrollado durante la investigación.

Recuperación de daño en mezclas bituminosas. Análisis de su capacidad auto-reparadora para optimizar la conservación de firmes de carreteras

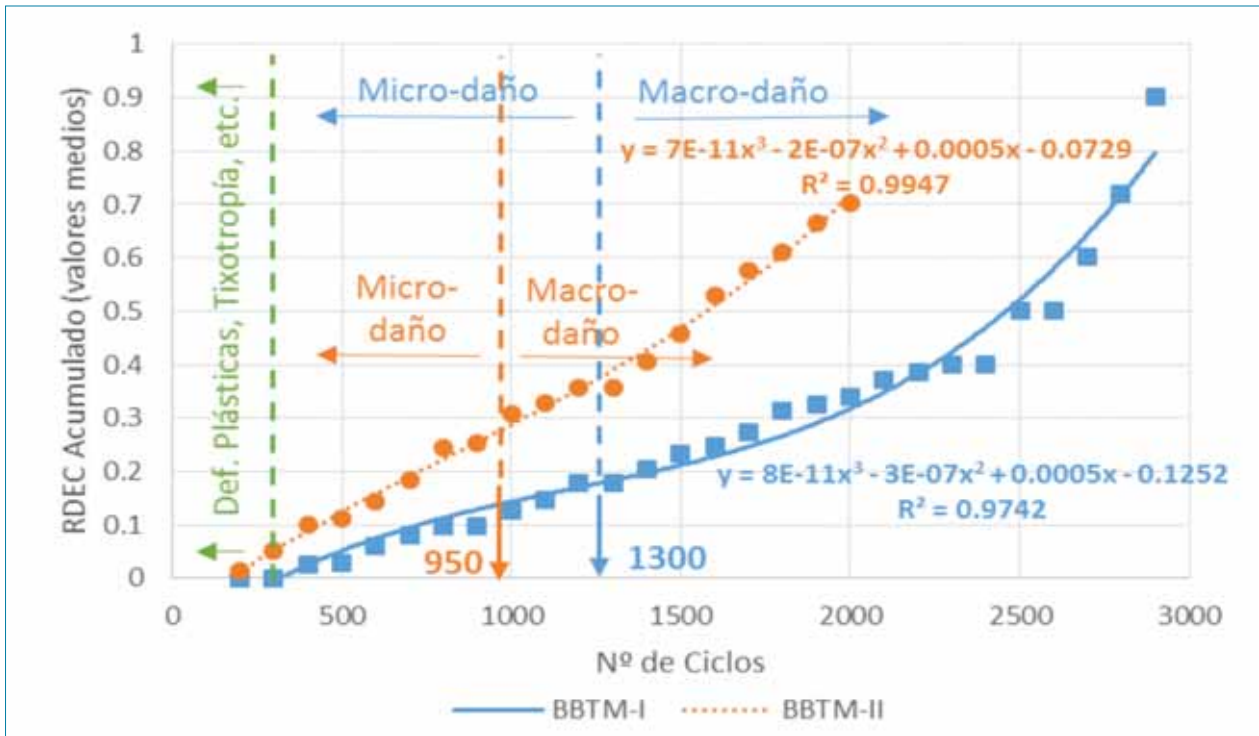


Figura 8. Evolución del daño a fatiga de las dos mezclas estudiadas, medido a través de los valores medios de RDEC acumulado.

3 Análisis de resultados

3.1 Estudio de la resistencia a fisuración por fatiga de las mezclas: definición de los límites de micro y macro fisuración

La Figura 8 muestra los resultados medios de la tasa acumulada del incremento de energía (evolución del daño sufrido por el material, RDEC acumulado) obtenida para cada una de las mezclas estudiadas. En base a estos resultados, los límites de micro y macro fisuración se establecieron a partir de los puntos singulares de las líneas de tendencias ajustados a cada curva de daño (puntos de inflexión de la función polinómica). La Tabla 3 resume los límites obtenidos en términos de número de ciclos así como de disipación de energía, los

cuales fueron utilizados para determinar la parada para los periodos de descanso de los ensayos a realizar en las siguientes etapas.

3.2 Estudio de la recuperación de daño en mezclas bituminosas

La Figura 9 muestra los resultados medios de la tasa acumulada del incremento de energía obtenida en los ensayos en los que se incluyó un periodo de descanso, tanto a nivel de micro-daño, como de macro-daño. Como se puede observar, la mezcla fabricada con el betún convencional (BBTM I) tiene una mayor capacidad para recuperar el daño tanto a nivel de micro-fisuración como a nivel de macro-fisuración. Este hecho coincide con los resultados obtenidos por otros au-

Tabla 3. Límites obtenidos entre las fases de micro y macro fisuración para cada uno de los materiales estudiados.

Material	Nº de ciclos de carga	Energía disipada en un ciclo (J/m^3)	RDEC acumulado
BBTM-I	1.300	2.100	0,20
BBTM-II	950	4.000	0,27

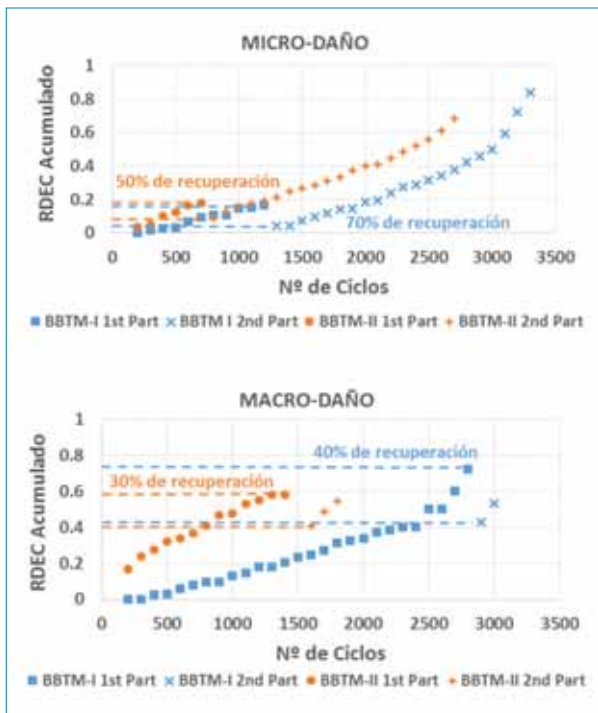


Figura 9. Evolución del daño medio a fatiga antes (1st part) y después (2nd part) de la inclusión de un periodo de descanso.

tores (Little, Lytton, Williams, & Kim, 1999) en los que se demostró que el betún convencional tiene una mayor capacidad para fluir y reestablecer el contacto entre las superficies de grieta que el betún modificado (en los que la presencia de los polímeros dificulta el proceso de curación). Analizando la respuesta ofrecida por ambas mezclas puede también destacarse que la cantidad de daño recuperado a nivel de micro-fisuración es mayor que cuando el daño ha alcanzado el estado de macro-fisura. No obstante, en este sentido debe destacarse que una mayor cantidad de daño es causada cuando se alcanza la macro-grieta y por tanto, este hecho debe dificultar más la recuperación de las propiedades del material.

Este fenómeno se aprecia más claramente en la Figura 10, donde se muestra la evolución del proceso de fatiga sufrido por los materiales ensayados (representados a través de los cambios de geometría producidos en el volumen de material donde tiene lugar el desarrollo de la fisura). Como se puede observar, cuando se detiene el ensayo a nivel de micro-daño y se incluye un periodo de descanso para la recuperación del material, ambos tipos de mezclas parecen recuperar gran parte de sus propiedades iniciales, regresando tras el reinicio del ensayo a la etapa inicial donde tienen

lugar los fenómenos como la tixotropía o las deformaciones plásticas. Sin embargo, cuando los periodos de descanso son incluidos una vez alcanzado el nivel de macro-fisuración, los materiales ensayados solo son capaces de recuperar parte del daño causado durante el ensayo (regresando únicamente al final de la etapa intermedia de micro-fisuración y/o principio de la etapa final de macro-fisuración). En este sentido, cuando las probetas ensayadas son analizadas visualmente, se observa que la inclusión de un periodo de curado de 4 horas a 15 °C no permite cerrar el daño aparecido a nivel de macro-grieta. Por tanto, puede decirse que la recuperación observada en este nivel de daño, debe ser causada por el cierre de las micro-fisuras o por los fenómenos visco-elásticos reversibles (tixotropía).

En base a estos resultados, se puede entonces plantear la siguiente pregunta: ¿es la recuperación observada a nivel de micro-daño debida al fenómeno de “healing” o simplemente es debida al efecto de otros fenómenos reversibles como la tixotropía? Una posible aproximación a la respuesta de esta cuestión puede obtenerse a partir del análisis de los círculos de histéresis medidos en el material al empezar el ensayo (ciclo-i), y antes (ciclo-pd) y después (ciclo-r) del periodo de des-

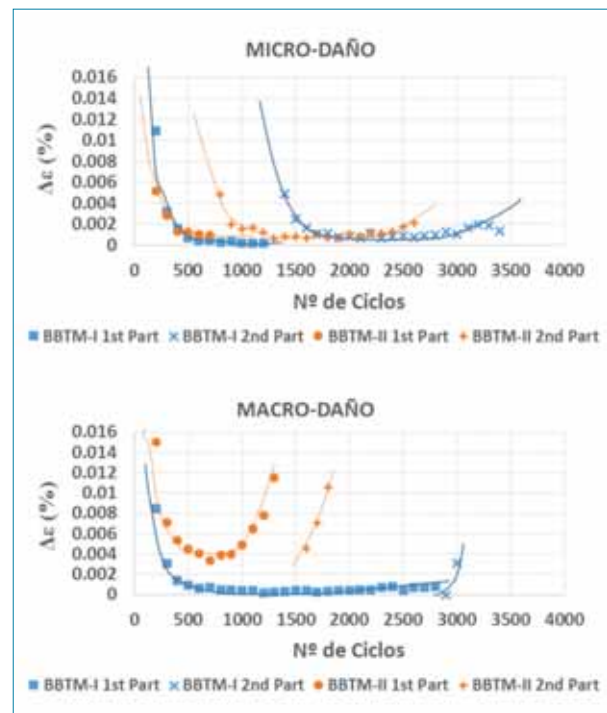


Figura 10. Representación de los valores medios de los cambios geométricos producidos en el material antes (1st part) y después (2nd part) de la inclusión de los periodos de descanso.

Recuperación de daño en mezclas bituminosas. Análisis de su capacidad auto-reparadora para optimizar la conservación de firmes de carreteras

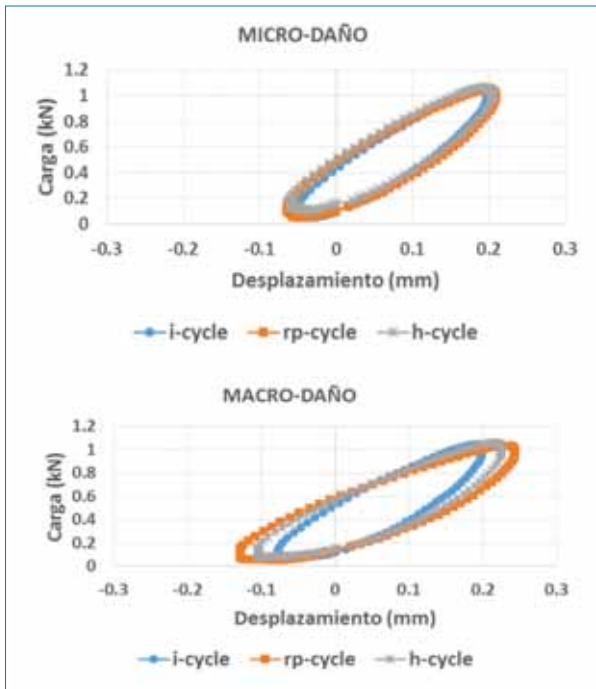


Figura 11. Círculos de histéresis medidos en las diferentes fases del ensayo (al inicio, antes del periodo de descanso, y justo después de reanudar la carga).

La Figura 11 representa gráficamente dichos círculos (cuya área interior es la energía disipada por el material en los ciclos mencionados), en dos de los ensayos realizados con probetas de la mezcla BBTM-II a ambos niveles de daño.

Como se puede observar, la cantidad de energía disipada (que puede ser debida tanto al daño causado en la mezcla, como a otros fenómenos visco-elásticos) tras el periodo de descanso no varía considerablemente en el caso del ensayo realizado a nivel de micro-daño, mientras que a nivel de macro-daño es solo parcialmente recuperada (a pesar de que la macro-fisura continúa visible sin cerrarse). Por tanto, puede decirse que los cambios producidos en la energía disipada de-



Figura 12. Esquema de los fenómenos ocurridos durante la recuperación de propiedades debido a la inclusión de un periodo de descanso.

bidos a micro-daño han de ser mínimos, y por tanto, la recuperación observada en el material debe ser causada principalmente por el efecto de fenómenos visco-elásticos reversibles como la tixotropía (Figura 12). Este hecho implica que la recuperación observada en las propiedades del material debido a la inclusión de un periodo de descanso de 4 horas a 15 °C no deben estar asociadas al fenómeno de "healing".

3.3 Estudio de la influencia de la temperatura en la recuperación de daño en mezclas bituminosas

La Figura 13 muestra los valores medios de la tasa acumulada del incremento de energía (RDEC acumulada) en los ensayos en los que se incluyó un periodo de descanso con un proceso de calentamiento a 60 °C, tanto a nivel de micro-daño, como de macro-daño. La cantidad de RDEC acumulada recuperada muestra que la inducción de temperatura durante el periodo de descanso favorece la recuperación de las propiedades mecánicas en ambos niveles de daño (incrementando la recuperación en torno a un 25% a nivel de micro-daño y en torno al 10% a nivel de macro-daño). Además, la ins-

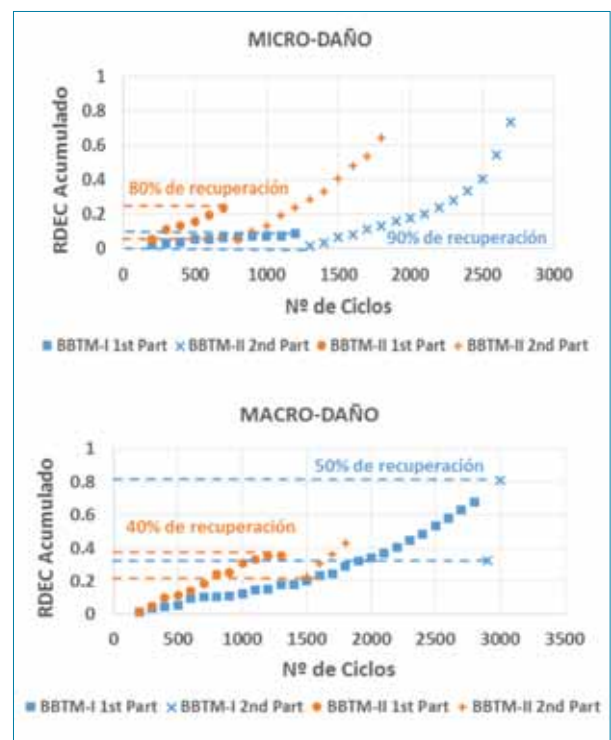


Figura 13. Evolución del daño medio a fatiga antes (1ª part) y después (2ª part) de la inclusión de un periodo de descanso con tratamiento térmico.

pección visual de las probetas ensayadas demuestra que en los materiales en los que se alcanzó el macro-daño se ha producido un cierre parcial de la grieta, debido a la fluencia del betún al aplicar el proceso de calentamiento. Por tanto, puede afirmarse que la temperatura de acondicionamiento puede influir positivamente en la capacidad recuperadora de las mezclas bituminosas.

La Figura 14 analiza las diferentes fases del proceso de fatiga en ambos niveles de daño, a través de la medida del cambio de geometría de los materiales ensayados (en el entorno donde tiene lugar el fenómeno). A nivel de micro-daño, puede afirmarse que ambos materiales (BBTM-I fabricada con betún convencional y BBTM-II fabricada con betún modificado) parecen retornar a la etapa inicial del proceso tras la aplicación del periodo de descanso y el tratamiento térmico (este hecho coincide con lo observado cuando no se aplica tratamiento térmico). No obstante, a nivel de macro-daño, a pesar de que la grieta aparecida en el material está prácticamente cerrada tras el tratamiento, los materiales evaluados no recuperan su estado inicial (volviendo al final de la segunda etapa o principio de la tercera). Por tanto, puede decirse que incluso aplicando tratamientos térmicos, una vez apare-

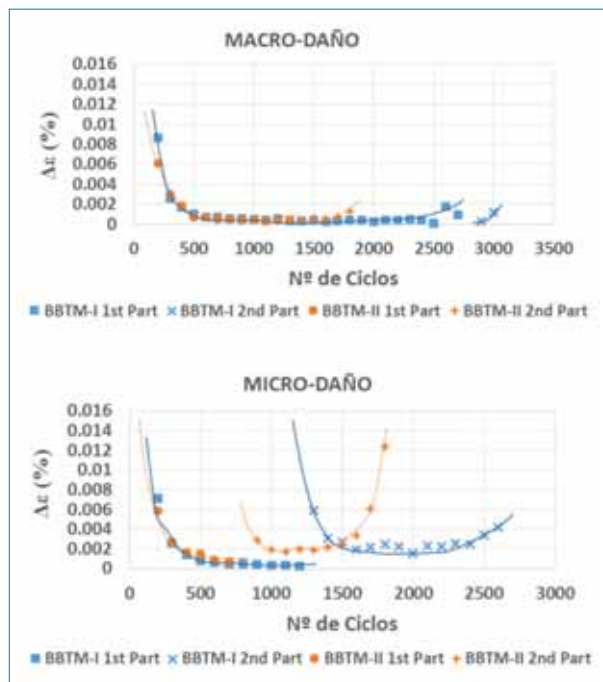


Figura 14. Representación de los valores medios de los cambios geométricos producidos en el material antes (1st part) y después (2nd part) de la inclusión de los periodos de descanso con tratamiento térmico.

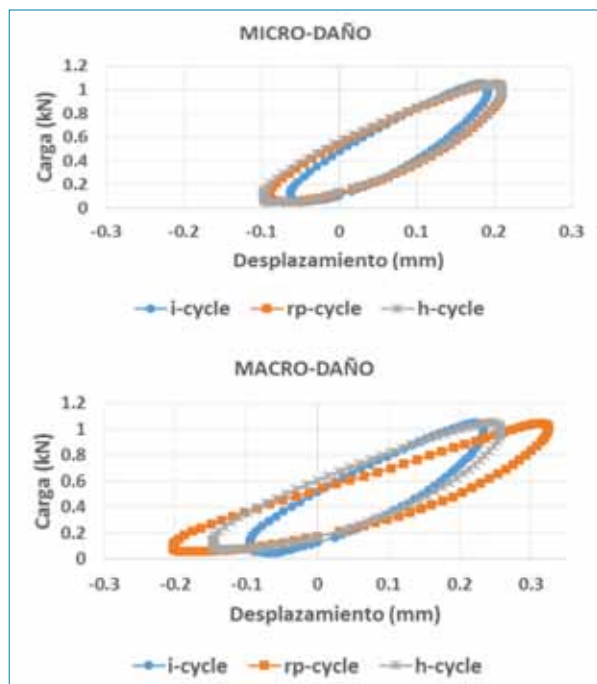


Figura 15. Círculos de histéresis medidos en las diferentes fases del ensayo (al inicio, antes del periodo de descanso, y justo después de reanudar la carga).

cido el nivel de macro-daño, el material no puede restaurar sus propiedades iniciales.

Analizando los círculos de histéresis medidos al empezar el ensayo (ciclo-i), y antes (ciclo-pd) y después (ciclo-r) del periodo de descanso, se puede observar una tendencia similar a la obtenida cuando no se aplica tratamiento térmico (Figura 15). Tras el periodo de descanso, el nivel de energía disipada por los materiales no cambia significativamente a nivel de micro-daño (la recuperación producida parece ser principalmente debida por tanto a fenómenos visco-elásticos reversibles), mientras que a nivel de macro-daño es solo parcialmente recuperada. Sin embargo, en este caso la macro-fisura parece estar parcialmente recuperada (Figura 16), y por tanto puede suponerse que la energía recuperada no solo ha de deberse a la recuperación de fenómenos visco-elásticos, sino también al cierre de la macro-grieta.

En base a estas consideraciones, podría afirmarse que si el ligante bituminoso es capaz de fluir para cerrar parcialmente las macro-fisuras, también debe ser capaz de cerrar las micro-grietas, y por tanto hacer efectivo el fenómeno de "healing" para recuperar las propiedades iniciales de la mezcla. No obstante, también surge la siguiente cuestión: ¿por qué la energía disipada solo es recuperada parcialmente y los cír-

Recuperación de daño en mezclas bituminosas. Análisis de su capacidad auto-reparadora para optimizar la conservación de firmes de carreteras

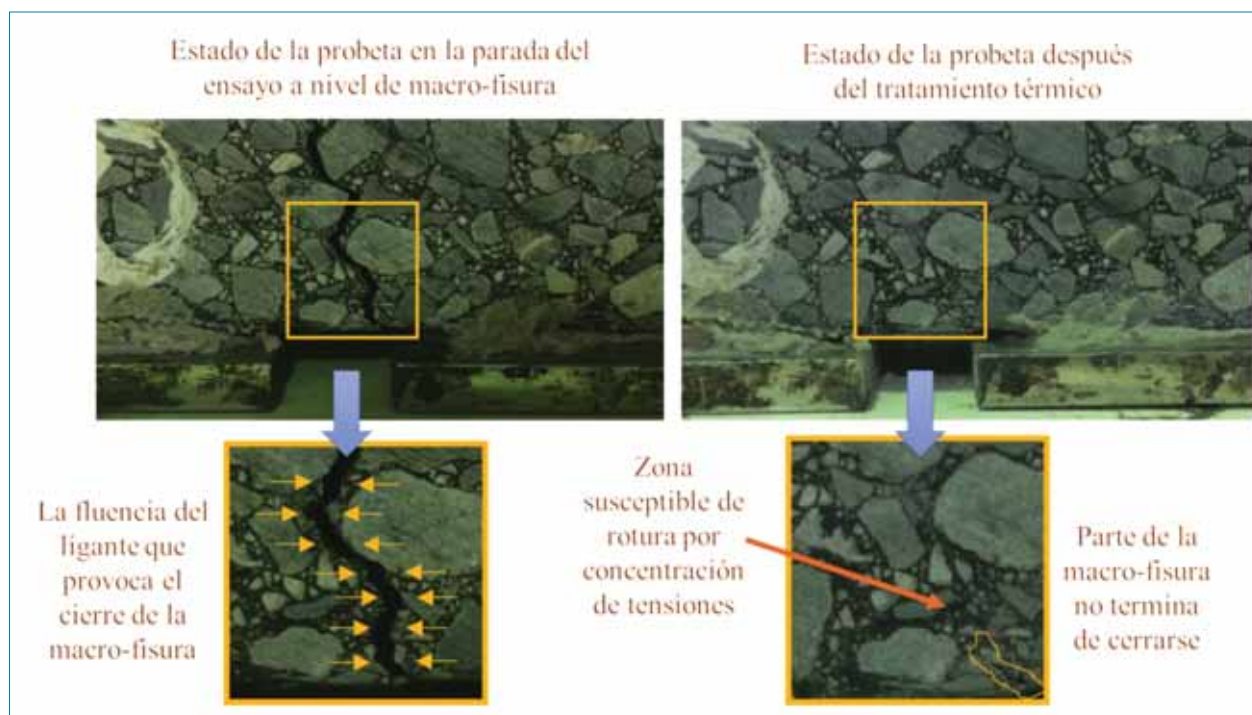


Figura 16. Detalle de la macro-fisura cerrada tras el tratamiento térmico.

culos de histéresis son diferentes a los obtenidos durante los ciclos iniciales del ensayo cuando el material no está dañado? Así, a pesar del hecho de que el ligante pueda fluir y “pegar” las superficies de fractura de la macro-fisura (y por ende de las micro-fisuras), los ensayos realizados han demostrado que el material resultante tras el proceso de inducción térmica no es el mismo que antes de ser ensayado. La principal razón de este hecho es debida a que la inducción de calor, a pesar de permitir la fluencia del ligante y por tanto el cierre de las grietas, no permite la recuperación de las deformaciones plásticas producidas en la etapa previa a la aparición del daño (i.e. la distancia entre áridos permanece constante antes y después de la aplicación de los periodos de descanso y la inducción térmica, Figura 17). Así, a pesar de que las grietas puede ser selladas, las tensiones generadas en el material en un entorno de la misma (h) son mayores que en las etapas iniciales del material (i), donde aún tiene la capacidad de deformar plásticamente), y por tanto la degradación tras el proceso de re-carga es más rápida que durante el proceso de carga inicial, lo que coincide con lo observado ya por otros investigaciones (Breyse, Roche, Domee, & Chauvin, 2003; Shen & Carpenter, 2007).

Por tanto, a pesar de que el fenómeno de “healing” puede llegar a recuperar parte de las propiedades dañadas de los

materiales bituminosos (cuyo grado de recuperación dependerá del tiempo de descanso y temperatura de acondicionamiento), puede decirse que no es posible inducir la recuperación total de las propiedades iniciales del material. En este sentido, sería interesante analizar si aplicando otros tratamientos como recompactación o la inducción de presión mecánica, pueden alcanzarse mayores grados de recuperación. De la misma forma, resulta de especial interés profundizar en el estudio de las condiciones óptimas (tiempo de descanso y temperatura) para alcanzar el mayor grado de recuperación de propiedades en cada tipo de mezcla (Figura 18).

4. Conclusiones

El principal objetivo del trabajo presentado en este artículo ha sido analizar la capacidad de recuperación de daño en mezclas bituminosas. El estudio ha sido llevado a cabo a nivel de micro-daño y macro-daño, evaluando la influencia de distintas variables como el tipo de ligante empleado en la fabricación de las mezclas (convencional o modificado) o la inducción de temperatura durante la aplicación de periodos de descanso. De la misma forma, se ha presentado un nuevo procedimiento de análisis a través del método de ensayo UGR-FACT que permite realizar un estudio detallado de la capacidad recuperadora

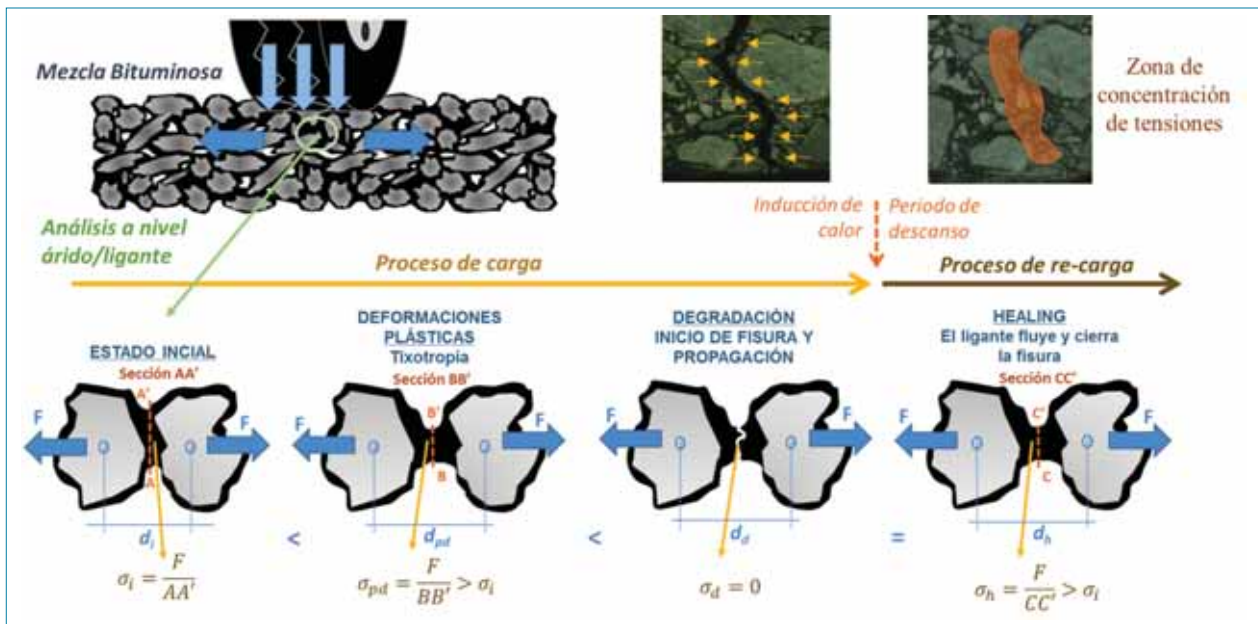


Figura 17. Esquema del proceso de recuperación de daño ocurrido en la mezcla debido al tratamiento térmico.

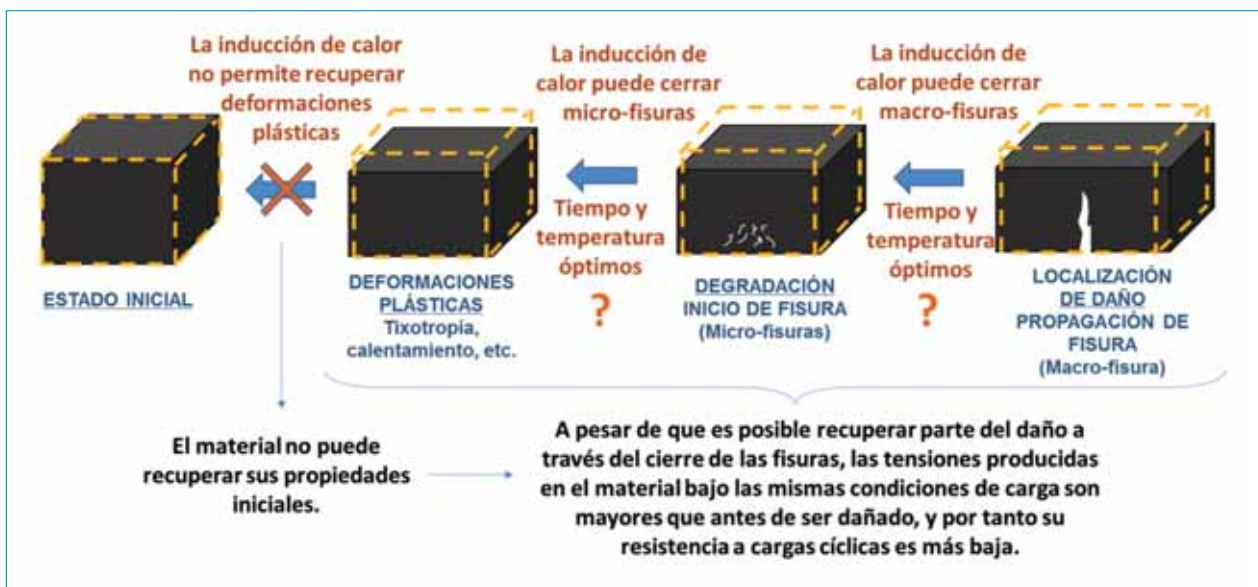


Figura 18. Esquema de los fenómenos ocurridos durante la recuperación de propiedades debido a la inclusión de un periodo de descanso con tratamiento térmico.

de estos materiales. En base a los resultados obtenidos pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Después de un periodo de descanso de 4 horas a 15 °C, las dos mezclas estudiadas (fabricadas con betún convencional y modificado) son capaces de recuperar parte de las propiedades perdidas durante el ensayo; siendo mayor la recuperación producida cuando la mezcla solo ha

alcanzado el nivel de micro-fisuración que cuando la macro-grieta ya está formada. De la misma forma, la mezcla fabricada con betún convencional tiene una mayor capacidad de recuperación de daño que la mezcla fabricada con betún modificado. Por otra parte, también se ha demostrado que la recuperación resultante a nivel de macro-daño no puede ser debida al cierre de la macro-fisura (puesto que tras el periodo de descanso ésta permanece

Recuperación de daño en mezclas bituminosas. Análisis de su capacidad auto-reparadora para optimizar la conservación de firmes de carreteras

visible y sin cerrar). Además, se ha puesto de manifiesto que la recuperación producida debida al cierre de las micro-fisuras durante el periodo de descanso ha de ser poco significativa. Por tanto, las propiedades recuperadas bajo estas condiciones (periodo de descanso de 4 horas a 15 °C) deben estar principalmente asociadas a fenómenos visco-elásticos reversibles (como la tixotropía) que coexisten con el daño durante los procesos de fatiga. Estos fenómenos van desapareciendo conforme el ensayo de fatiga progresa y por tanto la recuperación observada a nivel de micro-daño es mayor que la observada a nivel de macro-daño (donde el ensayo está más avanzado). Esto sugiere que bajo estas condiciones, la capacidad recuperadora de daño de las mezclas estudiadas no ejerce un impacto considerable en el incremento de su resistencia a fatiga.

- Cuando se introduce un proceso de tratamiento térmico durante el periodo de descanso, las mezclas estudiadas incrementan su capacidad para restaurar sus propiedades iniciales (tanto a nivel de micro-daño, como de macro-daño). Además, al inspeccionar visualmente las probetas, la macro-fisura producida aparece prácticamente cerrada tras el tratamiento térmico (debido a la fluencia del betún al incrementar su temperatura). Por la misma razón, puede afirmarse que la mayor parte de las micro-fisuras deben cerrarse tras el proceso de calentamiento, como indica el hecho de que se incrementa la capacidad recuperadora de las mezclas a nivel de micro-daño cuando se aplica el proceso térmico. Estos aspectos demuestran que la inducción de calor es beneficiosa para recuperar las propiedades perdidas por las mezclas bituminosas, y que bajo estas circunstancias es posible recuperar parte del daño causado durante los procesos de fatiga. Así, resulta de especial interés seguir investigando en la definición de las condiciones óptimas (tiempo de descanso y temperatura) de recuperación de daño para cada tipo de material bituminoso.
- No obstante, el estudio realizado también ha demostrado que a través del fenómeno de "healing" no es posible restaurar completamente las propiedades iniciales de las mezclas. El motivo principal es que este fenómeno no permite la recuperación de las deformaciones plásticas producidas en la etapa previa a la aparición de daño (dado que la fluencia del ligante bituminoso no permite rees-

tablecer la distancia inicial entre áridos del esqueleto mineral). Como consecuencia, aunque las micro y macro-fisuras puedan llegar a cerrarse debido a la fluencia del betún, las tensiones que se generarán en el entorno de dichas fisuras "sanadas" son muy superiores a las del resto del material, y por tanto, a pesar de que se hayan cerrado, no soportarán muchos ciclos de carga y volverán a romper de forma prematura.

Evaluando de forma conjunta los resultados de esta investigación, puede concluirse que la recuperación de propiedades mecánicas observada durante los ensayos de fatiga de mezclas bituminosas que aplican periodos de descanso es principalmente debida a los efectos causados por los fenómenos visco-elásticos reversibles (principalmente tixotropía), y por tanto no pueden ser consideradas como "healing" (recuperación de daño). Además, a pesar de que la recuperación de daño es parcialmente posible en materiales bituminosos, la recuperación de las propiedades iniciales del material no parece poder realizarse utilizando únicamente la inducción de calor. Finalmente se puede afirmar, que a través del método de análisis presentado, esta investigación establece las bases para mejorar el estudio de la capacidad recuperadora de las mezclas bituminosas, así como de las tecnologías y procesos de "self-healing" que permitan optimizar la conservación de las carreteras.

6. Referencias bibliográficas

- Breyse, D., Roche, C. D. L., Domee, V., Chauvin, J. J. 2003. Influence of rest time on Recovery and Damage during Fatigue Tests on Bituminous Composites. Proceedings of 6th RILEM Symposium PTEBM, Zurich.
- Chowdary, V. Krishnan, M. 2010. A thermodynamic framework for modeling healing of asphalt mixtures. International Journal of Pavement Research and Technology, 3, pp. 186-198.
- Daniel J.S. & Kim Y.R. 2001. Laboratory evaluation of fatigue damage and healing of asphalt mixtures. Journal of Materials in Civil Engineering, 13(6), pp. 434-440.
- Di Benedetto, H., Tuan Nguyen, Q., Sauzéat, C. 2011. Nonlinearity, heating, fatigue and thixotropy during cyclic loading of asphalt mixtures. Road Materials and Pavement Design, Vol. 12 (1), pp. 129-158.

- Florence, C. 2005. Étude expérimentale de la fissuration reflective et la modelisation de la resistance de structures cellulaires. Ph.D. thesis. École National des Ponts et Chaussées.
- García, A. 2011. Self-healing of open cracks in asphalt mastic. Fuel, 93, pp. 264-272.
- García, A., Bueno, M., Norambuena-Contreras, J., Partl, M.N. 2013. Induction healing of dense asphalt concrete. Construction and Building Materials, Vol. 49, pp. 1-7.
- Jenq, Y. S. & Perng, J. D. 1991. Analysis of crack propagation in asphalt concrete using cohesive crack model. Transportation Research Board, National Research Council, Transportation Research Record, 1317, pp. 90-99.
- Little D. N. & Bhasin A. 2007. Exploring mechanisms of healing in asphalt mixtures and quantifying its impact. Self healing material an alternative approach to 20 centuries of materials science. Springer Series in Materials Science, Vol.100, pp. 205-218.
- Little D. N., Lytton R. L., Williams D., Kim Y. R. 1999. An analysis of the mechanism of micro-damage healing based on the application of micromechanics first principles of fracture and healing. Proc., Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 68, pp. 501-542.
- Liu, Q., García, A., Schlangen, E., van de Ven, M. 2011. Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete. Journal of Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 3746-3752
- Moreno, F. & Rubio, M. C. 2013. Effect of aggregate nature on the fatigue-cracking behavior of asphalt mixes. Materials and Design, 47, pp. 61-67.
- Moreno-Navarro, F. & Rubio-Gámez, M.C. 2013. UGR-FACT test for the study of fatigue cracking in bituminous mixes. Construction and Building Materials, 43, pp. 184-190.
- Moreno-Navarro, F. & Rubio-Gámez, M.C. 2014. Mean damage parameter for the characterization of fatigue cracking behavior in bituminous mixes. Materials and Design, 54, pp. 748-754.
- Phillips, M. C. 1998. Multi-step models for fatigue and healing, and binder properties involved in healing. In: Proceedings of eurobitume workshop on performance related properties for bituminous binders, Luxembourg, Paper Number 115.
- Qiu, J. 2008. Self healing of asphalt mixes: literature review. Report 7-08-183-1, Delft University of Technology.
- Qiu, J., van de Ven, M., Shaopeng, W., Molenaar, A., Yu, J. 2014. Self-healing characteristics of bituminous mastics using a modified direct tension test. Journal of Intelligent Materials, Systems and Structures, Vol. 25, No.1, pp. 58-66.
- Shen, S. & Carpenter, S.H. 2007. Dissipated energy concepts for HMA performance: fatigue and healing. Technical Report of Research supported by the Federal Aviation Administration. University of Illinois, U.S.A.

#34

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

“Con pavimentos asfálticos fonoreductores puede disminuirse ruido de 3 a 8 dB(A) o más” (Carta de bienvenida de EAPA, número 1)

#SOSTENIBILIDAD_Y_MEDIO_AMBIENTE