

Método de Ensayo UGR-FACT para el estudio del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas

La fisuración por fatiga es una de las patologías más comunes en los pavimentos bituminosos de todo el mundo. El estudio del comportamiento de estos materiales a nivel de laboratorio, a través de ensayos efectivos, resulta fundamental para mejorar su diseño, de manera que puedan conseguirse firmes más duraderos. Desde la Universidad de Granada, se ha desarrollado un nuevo método de ensayo, que permite simular las sollicitaciones sufridas por los firmes de carretera, induciendo, sobre los materiales a ensayar, un proceso controlado de fisuración por fatiga. Estudiando la energía disipada en el volumen afectado por el proceso de fisuración, puede evaluarse la respuesta mecánica del material, de manera que se optimice su diseño ante esta patología. En este artículo se presentan las características del dispositivo de ensayo desarrollado y los fundamentos teóricos definidos para el análisis de sus resultados, así como algunos estudios realizados con este método de ensayo.

Palabras clave: Fisuración por fatiga, pavimentos bituminosos

Fatigue cracking is one of the most common distresses in asphalt pavements all over the world. The laboratory study of the mechanical behavior of these materials using effective tests is crucial in the improvement of their design for the construction of more durable pavements. The University of Granada has developed a new test method which is able to reproduce the efforts suffered by the pavement during its service life, and to induce in the specimen tested a controlled fatigue cracking process. The study of the dissipated energy in the volume where the cracking process takes place allows an accurate evaluation of the mechanical response of the material and an optimization of its design against this phenomenon. This paper presents the characteristics of the test device developed, the theoretical fundamentals defined for the analysis of its results and some studies carried out with this test method.

Keywords: Fatigue cracking, asphalt pavements

Fernando Moreno Navarro, fmoreno@ugr.es

M^a Carmen Rubio Gámez, mcrubio@ugr.es

LabIC.UGR - Laboratorio de Ingeniería
de la Construcción de la Universidad de Granada

1. Introducción

La fisuración por fatiga es una de las patologías más comunes en los firmes de carretera de todo el mundo y una de las principales causantes del fin de su vida de servicio. La aparición de este fenómeno se debe a la existencia de dos mecanismos de deterioro principales, el paso del tráfico y la acción de los

gradientes térmicos (Colombier 1997). Esta patología tiene unas consecuencias sobre la carretera que pueden ser nefastas a medio-largo plazo, tanto desde el punto de vista estructural (malas transferencias de carga, que provoquen problemas de deformaciones y punzonamientos; entrada de agua y otros agentes químicos, que provoquen fenómenos como los baches, peladuras, lavado de finos, disminución de la capacidad portante, etc), como desde el punto de vista de la seguridad y el confort (aumenta las irregularidades del firme, dificultando la conducción, aumentando el nivel de ruido y disminuyendo el rozamiento con el neumático) (Colombier 1997).

A pesar de los esfuerzos realizados para minimizar el impacto causado por este problema, actualmente el estudio de este fenómeno sigue siendo una de las prioridades de investi-

Método de Ensayo UGR-FACT para el estudio del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas

gación en el ámbito de la ingeniería de carreteras, y concretamente, en el diseño de mezclas bituminosas. En la actualidad existen diferentes tipos de ensayos, que permiten la evaluación del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas. A pesar de ello, casi ninguno de estos ensayos se emplea de forma generalizada, de manera que no existe un ensayo de referencia común para evaluar el comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas (al contrario de lo que ocurre con otras patologías comunes, como las roderas o las relacionadas con la acción del agua). Por un lado, algunos de los ensayos existentes no correlacionan las condiciones carga aplicadas con las sufridas en el firme durante su vida de servicio, y por tanto, no es fácil extrapolar los resultados obtenidos a la respuesta real del material (muchos son ensayos de fatiga que no se centran en el estudio de la fisuración, utilizando geometrías y condiciones de carga y de ensayo que no son las adecuadas). Por otro, los ensayos que reproducen las condiciones de carga más realistas suelen ser bastante sofisticados (en términos de aplicación de carga, instrumentación etc.) y con un elevado coste económico de reproducción y ejecución, por lo que es muy difícil que se consiga hacer extensivo su uso al diseño de mezclas a nivel mundial (quedando como pruebas muy útiles para ser utilizadas de manera puntual en un laboratorio, pero sin posibilidad de comparar resultados entre mezclas bajo las mismas condiciones en diferentes centros de investigación) (Hajj et al. 2008; García-Carretero 1992).

Debido a estas circunstancias, el desarrollo de un método de ensayo que trate de dar solución a esta problemática puede suponer un gran avance en la mejora del tratamiento de esta patología, constituyendo una línea de investigación de interés. Bajo estas consideraciones, desde la Universidad de Granada se ha desarrollado un nuevo ensayo, que permite reproducir las condiciones de fatiga por cargas de tráfico que provocan la aparición de fisuras en mezclas bituminosas (UGR-FACT, University of Granada - Fatigue Asphalt Cracking Test). El dispositivo de ensayo diseñado provoca el inicio y desarrollo de una fisura controlada, de manera que pueden analizarse las diferentes fases del proceso. Centrándose en el estudio de un volumen representativo del material (donde tiene lugar la formación de la fisura), y analizando la energía disipada durante el proceso, el ensayo permite una evaluación precisa del daño y del comportamiento mecánico de la mezcla. Así, su empleo puede resultar una herramienta muy útil en la mejora del diseño de este tipo de materiales.

El artículo aquí presentado recoge una descripción de dicho ensayo, definiendo sus principales características (geometría, cálculos, etc.), así como algunos ejemplos de su aplicación.

2. Método de Ensayo UGR-FACT

2.1 Consideraciones previas al diseño del ensayo

Cada vez que el eje de un vehículo pasa por un punto del firme, la carga aplicada induce sobre el pavimento una acción de flexión y dos cortantes (Figura 1a, Colombier 1997). A pesar de que los esfuerzos generados son inferiores al límite de resistencia a rotura del material, el paso repetido de los vehículos (unido al efecto potenciador que pueden generar las tensiones debidas a las variaciones de temperatura) induce un proceso de fatiga que termina provocando la aparición y propagación de fisuras en él. Además, la presencia de imperfecciones en las capas inferiores del pavimento (como fisuras de retracción térmica o baches provocados por fallos en la capacidad portante de la base granular) o de juntas de dilatación o pre-fisuras (utilizadas para mitigar y controlar la aparición de fisuras), provocan la aparición de puntos de debilidad en los que la concentración de las tensiones provocadas por el paso del tráfico se acentúan (Thom 2008). Así, el proceso de fatiga en estos puntos críticos se desarrolla de forma más rápida y suele ser donde tiene lugar la aparición de este fenómeno (Figura 1b).

El proceso de fisuración por fatiga comienza una vez que el material ha agotado su capacidad de deformar. El daño producido por el paso de las cargas del tráfico se transforma entonces en pequeñas micro-fisuras que van creciendo y uniéndose (meso-fisuras), hasta provocar una superficie de fallo dominante que termina propagándose a través de material (macro-fisura, apreciable a la vista). Así, el fenómeno de fisuración por fatiga se puede dividir en tres fases principales: inicio de la fisura, propagación (cuya velocidad de avance dependerá del tipo de carga, y del espesor y la rigidez del material), y fallo por fisuración (la cual se caracteriza por la total propagación del daño estructural producido, con la consiguiente aparición de la fisura en la superficie de la capa) (Florence 2005; Jenq & Perng 1991).

Una de las grandes dificultades que presenta el estudio de este fenómeno es que dentro del volumen del material bituminoso donde tiene lugar el daño por fisuración, la distri-

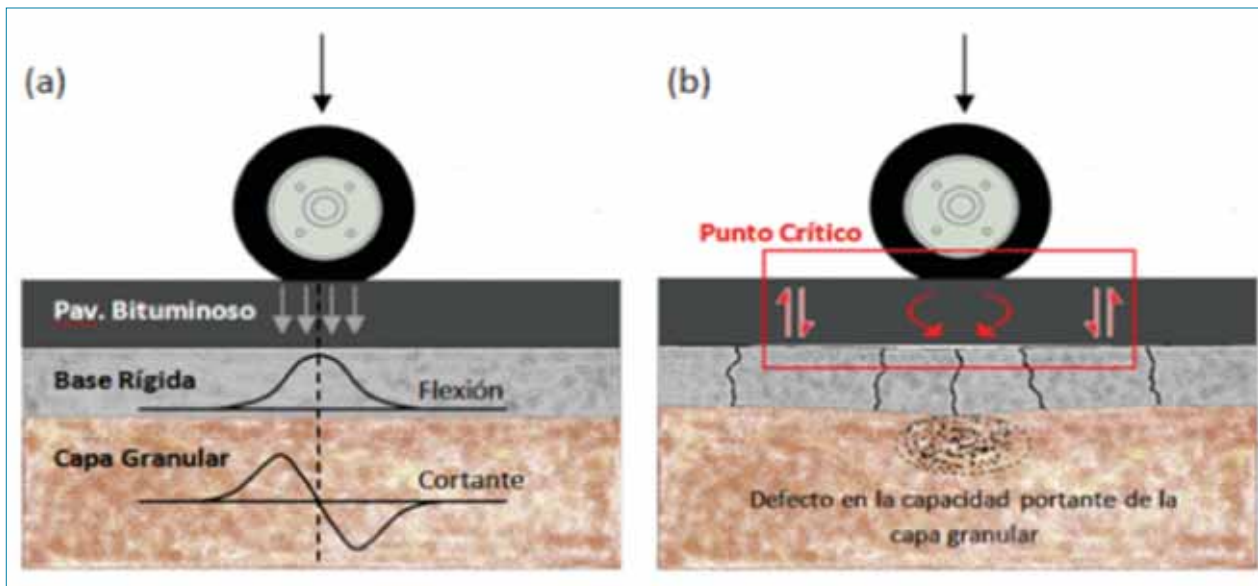


Figura 1. (a) Esfuerzos generados debido a la acción de las cargas del tráfico (Colombier 1997). (b) Punto de debilidad donde tiene lugar preferentemente el desarrollo de procesos de fisuración por fatiga en mezclas bituminosas (Thom 2008).

bución volumétrica de las micro y meso-fisuras es dispersa y aleatoria en las tres dimensiones (Jenq & Perng 1991). Además, el hecho de que su tamaño impida su apreciación visual, dificulta en gran medida la identificación del inicio del proceso, así como la evaluación del nivel de daño causado. Así, a pesar de que una vez alcanzada la fase de macro-fisuración el proceso de daño se hace más acentuado y menos disperso (y por tanto apreciable visualmente), es necesario establecer métodos de evaluación que permitan la cuantificación real del daño producido en el material durante todo el proceso en sus diferentes etapas.

A la hora de diseñar un ensayo de laboratorio que pretenda evaluar el comportamiento de mezclas bituminosas ante el fenómeno de fisuración por fatiga debida a las cargas del tráfico, es necesario tener en cuenta todas estas consideraciones. Se deberán adaptar los tipos de esfuerzos a aplicar (cortante y flexión), y simular las situaciones más desfavorables que se puedan dar en el firme. Por otra parte, el método de ensayo debe permitir la evaluación del comportamiento mecánico del material durante todo el proceso en sus diferentes etapas. Finalmente, la geometría del ensayo debe de ser adecuada para garantizar su fácil reproducción, con un coste económico de ejecución bajo (de forma que su uso pueda hacerse extensivo a diferentes centros de investigación), y de forma que permita el estudio de materiales con probetas sencillas de fabricar.

2.2 Descripción del dispositivo de ensayo

En base a lo expuesto en el punto anterior, desde esta investigación se ha diseñado el dispositivo de ensayo UGR-FACT que permite inducir sobre una probeta de mezcla bituminosa el desarrollo de una fisura por fatiga controlada, a partir de la simulación de las sollicitaciones reales de tráfico a las que está sometido el material durante su vida de servicio. De esta forma puede evaluarse el comportamiento mecánico a fisuración tanto de mezclas bituminosas individualmente, como de secciones de firme compuestas por varias capas, así como de sistemas anti-remonte de fisuras (geotextiles, geomallas, etc.), fabricados en laboratorio o extraídos como testigos del firme.

El dispositivo está compuesto por una base (Figura 2a), dos apoyos deslizantes (Figura 2b) y un cabezal de aplicación de carga (Figura 2c). La base está formada por el sistema de apoyo y unión del prototipo a la prensa de ensayo, sobre la que se encuentra soldada la plataforma de deslizamiento de los apoyos deslizantes, compuesta por dos planos inclinados y un par de raíles que permiten el desplazamiento de los apoyos sin riesgo de cabeceos ni movimientos residuales (que puedan inducir errores en las medidas de deformación tomadas), así como por dos vástagos verticales que serán utilizados para llevar a cabo la toma de medidas de las deformaciones verticales en la zona superior de la probeta (utilizando medidores tipo LVDT, Figura 2f).

Método de Ensayo UGR-FACT para el estudio del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas

Los apoyos deslizantes están formados por dos carros de bolas acoplados a los railes situados en la base (permitiendo la transmisión efectiva de las cargas), sobre los que se incorporan dos plataformas de apoyo en las que se fijará la probeta a ensayar (adherida mediante el empleo de una resina epoxi), así como los medidores de deformación horizontal (uno a cada lado, Figura 2g). Este sistema permite inducir desplazamientos en la probeta tanto en sentido horizontal como en vertical, reproduciendo dentro del volumen de estudio los esfuerzos de flexión y cortante debidos a las cargas del tráfico, así como de tracción simulando el efecto acentuador de las retracciones térmicas.

La distancia de separación entre los apoyos deslizantes puede variar en función del tipo de deterioro en el firme que se desee reproducir, de manera que pueden evaluarse firmes en los que en la capa de base existe una cierta discontinuidad (como una fisura o pre-fisura ya existente, o una junta de dilatación), o firmes donde existe algún defecto considerable en la base (como un bache o socavón). Para la fijación de dichas distancias de separación se emplea un sistema de pernos que permiten fijar las posiciones de los carros durante el tiempo de adhesión de la probeta a los mismos antes de ser llevado a cabo el ensayo (Figura 2d).

Finalmente, el cabezal de aplicación de carga se trata de un elemento independiente del cuerpo del dispositivo que va unido a la zona superior o travesaño de la prensa, y está compuesto por una pieza con el suficiente espesor para evitar su deformación durante la aplicación de la carga (y así evitar inducir errores diferenciales por deformaciones propias, independientes a las de la probeta), que proporcione una superficie plana sobre la que puedan colocarse los medidores de deformación verticales (Figura 2f).

Como factor clave en el desarrollo del dispositivo fue necesario tener en cuenta que para poder evaluar de forma efectiva el fenómeno de fisuración por fatiga, es fundamental evitar la problemática asociada a su dispersión tridimensional y aleatoriedad. Así, el análisis del comportamiento mecánico de los materiales ensayados se realiza a través de un volumen representativo en el que tiene lugar el desarrollo del proceso de fisuración (gracias al control de las deformaciones producidas tanto en sentido vertical como en horizontal). De esta forma, puede obtenerse de manera precisa la cantidad de energía disipada durante el ensayo en el interior de dicho volumen, permitiendo analizar la evolución del daño sufrido durante el proceso de fisuración (Van Dijk & Visser 1977; Pronk & Hopman 1991; Ghuzlan 2001; Shen et al. 2006). Este concepto permite una evaluación precisa de la respuesta de los materiales ensayados en cada una de las etapas del proceso, permitiendo controlar su aleatoriedad y distribución tridimensional (Figura 3).

Finalmente, como complemento al desarrollo del dispositivo se estableció la posibilidad de adicionar un tercer vástago en el que fijar una cámara para el control del seguimiento de la degradación del material, y así correlacionar los datos obtenidos a través de las imágenes (área de fractura medida en mm²) con los de energía disipada en el interior del volumen representativo (Figura 4).

2.3 Definición de las condiciones de ensayo

El ensayo se lleva a cabo a temperatura controlada en el interior de una cámara climática (para poder evaluar la respuesta del material ante diferentes estados visco-elásticos), aplicando cargas cíclicas verticales a tensión controlada en forma de seno-

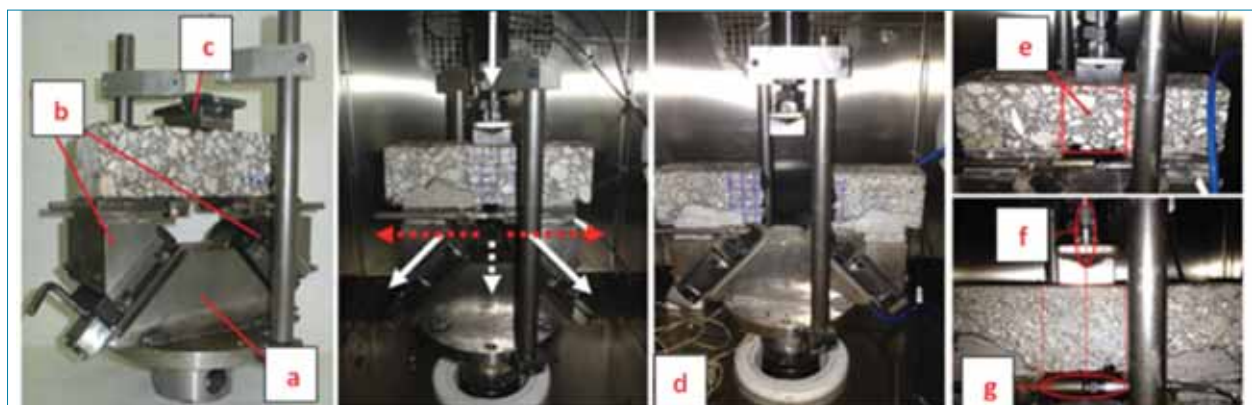


Figura 2. Vista de las diferentes partes del dispositivo de ensayo UGR-FACT.

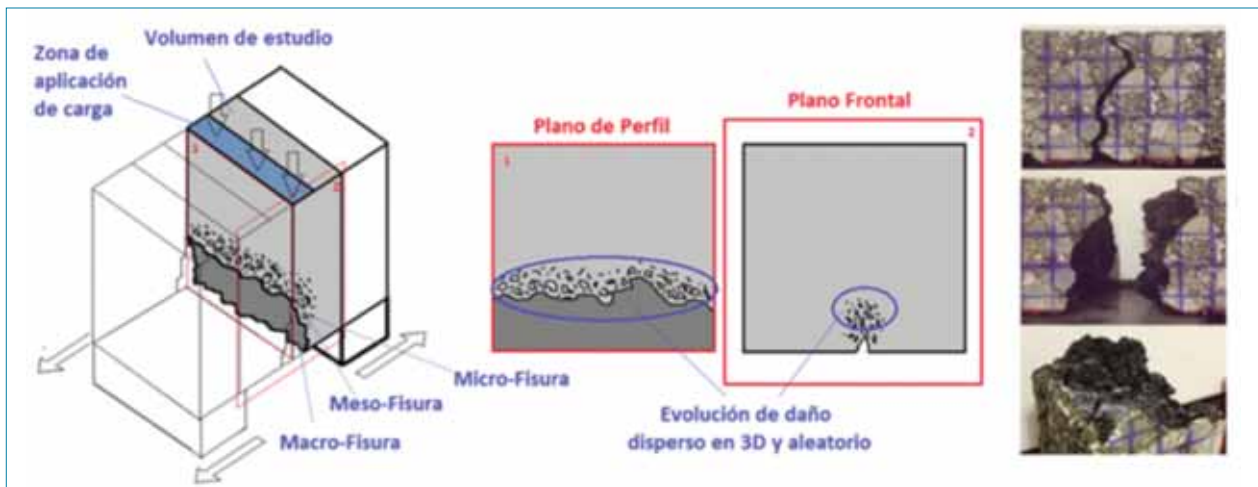


Figura 3. Representación de la propagación dispersa y aleatoria del proceso de fisuración en el interior del volumen representativo de estudio. Imágenes reales de un ensayo que lo corroboran.

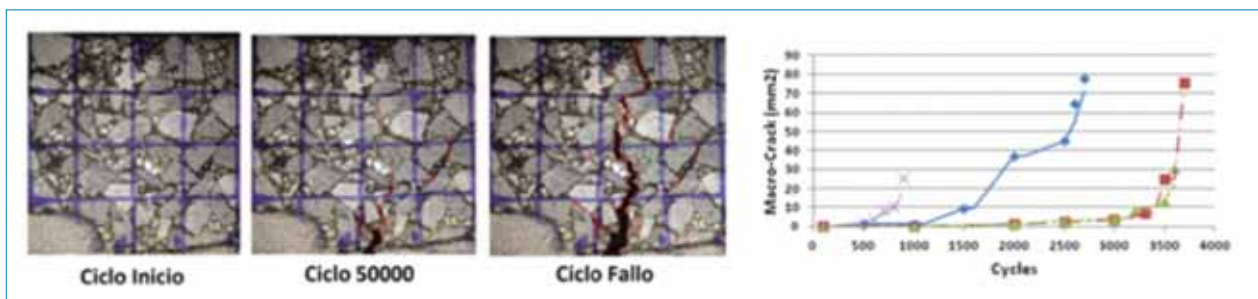


Figura 4. Detalle del control de evolución de degradación del material mediante cámara.

verso (que simulen el paso de los vehículos). Los parámetros (amplitud de carga, frecuencia, y periodos de descanso) y condiciones de ensayo (temperatura de ensayo, distancia entre apoyos, humedad, etc.), se adaptarán en función de las necesidades de evaluación del comportamiento del material. Durante el desarrollo del método de ensayo se llevó a cabo un estudio en profundidad de aforos de tráfico de todo el mundo, así como de condiciones climáticas, a partir de los cuales se establecieron parámetros de referencia a aplicar durante el ensayo (en función de la velocidad de circulación, tipo de eje, etc.).

El criterio de fin de ensayo seleccionado ha sido la propagación total de la macro-fisura a través de la probeta, provocando su fallo y separación en dos piezas. Alternativamente también puede considerarse el ensayo por terminado cuando el número de ciclos de carga alcanza los 2.000.000 (considerando que a partir del valor de carga aplicado se encuentra el límite de resistencia a fisuración por fatiga).

Para la evaluación de mezclas bituminosas individualmente o en varias capas se utilizan probetas prismáticas obteni-

das a partir del corte con sierra de placas fabricadas en laboratorio o procedentes de tortas extraídas como testigo del firme. La obtención de probetas de ensayos a partir de una probeta principal garantiza una mayor homogeneidad de la mezcla ensayada (fabricadas y compactadas en las mismas condiciones). Las dimensiones finales de las probetas variarán en función del tamaño máximo de árido de la mezcla y en función del material y número de capas a estudiar.

2.4 Análisis teórico para el estudio del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas

Como complemento al dispositivo de ensayo presentado, desde esta investigación también se aportó un desarrollo teórico para el análisis del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas, en el que se definieron 2 nuevos parámetros a utilizar en la evaluación de este tipo de materiales. En dicho desarrollo se combinó el análisis fenomenológico tradicional con el estudio de la energía disipada

Método de Ensayo UGR-FACT para el estudio del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas

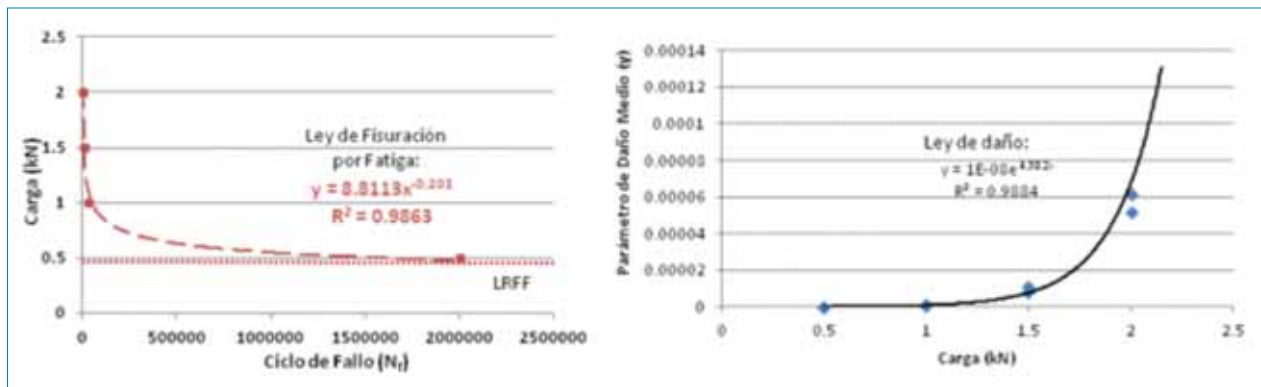


Figura 5. Ejemplo de ley de fisuración por fatiga (izq.) y ley de daño a fisuración (dcha.).

en el interior del volumen representativo, de manera que pudo establecerse una evaluación a tres niveles:

- **Determinación del valor mínimo de tensión que es capaz de provocar el desarrollo de un proceso de fisuración por fatiga en el material.** Aplicando un enfoque fenomenológico que relacione la amplitud de las tensiones aplicadas sobre la mezcla con el número de repeticiones de cargas que causan su fallo por fisura (N_f). En función de las condiciones de ensayo aplicadas y del tipo de material evaluado, el N_f obtenido variará. Así, utilizando diferentes condiciones de carga podrá definirse una ley de fisuración por fatiga, que permita el diseño de materiales más resistentes ante este fenómeno bajo diferentes condiciones de ensayo (Figura 5, izq.).
- **Determinación del nivel de daño a fisuración sufrido por el material ante unas condiciones determinadas de carga (Parámetro de Daño medio).** Además de establecer un análisis fenomenológico, para terminar de definir completamente el comportamiento ante la fisuración por fatiga, es necesario cuantificar el daño real que se ha producido en el material debido a este fenómeno. Según el enfoque de la energía disipada, la mezcla bituminosa disipará más energía cuanto mayor daño se produzca en la probeta ensayada, o expresado de otra manera, para un mismo nivel de daño un material disipará más energía cuanto más resistente sea (puesto que será necesario introducir más energía para alcanzar dicho nivel de daño). No obstante, la energía disipada en un ciclo depende de la energía disipada en los ciclos de carga previos, lo que significa que es dependiente de su historial de carga (Eberik & Sucouglu

2002). De hecho, únicamente la cantidad relativa de disipación de energía creada por cada ciclo de carga (lo que excluye la energía disipada asociada a comportamientos pasivos como la energía térmica), puede provocar un daño adicional en la mezcla (Shen & Carpenter 2007).

En base a estas consideraciones, para poder analizar la evolución y cuantificación real del daño por fisuración que tiene lugar en la mezcla, es necesario utilizar el concepto de tasa de cambio de energía disipada "RDEC" (Carpenter & Shen 2006; Shen & Carpenter 2007). El uso de este parámetro permite eliminar la energía que es disipada sin producir daño en la mezcla (como la energía disipada en forma de calor), proporcionando un buen indicador del daño por fisuración causado en la mezcla de un ciclo de carga a otro. Así, utilizando este concepto, y extrapolando que la forma más precisa de cuantificar la evolución del daño por fisuración sufrido por el material durante el ensayo es mediante la representación del RDEC acumulado, desde esta investigación se definió un nuevo **parámetro de daño medio (γ)** asociado al proceso de fisuración de cada material y a las condiciones de ensayo establecidas. En base a los valores del parámetro medio de daño obtenidos para cada nivel de carga, puede definirse la ley de daño a fisuración por fatiga (Figura 5, dcha.). Mediante esta ley de daño puede determinarse qué materiales, y bajo qué condiciones, son más susceptibles de ser afectados por el fenómeno de fisuración por fatiga, de manera que puede ser utilizada como criterio en el diseño óptimo de la mezcla.

$$RDEC = \frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_n}; \gamma = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} RDEC_i}{N_f}$$

- Determinación de la evolución del daño a fisuración sufrido por el material (Umbral de daño).** Además del parámetro presentado en el punto anterior, desde esta investigación se definió el parámetro **Displacement Ratio** utilizado para definir la evolución de las diferentes etapas del proceso de fisuración. Este parámetro adimensional que relaciona las deformaciones horizontales y verticales producidas en el interior del volumen representativo, permite estimar los ciclos de inicio del proceso de fisuración (N_i) y macro fisuración (N_{Mf}), mediante el análisis la curva definida durante el ensayo debido a los cambios de deformaciones producidos en el volumen representativo en cada una de las etapas del proceso (Figura 6). Una vez definidos los ciclos N_i y N_{Mf} , mediante el cál-

culo de la energía disipada acumulada para cada uno de estos ciclos se pueden establecer los umbrales de daño del material (Figura 7), que marcarán la cantidad de energía que puede disipar el material evaluado sin que en él se presente daño por fisuración (también considerado como el límite de energía disipada de deformación plástica), la cantidad de energía que puede disipar sin que en él aparezca un daño estructural irreparable (macro-fisura), o la cantidad de energía necesaria para provocar su fallo total por fisuración. Así, cuanto mayores sean los umbrales de daño del material, más resistente será ante un proceso de fisuración por fatiga. Además, estos umbrales también permitirán estudiar las características de ductilidad y tenacidad durante su propagación.

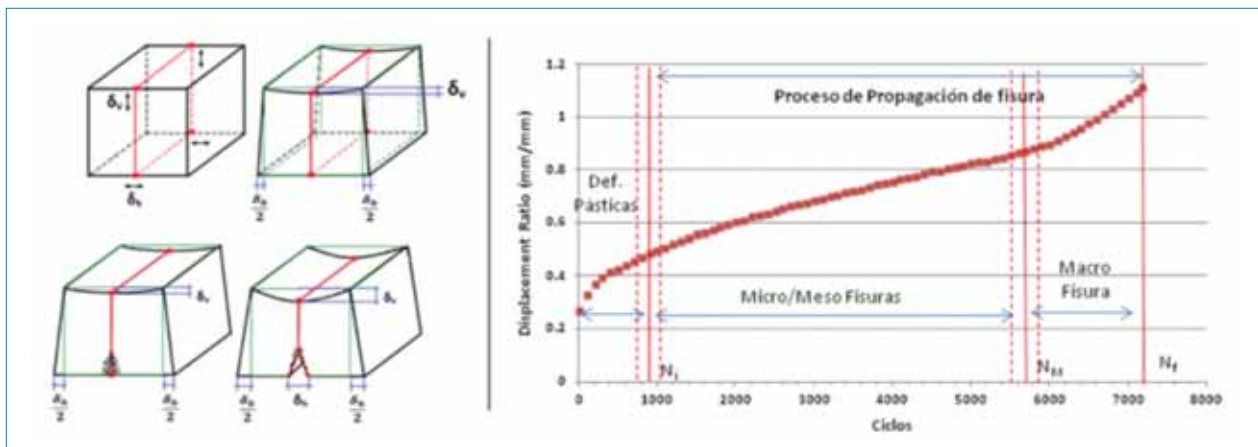


Figura 6. Ejemplo de curva de evolución de Displacement Ratio y cálculo de N_i y N_{Mf} .

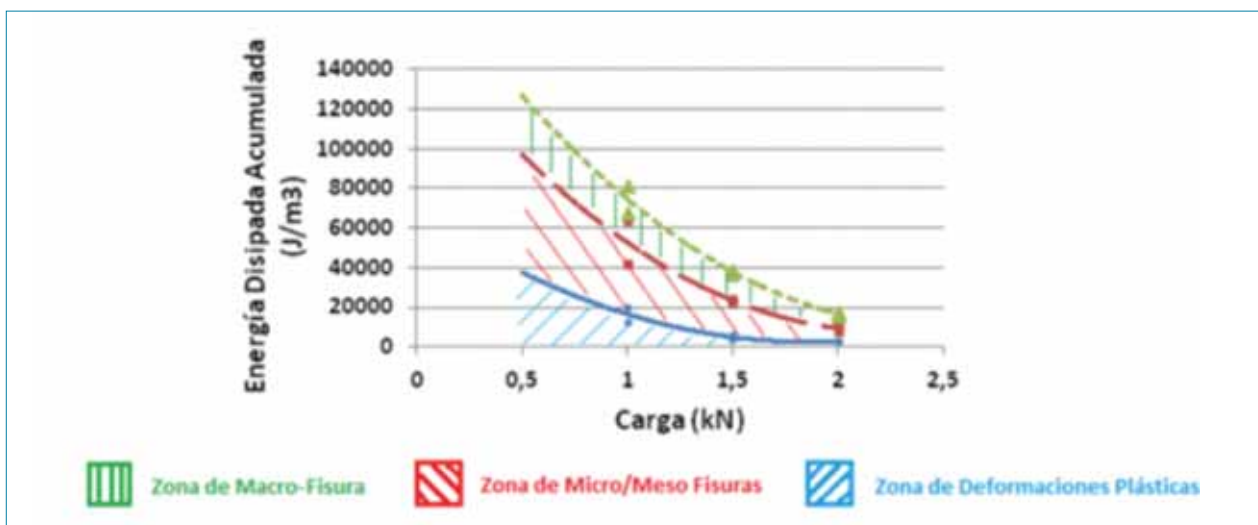


Figura 7. Ejemplo de umbrales de daño a fisuración que delimitan la respuesta mecánica del material.

Método de Ensayo UGR-FACT para el estudio del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas

3. Ejemplos de Aplicación

El método de ensayo UGR-FACT ha sido validado frente a diferentes condiciones de repetibilidad, obteniendo unos resultados elevados tanto en términos de energía disipada ($r=18\%$) como en términos de ciclo de fallo ($r=16\%$). Además, la sensibilidad del método en relación a las condiciones de ensayo aplicadas (amplitud de carga, frecuencia, temperatura, etc.), naturaleza del árido, tipo de ligante empleado, y tipo de mezcla, también ha sido testada demostrando su adecuación para poder llevar a cabo una evaluación precisa del comportamiento a fisuración por fatiga de diferentes materiales y bajo distintas condiciones. Este hecho resulta muy beneficioso a la hora de optimizar el diseño de mezclas bituminosas a nivel de laboratorio frente a esta patología, puesto que permite seleccionar qué material es más adecuado en función de las condiciones de servicio a las que va a estar sometida.

El objetivo de este apartado es mostrar las características del UGR-FACT y cómo puede ser aplicado, así que en lo que sigue mostrarán una serie de resultados a modo de ejemplo, pertenecientes a estudios de investigación ya desarrollados con este método. En primer lugar, en la Figura 8 se muestran los resultados pertenecientes al estudio de una mezcla AC en la que manteniendo constante el tipo de betún, arena y filler empleados (B 35/50, caliza y carbonato cálcico, respectivamente), se modificó la naturaleza del árido grueso para evaluar su influencia en el comportamiento a fisuración de la mezcla (ofita y caliza). Como se puede observar la mezcla con árido ofítico presentó una mayor resistencia a la fisuración por fatiga, poniéndose de manifiesto además la fractura de los áridos calizos durante el desarrollo del fenómeno, debido a su menor resistencia mecánica (Figura 9). Así, a la hora de diseñar dicha mezcla se debe tener en cuenta que su resistencia a fisuración por fatiga se ve incrementada si se emplea árido tipo ofítico.

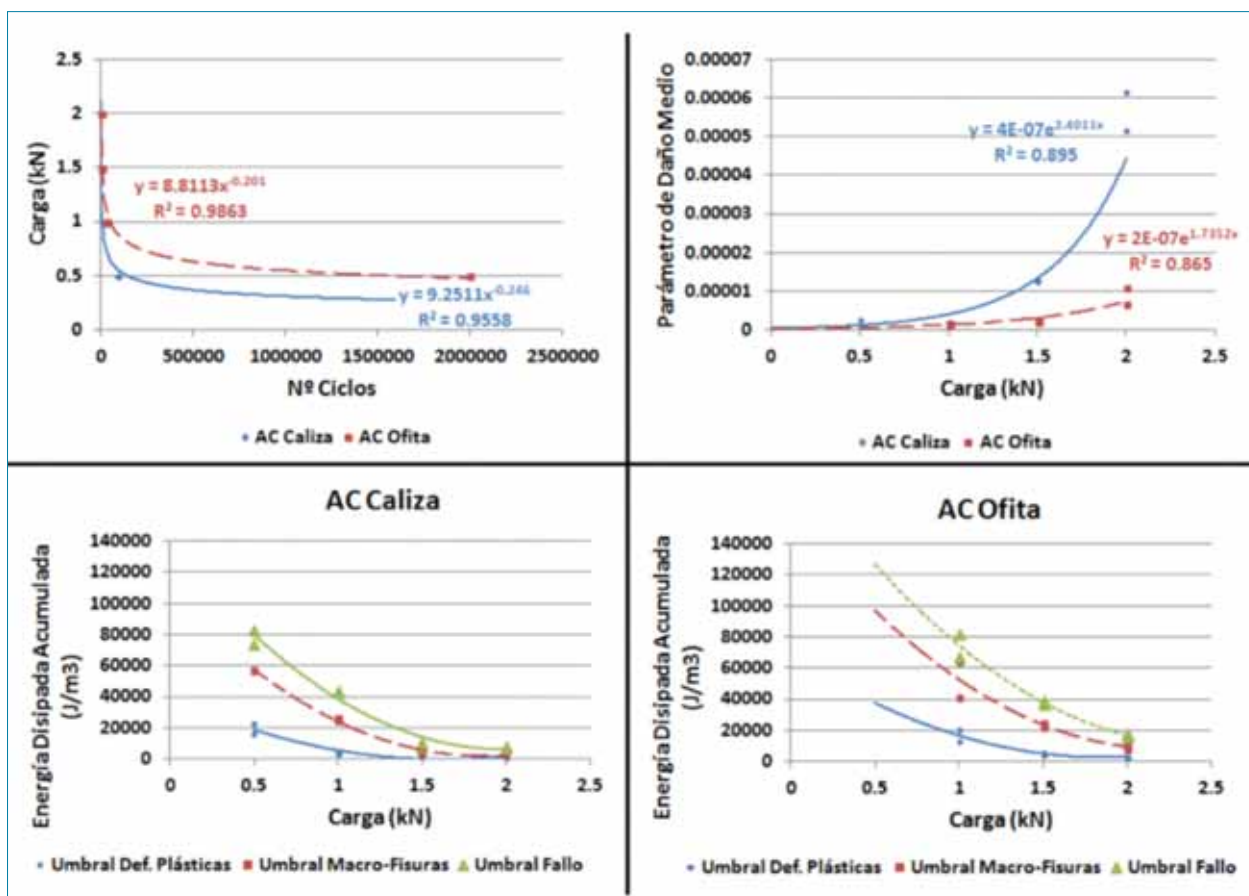


Figura 8. Resultados de estudio de la influencia de la naturaleza del árido grueso en el comportamiento a fisuración.

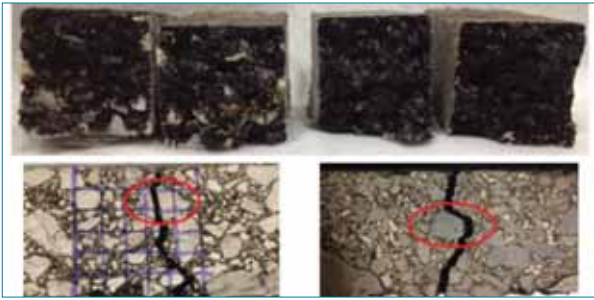


Figura 9. Árido calizo fracturado tras proceso de fisuración (izq.); árido ofítico bordeado por la fisura (dcha.).

En el mismo sentido que en el caso anterior, en la Figura 10 se muestran los resultados del comportamiento a fisuración de una misma mezcla BBTM 11A, en la que se dejó constante el esqueleto granulométrico (grueso ofítico, fino calizo y filler cemento), y se varió el tipo de ligante utilizado (BM3c, BMAVC, B 50/70+1,5%PNFU por vía seca, B 50/70). Los resultados pusieron de manifiesto que, a igualdad de condiciones de ensayo, el daño a fisuración producido en las mezclas con betunes modificados es mucho menor que el producido en la mezcla con betún convencional. Además, en el control de la evolución de degradación del material mediante imágenes (Figura 11), puede observarse las diferencias en el tipo de fisura aparecidas en el material (en términos de ancho de fisura y grado de ramificación). Por otra parte, puede destacarse el buen comportamiento a fisuración por fatiga de las mezclas modificadas con caucho, tanto por vía húmeda, como por vía seca.

Finalmente, la Figura 12 muestra algunos de los resultados obtenidos en un estudio de investigación de varias sec-

ciones de firme en las que se analizó la influencia del comportamiento de distintos sistemas anti-fisuras. Así, se evaluó el comportamiento de un paquete de firme compuesto por una mezcla AC 16 S en una capa intermedia de 5 cm, y una mezcla BBTM 11A en capa de rodadura de 3 cm. Por su parte, los dos sistemas anti-fisuras estudiados fueron un geotextil impregnado y un sistema anti-fisuras innovador compuesto por las capas de resistentes del neumático (metálica y textil). Los resultados demuestran que el empleo de los sistemas anti-reflexión de fisuras consiguen retardar la aparición de ésta. Además, es de destacar que el sistema anti-fisuras obtenido a partir de la deconstrucción de los neumáticos usados (manta anti-fisuras) resulta más efectivo que el geotextil impregnado. La presencia de caucho envolviendo las tiras resistentes de fibras y metálicas, actúa como material elástico capaz de disipar parte de la energía que de otra forma se hubiera consumido en propagación de fisura.

4. Conclusiones

Este artículo presenta el método de ensayo UGR-FACT, un nuevo ensayo de laboratorio desarrollado en la Universidad de Granada, para evaluar el comportamiento mecánico de mezclas bituminosas ante fisuración por fatiga. Para ello, en primer lugar se describen las características generales del ensayo, del dispositivo diseñado para su ejecución, así como sus características principales y los fundamentos teóricos para la evaluación de los resultados. Además, a modo de ejemplo se exponen algunos de los resultados obtenidos en investigaciones ya desarrolladas utilizando este método de ensayo. Se

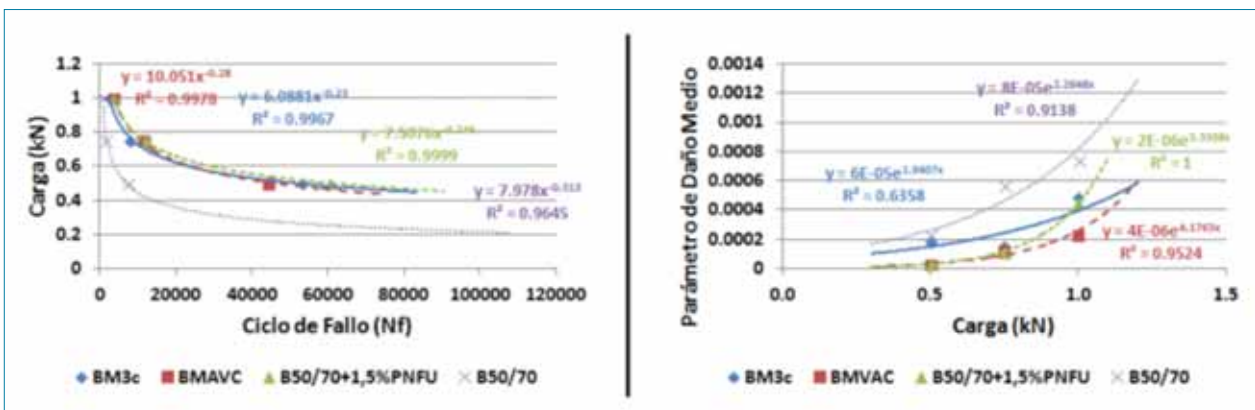


Figura 10. Resultados de un estudio de la influencia del tipo de ligante en el comportamiento a fisuración de las mezclas.

Método de Ensayo UGR-FACT para el estudio del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas

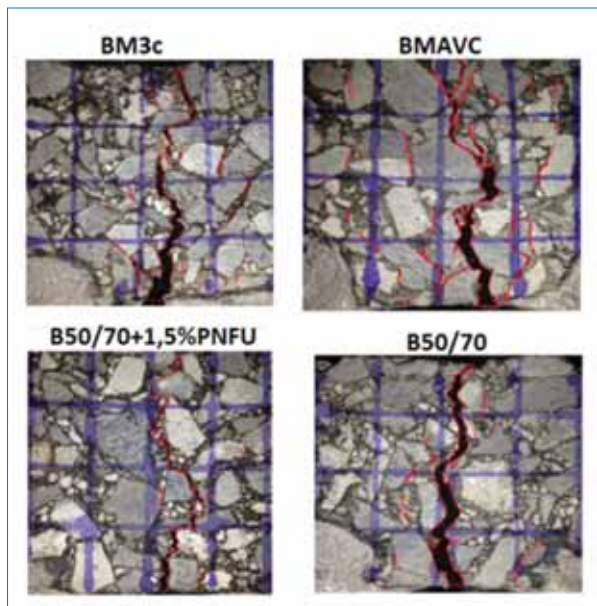


Figura 11. Influencia del tipo de ligante en la forma de propagación de la fisura.

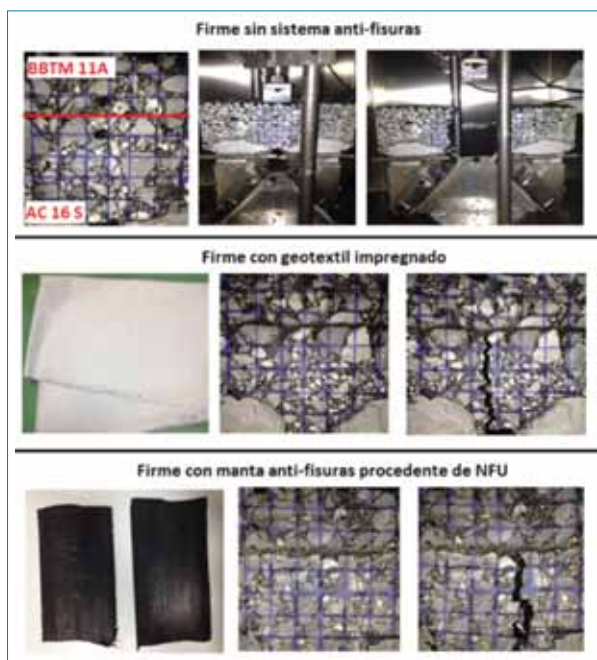


Figura 12. Resultados del comportamiento a fisuración de un firme con diferentes sistemas anti-reflexión de fisuras.

exponen a continuación las principales conclusiones extraídas de dichas investigaciones:

- El dispositivo desarrollado para la ejecución del ensayo es un equipo de dimensiones reducidas, adaptable a cualquier prensa dinámica, y con un coste económico bajo en

comparación con otros dispositivos empleados en ensayos similares, lo que facilita la generalización de su uso para el estudio del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas.

- Este dispositivo permite la evaluación de mezclas bituminosas individualmente, de secciones de firmes compuestas por varias capas, así como de sistemas anti-remonte de fisuras. Así, mediante la simulación de un estado tensional similar al ocurrido en la carretera durante su vida de servicio, es capaz de inducir sobre un volumen representativo del material evaluado un proceso controlado de inicio y propagación de fisuras, así como un control completo de las deformaciones horizontales y verticales sufridas en dicho volumen (permitiendo evitar los problemas de aleatoriedad y dispersión tridimensional del fenómeno).
- Las probetas utilizadas para la ejecución del ensayo son rápidas de fabricar, de fácil manejo, y garantizan la homogeneidad en su composición y un reducido consumo de materiales. Además, las condiciones de ensayo permiten reproducir de forma adecuada las sollicitaciones mecánicas (velocidad de circulación, carga por eje, etc.) y ambientales (temperatura, humedad, etc.) sufridas por el firme.
- Los nuevos parámetros aportados por esta investigación (Displacement Ratio y Parámetro de daño medio), proporcionan una herramienta útil para el análisis del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas, pudiendo ser utilizados en la caracterización y diseño de estos materiales.
- El método de ensayo UGR-FACT ha sido validado en términos de repetibilidad, sensibilidad a las condiciones de ensayo y a los materiales utilizados, demostrando un gran potencial para optimizar el diseño a fisuración de mezclas bituminosas ante diferentes situaciones.

5. Referencias bibliográficas

- Carpenter, S. H., Shen, S. 2006. A dissipated energy approach to study hot-mix asphalt healing in fatigue. Transportation Research Record 1970, Transportation Research Board, Washington, D. C., 2006, pp. 178–185.
- Colombier, G. 1997. Cracking in pavements: nature and origin of cracks. Prevention of Reflective Cracking in Pavements – RILEM Report 18. Edited by Vanelstraete A. et Franckien L., pp. 1-15.

- Eberik, M. A., Sucouglu, H. 2002. Energy based low-cycle fatigue characteristics of degrading structures. Proceedings of 12th European Conference on Earthquake Engineering, London.
- Florence, C. 2005. Étude expérimentale de la fissuration reflective et la modelisation de la resistance de structures cellulaires. These. Ecole Natonal des Ponts et Chaussées.
- García Carretero, J. 1992. Procedimientos de Estudio en laboratorio. Jornadas sobre Reflexión de Grietas en Carreteras, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX, Madrid.
- Ghuzlan, K. 2001. Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures based upon dissipated energy concepts. Ph. D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.
- Hajj, E., Sebaaly, P., Loria, L. 2008. Reflective cracking of flexible pavements. Phase II: Review of analysis models and evaluation test. Research Report No. 13JF-1, University of Nevada Reno, Nevada.
- 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.
- Pronk, A. C., Hopman, P. C. 1991. Energy dissipation: The leading factor of fatigue. Proc., Conf. of the United States Strategic Highway Research: Sharing the Benefits, Thomas Telford, London, pp. 255–267.
- Shen, S., Airey, G., Carpenter, S., Huang, H. 2006. A dissipated energy approach to fatigue evaluation. Int. J. Road Mater. Pavement Des., Vol. 7(1), pp. 47–69.
- Shen, S., Carpenter, S. H. 2007. Dissipated energy concepts for HMA performance: fatigue and healing. Center of Excellence for Airport Technology, COE Report No. 29, Technical Report of Research, Federal Aviation Administration. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.
- Thom, N. 2008. Principles of pavement engineering. 470 pag. London : Thomas Telford Ltd.
- Van Dijk, W., Visser, W. 1977. The energy approach to fatigue for pavement design. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 46, pp. 1-40.