

**IAG261-01-2013**  
**MÉTODO DE ENSAYO UGR-FACT PARA EL ESTUDIO DEL**  
**COMPORTAMIENTO A FISURACIÓN POR FATIGA DE MEZCLAS**  
**BITUMINOSAS.**  
**MÉTODO DE ENSAIO UGR-FACT PARA ESTUDAR O**  
**COMPORTAMENTO A FISSURAÇÃO POR FADIGA DE MISTURAS**  
**BETUMINOSAS**

Fernando Moreno-Navarro  
LabIC.UGR, Universidad de Granada  
Granada, España  
fmoreno@ugr.es

M<sup>a</sup> Carmen Rubio-Gámez  
LabIC.UGR, Universidad de Granada  
Granada, España  
mcrubio@ugr.es

## **Resumen**

El estudio del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas a nivel de laboratorio resulta fundamental a la hora de garantizar la construcción de firmes de carretera duraderos. Estos materiales son sometidos a una serie de ensayos que tratan de reproducir los esfuerzos y condiciones de servicio sufridos durante su vida útil, de manera que se analice su resistencia ante las diferentes patologías que pueden aparecer. Entre dichas patologías, la fisuración por fatiga es una de las más comunes en los pavimentos de todo el mundo, siendo una de las principales causantes de las intervenciones de rehabilitación y mantenimiento de firmes. Debido a este hecho, la mejora en el diseño de mezclas bituminosas utilizando ensayos que permitan una evaluación adecuada ante este fenómeno resulta primordial para reducir la inversión económica realizada. Desde la Universidad de Granada se ha desarrollado un nuevo método de ensayo que permite simular las solicitaciones que provocan la fisuración por fatiga en los firmes de carretera. El dispositivo desarrollado permite la evaluación de materiales simples y compuestos (paquetes de firme y sistemas anti-fisuras), induciendo sobre éstos un proceso controlado de fisuración por fatiga, de manera que puede analizarse el daño sufrido en cada una de sus etapas. El estudio se lleva a cabo sobre un volumen representativo del material donde tiene lugar la aparición de la fisura, realizando un estudio de la energía disipada durante el ensayo. En este artículo se presentan las características del dispositivo de ensayo desarrollado, así como de los fundamentos teóricos definidos para analizar sus resultados.

## **Resumo**

O estudo do comportamento mecânico de misturas de asfalto no laboratório é essencial para assegurar a construção da superfície de estrada durável. Estes materiais são submetidos a uma série de ensaios que tentam reproduzir as condições de serviço e os esforços sofridos durante a sua vida útil, a fim de analisar a sua resistência a diferentes doenças que possam ocorrer. Entre estas doenças, fendas de fadiga é uma das mais comuns nos andares em todo o mundo, uma das principais causas de intervenções de reabilitação e manutenção firmes. Devido a este fato, a melhoria no projeto de misturas asfálticas utilizando ensaios que permitem a avaliação adequada a este fenômeno é fundamental para reduzir o investimento econômico. Da Universidade de Granada desenvolveram um novo método de teste para simular as tensões que causam trincas por fadiga em pavimentos rodoviários. O dispositivo desenvolvido permite o estudo de materiais e compostos (firmes e sistemas anti-crack) induzindo um processo controlado neles para a fissuração por fadiga, de modo que o dano pode ser analisado em cada uma das suas fases. O estudo foi realizado num volume representativo do material ocorre onde a ocorrência da fissura, a realização de uma pesquisa com a energia dissipada durante o ensaio. Este artigo apresenta as características do dispositivo de teste desenvolvido e os fundamentos teóricos definidos para a análise dos resultados.

## INTRODUCCIÓN

La fisuración por fatiga es una de las patologías más comunes y una de las principales causantes del fin de la vida de servicio en firmes de carretera de todo el mundo. La aparición de este fenómeno se debe principalmente al paso del tráfico y la acción de los gradientes térmicos (Colombier, 1997). Esta patología tiene unas consecuencias que pueden ser nefastas 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).

Actualmente el estudio de este fenómeno sigue siendo una de las prioridades de investigación en el ámbito de la ingeniería de carreteras, y concretamente, en el diseño de mezclas bituminosas. A nivel de laboratorio, 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 método 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, 1992).

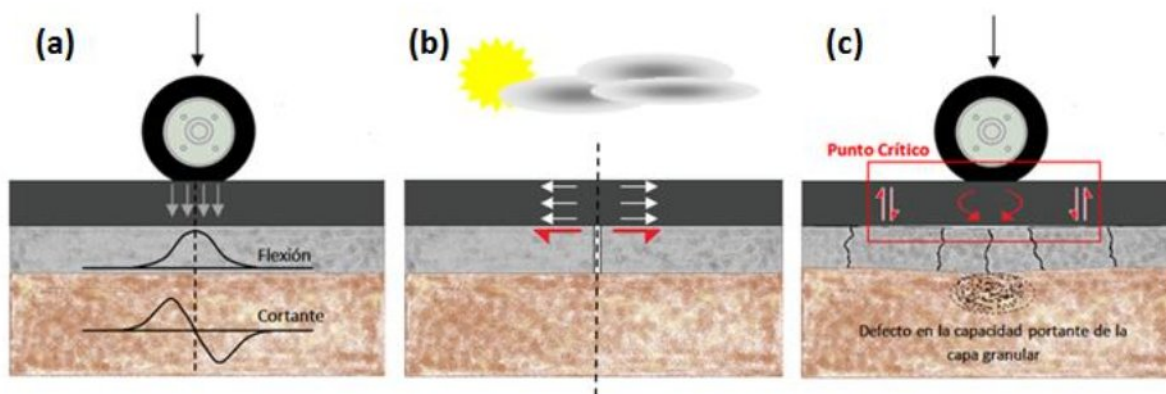
Bajo estas consideraciones, y con el objetivo de dar solución a esta problemática, desde la Universidad de Granada (España) se ha desarrollado el método de ensayo UGR-FACT (University of Granada – Fatigue Asphalt Cracking Test) que permite evaluar el comportamiento a fisuración por fatiga tanto de mezclas bituminosas, como de secciones de firmes y sistemas anti-reflexión de fisuras. Para ello, se ha diseñado un nuevo dispositivo de ensayo capaz de provocar un proceso controlado de inicio y propagación de fisuras, a través de la simulación de las condiciones de fatiga que sufren las mezclas bituminosas durante su vida de servicio en el firme. De esta manera, 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 nuevo método de ensayo permite una evaluación precisa del daño y del comportamiento mecánico de la mezcla. Así, su empleo puede resultar muy útil en la mejora del diseño de este tipo de materiales. El artículo aquí presentado recoge una descripción generalista de dicho método de ensayo, describiendo las principales características del dispositivo desarrollado, así como del fundamento teórico para el análisis de los resultados y la evaluación del comportamiento a fisuración.

## **MÉTODO DE ENSAYO UGR-FACT**

### **Consideraciones Previas al Diseño del Método de Ensayo**

A la hora de diseñar el nuevo dispositivo de ensayo se tuvo en cuenta que los esfuerzos a generar para inducir el proceso de fisuración sobre la probeta debían ser de flexión y cortante, simulando los efectos del paso del tráfico (Figura 1a), y de tracción, simulando las tensiones generadas por las variaciones de temperatura (Figura 1b) (Colombier, 1997). Además, también fue necesario considerar que 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 el proceso de fatiga se desarrolla de forma más rápida, y por tanto, es necesario considerar la evaluación en estas zonas puesto que es donde suele tener lugar la aparición de este fenómeno (Figura 1c) (Thom, 2008).

**Figura 1: (a) Esfuerzos generados debido a la acción de las cargas del tráfico (b) Esfuerzos generados debido a la acción de los gradientes térmicos (c) Punto de debilidad donde tiene lugar preferentemente el desarrollo de procesos de fisuración por fatiga en mezclas bituminosas**



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 distribución de las micro y meso-fisuras es dispersa y aleatoria en las tres dimensiones (Florence, 2005; Jenq e 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. Por tanto, resulta complicado establecer un control preciso del daño producido en el material durante el desarrollo del ensayo, que abarque cada una de las etapas asociadas a la evolución de la fisura (inicio, propagación y fallo). En base a este hecho, a la hora de diseñar el nuevo dispositivo de ensayo también se tuvo en cuenta este aspecto de manera que pudiera establecerse un control del estado de degradación tanto cuantitativo (midiendo la cantidad de daño asociado a cada una de las etapas del proceso de manera precisa, a través de las deformaciones sufridas en el entorno de la zona fisurada), como cualitativo (controlando la evolución visual del proceso, atendiendo a aspectos de forma, ancho, ramificación, etc.).

Finalmente, como ultimas consideraciones durante el diseño del dispositivo de ensayo, se tuvo en cuenta que su geometría debía 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 (tanto de mezclas bituminosas individuales, como de secciones completas de firme o sistemas anti-fisuras). Por otra parte, una vez desarrollado el equipo necesario para inducir y medir un proceso de fisuración controlado, también fue necesario definir un fundamento teórico que permitiera llevar a cabo una evaluación precisa y fiable del comportamiento a fisuración por fatiga del material evaluado. Para ello, es fundamental evitar la problemática asociada a la heterogeneidad del proceso, y utilizar unos parámetros teóricos que permitan cuantificar de forma precisa el daño sufrido por el material en forma de fisura, así como su evolución a lo largo del ensayo en cada una de sus etapas.

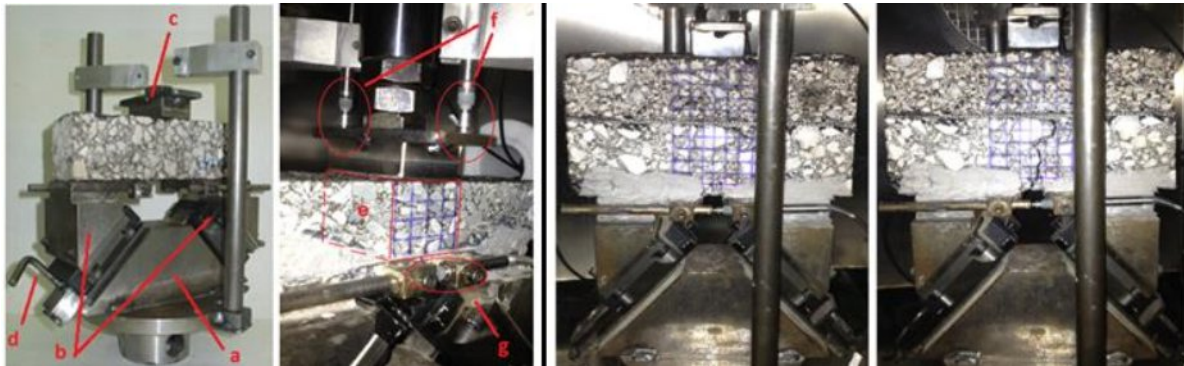
## Descripción del Dispositivo de Ensayo

En base a lo expuesto en el apartado 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 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.

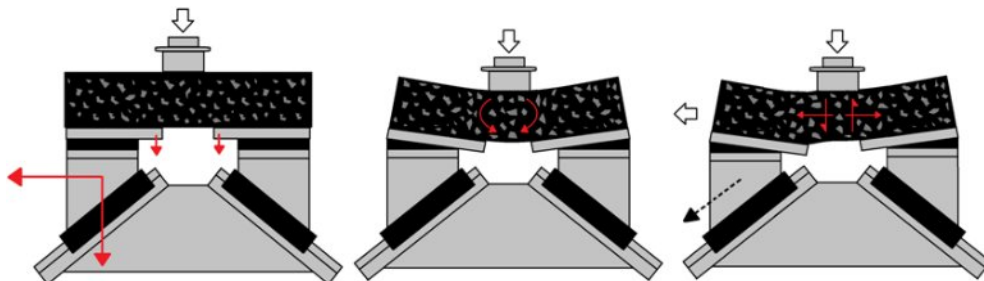
El dispositivo está compuesto por una base (Figura 2a), dos apoyos deslizantes (Figura 2b) y un cabezal de aplicación de carga (Figura 2c). La base está formada por una plataforma compuesta por dos planos inclinados y un par de raíles que permiten el desplazamiento de los apoyos sin riesgo de cabeceos ni movimientos residuales (que puedan inducir errores en las medidas de deformación tomadas), así como por dos vástagos verticales que son utilizados para llevar a cabo la toma de medidas de las deformaciones verticales en la zona superior de la probeta (Figura 2f).

**Figura 2: Dispositivo de ensayo UGR-FACT**



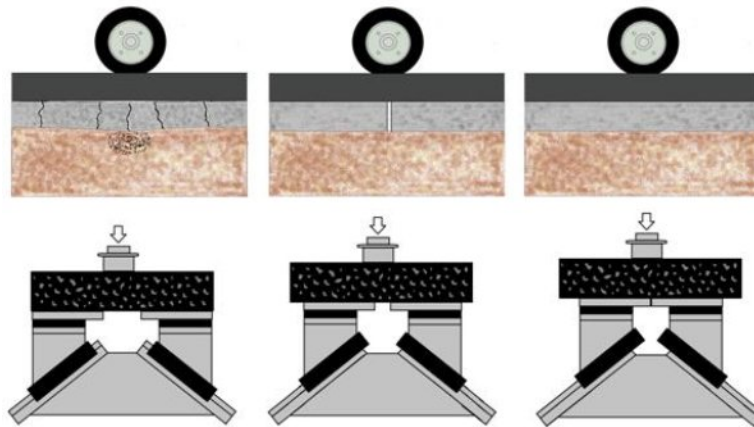
Los apoyos deslizantes están formados por dos carros de bolas acoplados a los raíles situados en la base (permitiendo la transmisión efectiva de las cargas, que generarán los esfuerzos de tracción y cortante), sobre los que se incorporan dos placas las que se fijará la probeta a ensayar (adherida mediante el empleo de una resina epoxi), así como los medidores de deformación horizontal (uno a cada lado, Figura 2g). Además, bajo estas placas de apoyo se sitúan dos elementos elásticos fabricados en caucho que permiten el movimiento de flexión de la probeta. Así, la configuración del sistema permite una serie desplazamientos que inducen sobre el volumen del material evaluado unos esfuerzos de flexión y cortante (simulando las cargas del tráfico), así como de tracción (simulando el efecto acentuador de las retracciones térmicas) (Figura 3). El cabezal de aplicación de carga es un elemento independiente del cuerpo del dispositivo, y está compuesto por una pieza con suficiente rigidez para evitar deformaciones propias durante la aplicación de la carga (evitando errores diferenciales por deformaciones independientes a las de la probeta), proporcionando además una superficie plana sobre la que pueden colocarse los medidores de deformación verticales (Figura 2f).

**Figura 3: Esfuerzos generados a través del dispositivo de ensayo UGR-FACT**



La distancia de separación entre los apoyos deslizantes puede variar en función del tipo de deterioro en el firme que se desee reproducir (Figura 4), 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).

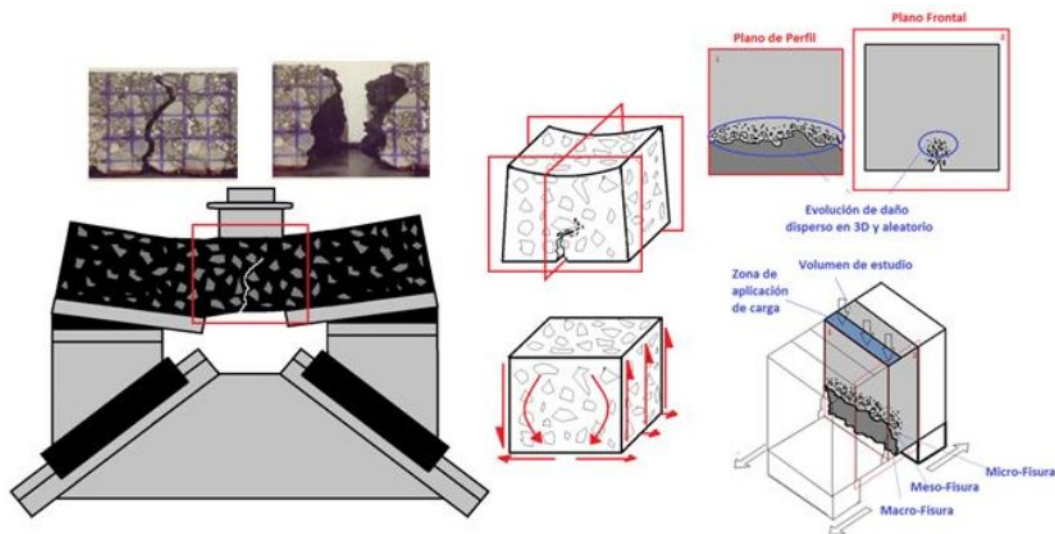
**Figura 4: Diferentes configuraciones de ensayo en función del tipo de deterioro simulado**



Como factor clave para poder evaluar de forma efectiva el fenómeno de fisuración por fatiga, fue fundamental evitar la problemática asociada a su dispersión tridimensional y aleatoriedad. Así, el control del comportamiento a fisuración de los materiales ensayados se realiza a través del estudio del volumen representativo en el que tiene lugar el desarrollo del proceso. De esta forma, a través del estudio de la energía disipada en el interior de dicho volumen (Ghuzlan, 2001; Shen et al., 2006), puede cuantificarse de forma precisa el daño sufrido en cada una de las etapas del proceso, permitiendo controlar la dispersión del fenómeno (Figura 5).

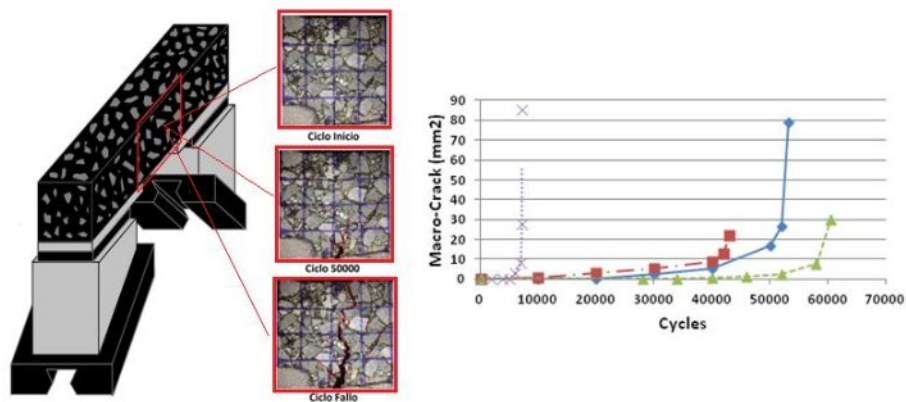
**Figura 5: Representación de la propagación dispersa y aleatoria del proceso de fisuración en el interior del volumen representativo de estudio. Imágenes reales de un ensayo que lo corroboran**





Como complemento al desarrollo del dispositivo se adicionó un tercer vástago en el que se fija una cámara para el control del seguimiento de la degradación del material, correlacionando los datos obtenidos a través de las imágenes (área de fractura medida en  $\text{mm}^2$ ) con los de energía disipada en el interior del volumen representativo (Figura 6). De esta forma, se establece una evaluación cualitativa que permite completar el estudio de la respuesta mecánica del material analizando las principales características del proceso de fisuración (ancho, ramificación, etc.).

**Figura 6: Detalle del control de evolución de degradación del material mediante cámara**



## Definición de las Condiciones de Ensayo

El ensayo se lleva a cabo a temperatura controlada en el interior de una cámara climática, aplicando cargas cíclicas verticales en forma de seno-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. 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 obtenidas 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.

## **Fundamento Teórico para el Estudio del Comportamiento a Fisuración de Mezclas Bituminosas**

Como complemento al dispositivo presentado, desde esta investigación también se aportó un desarrollo teórico para el análisis del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas, de tal manera que pudiera cuantificarse el daño provocado sobre el material, así como la evolución de éste durante el transcurso del ensayo. Para ello se definieron 2 nuevos parámetros (“Parámetro de Daño Medio” y “Displacement ratio”), a partir de los cuales se determina una ley de daño a fisuración y unos umbrales de daño, que permiten evaluar la respuesta mecánica del material.

### *Cuantificación del nivel de daño a fisuración sufrido por el material (Parámetro de Daño medio)*

Para poder evaluar el comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas, 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. 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 e 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 e 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, puede emplearse el concepto de tasa de cambio de energía disipada “RDEC” (Shen e Carpenter, 2007) (1). 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 rozamiento, calor, etc.), proporcionando un buen indicador del daño por fisuración causado en la mezcla de un ciclo de carga a otro. Así, cuantificando la evolución del daño por fisuración sufrido por el material durante el ensayo mediante la representación del RDEC acumulado (Figura 7 izq.), desde esta investigación se definió un nuevo “Parámetro de Daño Medio” (2) 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, frecuencia de ensayo, temperatura, etc., se define la ley de daño a fisuración por fatiga (Figura 7, dcha.). Mediante esta ley puede determinarse qué materiales, y bajo qué condiciones,

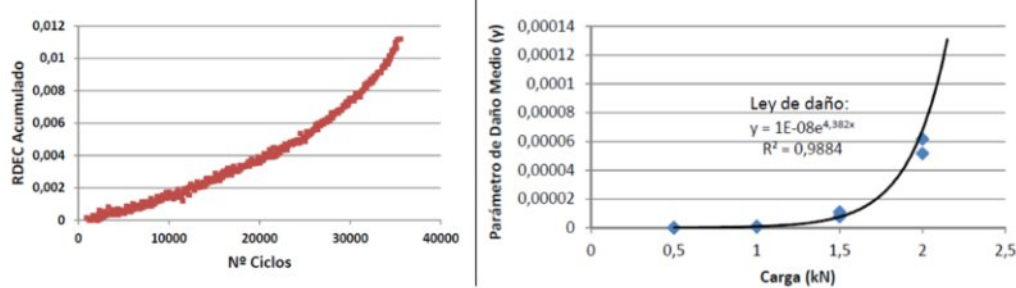


son más susceptibles de ser afectados por el fenómeno de fisuración por fatiga, de manera que puede ser utilizada como criterio en el diseño óptimo de la mezcla.

$$RDEC = \frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_n} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} RDEC_i}{N_f} \quad (2)$$

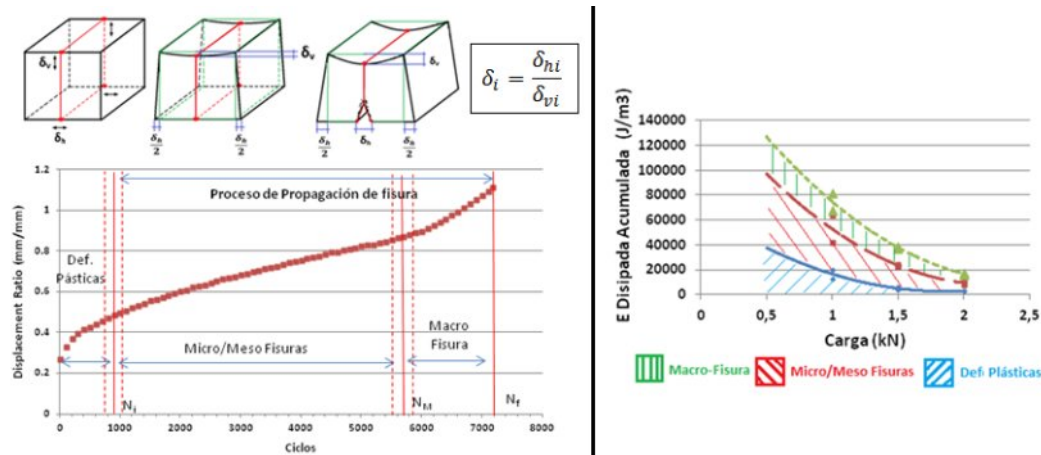
**Figura 7: Ejemplo de evolución de RDEC acumulado (izq.) y ley de daño a fisuración (dcha.).**



#### *Determinación de la evolución del daño a fisuración sufrido por el material (Umbrales de daño)*

Además, desde esta investigación también se definió el parámetro “Displacement Ratio” ( $\delta_i$ ) utilizado para definir la evolución de las diferentes etapas del proceso de fisuración. Este parámetro relaciona las deformaciones horizontales y verticales producidas en el interior del volumen donde tiene lugar el desarrollo de la fisura, de manera que permite estimar los ciclos de inicio del proceso de micro ( $N_i$ ) y macro fisuración ( $N_M$ ), mediante el análisis de la curva trazada debida a los cambios de deformaciones producidas (Figura 8 izq.). A partir de los ciclos  $N_i$  y  $N_M$  estimados, utilizando el cálculo de la energía disipada definido en el punto anterior, se pueden establecer los umbrales de daño del material (Figura 8 dcha.), que marcarán el estado de daño por fisuración y su evolución (definiendo la cantidad de energía necesaria para agotar la capacidad de deformar plásticamente e iniciar el proceso de fisuración, para que aparezca un daño estructural irrecuperable “macro-fisura”, o 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. De esta forma, los umbrales también permiten estudiar las características de ductilidad y tenacidad durante su propagación, de manera que pueden emplearse para optimizar el diseño de las mezclas actuando sobre las propiedades que se presenten más desfavorables.

**Figura 8: Ejemplo de curva de evolución de Displacement Ratio (izq.) y umbrales de daño (dcha.)**



## CONCLUSIONES

El presente artículo describe el método de ensayo UGR-FACT, desarrollado por la Universidad de Granada para evaluar el comportamiento mecánico de mezclas bituminosas ante fisuración por fatiga. Para ello, se han expuesto las principales características del dispositivo diseñado para su ejecución, así como las condiciones de ensayo y los fundamentos teóricos utilizados para la evaluación de los resultados. Las conclusiones extraídas de este artículo son:

- El método de ensayo UGR-FACT permite una evaluación fiable y funcional del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas, secciones de firmes y sistemas anti-remonte de fisuras.
- El dispositivo de ensayo diseñado es un equipo de dimensiones reducidas, adaptable a cualquier prensa dinámica, y con un coste económico bajo, lo que facilita la generalización de su uso para el estudio del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas.
- Las características del ensayo permiten una ejecución rápida, utilizando materiales de fácil fabricación y manejo, que garantizan la homogeneidad en su composición. Además, las condiciones de ensayo permiten reproducir de forma adecuada las solicitaciones mecánicas (velocidad de circulación, carga por eje, etc.) y ambientales (temperatura, humedad, etc.) sufridas por el firme.
- El fundamento teórico definido y los nuevos parámetros aportados por este método de ensayo (Displacement Ratio y Parámetro de daño medio), proporcionan una herramienta útil para el análisis del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas, permitiendo optimizar la evaluación y diseño de estos materiales, con el fin de construir carreteras más duraderas.

Durante el desarrollo del método de ensayo UGR-FACT, éste 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.

## REFERENCIAS

- 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 National des Ponts et Chaussées.
- García, 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.
- Shen, S., Airey, G., Carpenter, S., Huang, H. (2006). A dissipated energy approach to fatigue evaluation. Int. J. Road Mater. Pavement Des., 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. Thomas Telford Ltd., 470 pags.