

# EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FISURACIÓN DE LAS CAPAS DE RODADURA ULTRAFINAS UTILIZADAS EN LA CONSERVACIÓN DE PAVIMENTOS

### **RODRIGO MIRÓ**

Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech  
r.miro@upc.edu

### **AIDA GARCIA BORJA**

Sorigué  
a.garciaboira@sorigue.com

### **ALFREDO BOBIS ROJAS**

Sorigué  
a.bobis@sorigue.com

### **FÉLIX E. PÉREZ-JIMÉNEZ**

Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech  
edmund.perez@upc.edu

### **ADRIANA MARTÍNEZ**

Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech  
adriana.martinez@upc.edu

### **RAMÓN BOTELLA**

Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech  
Ramón.botella@upc.edu

---

# EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FISURACIÓN DE LAS CAPAS DE RODADURA ULTRAFINAS UTILIZADAS EN LA CONSERVACIÓN DE PAVIMENTOS

---

## RESUMEN

Las actuaciones de conservación de firmes que poseen una adecuada capacidad estructural se centran en el mantenimiento de las características superficiales de los pavimentos mediante el extendido de capas de mezcla asfáltica de relativamente poco espesor. Una solución cada vez más utilizada consiste en extender capas de rodadura ultrafinas, de aproximadamente 1 cm de espesor, con un alto contenido de betún y una estructura monogranular, que proporcionan texturas elevadas y pueden ponerse en obra con rendimientos muy altos, minimizando la afectación al tráfico.

Sin embargo, estos tratamientos generalmente se realizan sobre superficies envejecidas y fisuradas. Aunque la aplicación de este tratamiento suele hacerse conjuntamente con la de un riego de adherencia con una emulsión de betún altamente modificado y dotaciones elevadas, con objeto de sellar la capa soporte y asegurar la adherencia entre capas, resulta difícil poder evaluar su resistencia a la fisuración o a la reflexión de fisuras.

En este trabajo se realizaron una serie de pruebas que permiten poner de manifiesto las mejoras que se consiguen al utilizar este tipo de capas ultrafinas, basadas en la aplicación del ensayo Fénix. Para ello, se ha cambiado la forma y disposición de la probeta respecto a la del ensayo convencional, de forma que puedan ensayarse testigos formados por más de una capa. Se han utilizado dos configuraciones de ensayo, aplicando la tensión tanto en la cara inferior del testigo, como en la cara superior. Los resultados obtenidos han mos-

trado una respuesta claramente diferente cuando la tensión se aplica en la cara inferior formada por la capa soporte o en la cara superior formada por la capa ultrafina, retrasando en este último caso la apertura de la fisura, mostrando una rotura mucho más dúctil, y pudiendo observar además que se mantiene la adherencia de la capa al soporte.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las actuaciones de conservación sobre firmes que poseen una adecuada capacidad estructural se centran en el mantenimiento de sus características superficiales, que tienen por objeto garantizar la seguridad y comodidad en la conducción a los usuarios y están directamente relacionadas con las características de la capa de rodadura.

Existen diferentes actuaciones de mantenimiento que permiten restaurar las propiedades superficiales de los pavimentos que se van degradando con el tiempo debido al paso de vehículos y a las acciones climáticas. Entre éstas se destaca el extendido de mezclas bituminosas que pueden colocarse en capas finas y ultrafinas, tanto por las excelentes propiedades superficiales que proporcionan, como por la economía que suponen a las administraciones de carreteras cuando deben optimizar sus recursos destinados al mantenimiento de la red.

La primera generación de mezclas para capas de poco espesor la constituyen las mezclas de granulometría discontinua: mezclas SMA y microaglomerados.

Las mezclas tipo SMA (*Stone Mastic Asphalt*) se desarrollaron en Alemania a mediados de los años sesenta con objeto de resistir el desgaste y deterioro causado por la circulación de vehículos con neumáticos de clavos sobre pavimentos cubiertos de hielo y nieve. Posteriormente, debido a su excelente comportamiento, su uso se difundió por toda Europa y el resto del mundo.

Las mezclas tipo SMA se colocan en espesores que oscilan entre 2 y 5 cm. Su esqueleto mineral está formado por partículas de áridos relativamente gruesas (en un 70% en peso aproximadamente), relleno con un mástico de árido fino, filler y betún. El contenido de betún es relativamente elevado, por lo que es necesario evitar el escurrimiento utilizando una carga estabilizante, generalmente fibras de celulosa. La diferencia principal entre las SMA y las mezclas asfálticas convencionales es que la discontinuidad en la curva granulométrica es más alta y más ancha, lo que permite obtener un mayor porcentaje de huecos en áridos.

Desde el punto de vista volumétrico, las mezclas SMA son similares a las mezclas drenantes, también constituidas por un esqueleto mineral formado por árido grueso. Sin embargo, en las mezclas drenantes el mástico sólo rellena los huecos hasta obtener una mezcla con una proporción mínima de huecos de un 20%; en cambio, en el esqueleto mineral del SMA, los huecos se rellenan hasta alcanzar una proporción final en la mezcla del 3 al 6% aproximadamente.

Las SMA han demostrado ser mezclas altamente duraderas y resistentes debido a la capacidad impermeable del mástico, muy rico en ligante y con muy pocos huecos, lo que contribuye a que la velocidad de deterioro del ligante sea extremadamente lenta.

Las mezclas tipo SMA están definidas en la norma UNE-EN 13108-5 pero aún no están recogidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3. Para su diseño suelen emplearse criterios de huecos, escurrimiento de ligante, sensibilidad al agua, resistencia a las deformaciones permanentes y resistencia a la abrasión con neumáticos claveteados.

Los microaglomerados de granulometría discontinua son mezclas bituminosas con tamaño máximo de árido entre 8 y 11 mm, que se extienden en capas de entre 2 y 3 cm de espesor, derivados en parte de la utilización y tecnología de las mezclas porosas, pero no son tan porosas debido a que parte de los huecos se rellenan con un mástico en proporciones importantes, con lo que no quedan expuestas al riesgo de disgregación y colmatación que a veces sufren las mezclas porosas. Estas mezclas se conocen como BBTM (del francés *Béton Bitumineux Très Mince*) y están recogidas en el artículo 543 del PG-3 y en la UNE-EN 13108-2.

Estas mezclas también son capaces de restaurar las propiedades superficiales del firme, tienen una elevada macrotextura y proporcionan una buena resistencia al deslizamiento en condiciones de conducción a altas velocidades y sobre el pavimento mojado. Además, son resistentes a la fisuración, resistencia a la deformación plástica, durabilidad, sonoridad, comodidad y seguridad. En cuanto al ruido generado por la circulación, estos microaglomerados actúan amortiguando sustancialmente el nivel sonoro debido a la superficie de rodadura muy lisa y de macrotextura negativa, si bien no son capaces de igualar a las mezclas drenantes.

Para diseñar las mezclas BBTM se emplean tres criterios: contenido de huecos, resistencia a las deformaciones permanentes y a la acción del agua.

Una segunda generación de microaglomerados surge recientemente con el nombre de mezclas discontinuas en caliente ultrafinas (AUTL, del inglés *Asphalt for Ultra-Thin Layer*), recogidas en la norma UNE-EN 13108-9. Estas mezclas pueden tener espesores entre 1 y 2 cm, y se caracterizan porque también dotan al pavimento de muy buenas propiedades superficiales, minimizando el consumo de materias primas y de impacto ambiental, y ofreciendo a la vez una rápida apertura al tráfico. Para dosificarlas se emplean criterios basados en el contenido de huecos, la sensibilidad al agua, propiedades a bajas temperaturas, resistencia a la fricción.

Como estas mezclas se van a colocar sobre superficies que pueden estar cuarteadas, fisuradas y

deterioradas tras haber sido sometidas a esfuerzos importantes o a un proceso de envejecimiento extenso, se buscan materiales que eviten que estas degradaciones puedan aparecer rápidamente en superficie. Aunque la aplicación de este tratamiento suele hacerse conjuntamente con la de un riego de adherencia con una emulsión de betún altamente modificado y dotaciones elevadas, con objeto de sellar la capa soporte y asegurar la adherencia entre capas, resulta difícil poder evaluar su resistencia a la fisuración o a la reflexión de fisuras.

Los procedimientos de diseño habitualmente utilizados en España no tiene en cuenta propiedades de la mezcla tan importantes como la resistencia a la fisuración, la tenacidad o la ductilidad. Por ello, el Laboratorio de Caminos de la UPC, ha desarrollado un nuevo ensayo a tracción, realizado a velocidad de deformación constante (1 mm/min), sobre una probeta semi-cilíndrica (obtenida serrando diametralmente una probeta o testigo cilíndrico) con una fisura inducida mediante una ranura, que permite evaluar la resistencia a la fisuración de las mezclas a través del cálculo de la energía disipada en el proceso de rotura: el ensayo Fénix.

Este ensayo ya ha sido propuesto por los autores como ensayo complementario en el procedimiento de diseño de las mezclas densas y semidensas tipo AC (Asphalt Concrete), habiéndose establecido unos criterios de diseño, que fueron presentados en el marco de la IX Jornada Nacional AEFMA 2014.

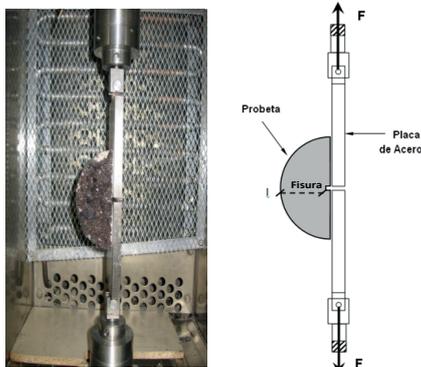


Figura 1. Esquema y geometría de la probeta en el ensayo Fénix

Sin embargo, esta disposición de ensayo no es adecuada para ensayar testigos formados por más de una capa, en los que la capa superior es una mezcla fina o ultrafina. Por ello, se ha adaptado el ensayo original de forma que puedan ensayarse probetas o testigos bicapa. En este trabajo se recogen una serie de pruebas que permiten poner de manifiesto las mejoras que se consiguen al utilizar este tipo de capas ultrafinas, basadas en la aplicación del ensayo Fénix.

## 2. METODOLOGÍA

Se han extraído testigos de un pavimento envejecido, antes y después de extender sobre él una capa ultradelgada, con el fin de evaluar el efecto de colocar o no esta capa. El pavimento viejo estaba formado por una capa de mezcla discontinua (microaglomerado) sobre una capa de mezcla semidensa, aunque no se ha podido garantizar que fuera homogéneo a lo largo del tramo sobre el que se ha actuado.

Adicionalmente se han sacado testigos de otro pavimento envejecido formado por una única capa de mezcla convencional, para evaluar el tipo de rotura que se produce evitando el efecto de diferentes capas.

Para caracterizar la resistencia a la fisuración de estas mezclas se ha pretendido utilizar el ensayo Fénix. Pero tal como se ha comentado anteriormente, la disposición de la probeta semicilíndrica durante la realización del ensayo Fénix no permite ensayar probetas o testigos formados por más de una capa. Por otra parte, resulta difícil ensayar una probeta de 1 ó 2 cm, correspondientes al espesor de la capa ultradelgada, ya que los resultados podrían no ser representativos. Por ello, se ha cambiado la forma y disposición de la probeta respecto a la del ensayo convencional, de forma que se puedan ensayar probetas/testigos formados por más de una capa.

Así, en lugar de cortar la probeta cilíndrica por un plano diametral (para generar la probeta semicilíndrica), se han realizado dos cortes laterales

para aproximarla a un paralelepípedo, Figura 2, de forma que las dos capas queden paralelas al plano de sujeción con las placas metálicas, sobre las que se aplica la tensión.

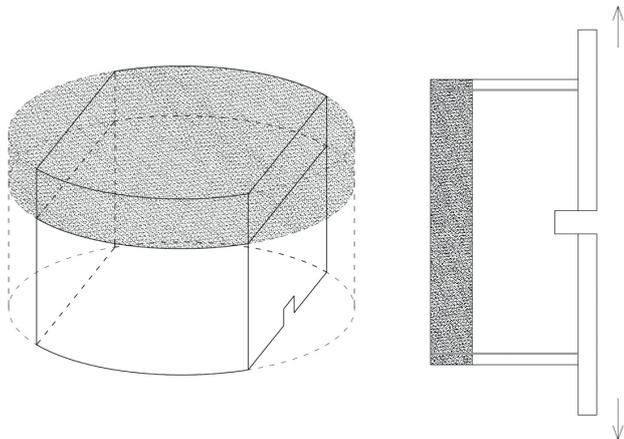


Figura 2. Geometría y disposición de la probeta en el ensayo Fénix adaptado a testigos bicapa (con ranura)

Tal como se observa en la Figura 2, y al igual que en el caso del ensayo Fénix original, se ha realizado una pequeña ranura en los testigos, que se ubica entre las dos placas para inducir el inicio de la fisuración durante el ensayo. De esta forma, la fisuración se inicia en la capa inferior del testigo, y progresa a medida que aumenta el desplazamiento de los pistones de la prensa, hasta alcanzar, en caso de que exista, la capa superior ultradelgada, momento a partir del cual ésta empezaría a resistir.

No obstante, después de unas pruebas iniciales, se comprobó que esta configuración puede hacer que los resultados del ensayo se vean muy condicionados por la resistencia de la capa inferior, que es la que empieza a trabajar primero. Por ello, se decidió utilizar otra disposición del testigo, en la que éstos se pegan a las placas metálicas por su cara superior, sin realizar ninguna ranura, Figura 3. En este caso, cuando existe la capa ultradelgada, es esta mezcla la que empieza a trabajar primero y, probablemente se podrán poner más de manifiesto las diferencias respecto cuando no exista esta capa.

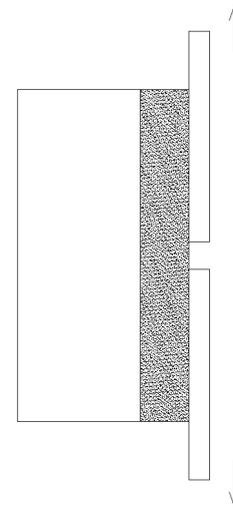


Figura 3. Disposición de la probeta en la segunda configuración del ensayo Fénix adaptado a testigos bicapa (sin ranura)

Durante el ensayo se registra la carga aplicada durante el proceso de rotura en función del desplazamiento aplicado, Figura 4. A partir de la curva carga-desplazamiento es posible obtener una serie de parámetros que permiten caracterizar la resistencia a la fisuración de la mezcla.

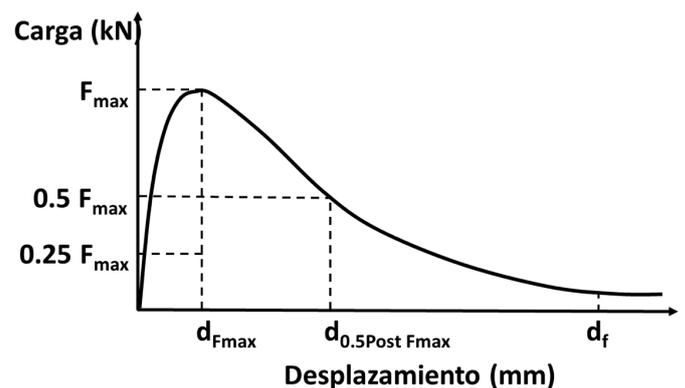


Figura 4. Curva carga-desplazamiento obtenida a partir del ensayo Fénix

Entre estos parámetros se destacan el índice de rigidez a tracción (IRT), que relaciona el incremento de tensión con el incremento de desplazamiento en la zona inicial de carga y que, por tanto, es un módulo secante relacionado con

la rigidez de la mezcla ensayada, y la energía disipada en el proceso de rotura (GF), obtenida a partir del área bajo la curva carga-desplazamiento; a mayor energía, se tendrá que realizar mayor trabajo para romper la mezcla, por lo que ésta será más resistente. Además, para cuantificar si el tipo de rotura que se produce durante el ensayo en más o menos dúctil, se ha definido un índice de tenacidad (IT) que pondera la energía disipada una vez que se ha alcanzado la carga máxima de rotura por el desplazamiento registrado tras la rotura, a medida que la carga máxima va disminuyendo; así, si la rotura es frágil, la carga tras la rotura disminuye bruscamente y el índice de tenacidad será relativamente pequeño, mientras que si la rotura es dúctil, la carga post-pico se mantendrá durante el proceso de rotura, registrándose unos mayores desplazamientos, por lo que el índice de tenacidad será más elevado. Este parámetro resulta muy interesante en el caso que nos ocupa, pues la finalidad de la capa ultradelgada es sellar el pavimento antiguo, retrasando o evitando que las grietas y fallos aparezcan en superficie.

Los ensayos se han realizado a una temperatura de 10 °C, ya que en estas condiciones la respuesta de la mezcla es más frágil. Para cada configuración se han ensayado dos testigos.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos sobre tres tipos de testigos diferentes:

- Testigos formados por una sola capa de mezcla convencional, extraídos de un pavimento envejecido.
- Testigos formados por dos capas: una capa intermedia de mezcla convencional y un microaglomerado como capa de rodadura, que constituían el pavimento envejecido antes de colocar la capa ultradelgada.
- Testigos formados por el microaglomerado del pavimento envejecido anterior, sobre el que se ha colocado la capa ultradelgada.

### 3.1 Testigos de mezcla convencional envejecida

En la Figura 5 se han representado las curvas tensión-desplazamiento obtenidas a partir del ensayo Fénix, a 10 °C, para los testigos formados por una sola capa de mezcla convencional envejecida. En este caso la tensión sólo se ha aplicado en la cara superior, que es la cara más envejecida; se observa que la tensión pico es bastante elevada y cómo tras la rotura disminuye rápidamente, evidenciando una rotura muy frágil.

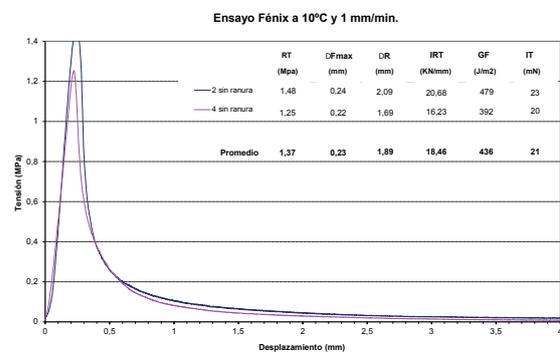


Figura 5. Ensayo Fénix a 10 °C y 1 mm/min. Testigos de una sola capa de mezcla convencional envejecida

### 3.2 Testigos bicapa, sin capa ultradelgada

En la Figura 6 se han representado las curvas tensión-desplazamiento obtenidas a partir del ensayo Fénix, a 10 °C, para los testigos bicapa (microaglomerado sobre mezcla convencional), sin la capa ultradelgada; en los testigos 1 y 3, la tensión se ha aplicado en la cara inferior del testigo, mientras que en los testigos 4.1C y 4.2C, la tensión se ha aplicado en la cara superior.

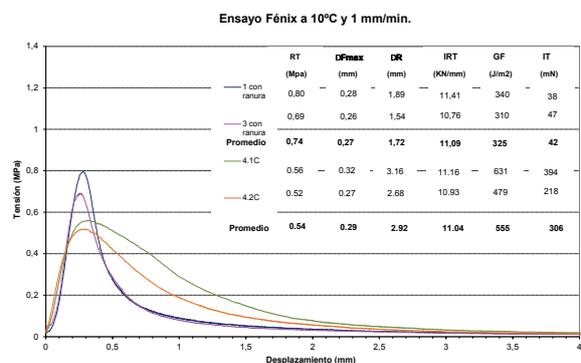


Figura 6. Ensayo Fénix a 10 °C y 1 mm/min. Testigos bicapa, sin capa ultradelgada

En este caso pueden apreciarse algunas diferencias cuando se ensayan por una u otra cara, ya que las capas superior e inferior de los testigos extraídos están formadas por mezclas de diferentes características. Así, cuando la tensión se aplica por la cara inferior (testigos 1 y 3), la mezcla semidensa que constituye la capa inferior, sobre la que se aplica la carga, presenta una rotura frágil, mientras que cuando la tensión se aplica por la cara superior (testigos 4.1C y 4.2C), es el microaglomerado el que primero trabaja y, a pesar de estar envejecido, presenta una rotura más dúctil que la mezcla que constituye la capa inferior.

### 3.2 Testigos bicapa, microaglomerado y mezcla ultradelgada

En la Figura 7 se han representado las curvas tensión-desplazamiento obtenidas a partir del ensayo Fénix, a 10 °C, para los testigos con la capa ultradelgada; en los testigos 1.3R y 1.5R, la tensión se ha aplicado en la cara inferior del testigo, mientras que en los testigos 2.1R y 2.3R, la tensión se ha aplicado en la cara superior.

rótula, Figura 8; la carga necesaria para abrir la probeta es relativamente baja.

Pero cuando el ensayo se realiza pegando las placas a la capa ultradelgada (cara superior), esta capa retrasa la apertura de la fisura y mantiene la carga por más tiempo, dando lugar a una rotura mucho más dúctil. El valor del índice de tenacidad cuando la tensión se aplica en la capa ultradelgada es del orden de 3 veces superior al obtenido en el caso anterior (sin capa ultradelgada).

En la Figura 9 se aprecia la propagación de la fisura en testigos con y sin la capa ultradelgada respectivamente, para un desplazamiento de 3.5 mm, con tensión aplicada en la cara superior; puede observarse como la profundidad que alcanza la fisura es mayor en el caso en que no hay la capa ultradelgada. También se observa como la capa ultradelgada queda perfectamente unida y anclada a la capa inferior, soportando los esfuerzos cortantes. Estos esfuerzos serían mayores que en el caso del microaglomerado por ser de menor espesor. Pero pese a este menor espesor, se observa una total adherencia y que la capa ultradelgada no se despega del soporte.

Este ensayo muestra la capacidad de la capa ultradelgada para mantener la resistencia y su integridad en unos niveles mayores de deformación, reforzando y aumentando la resistencia a la fisuración de las capas inferiores.

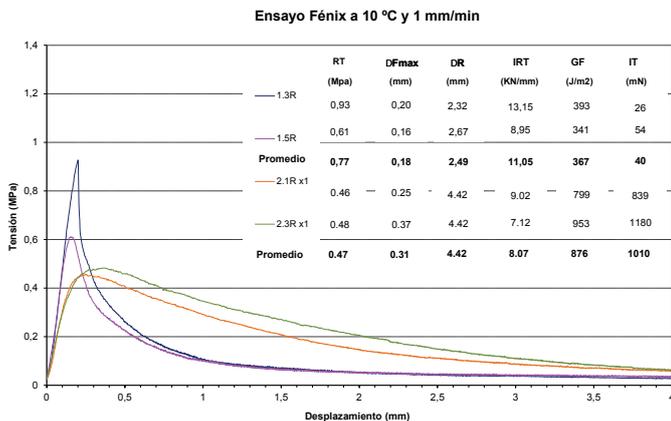
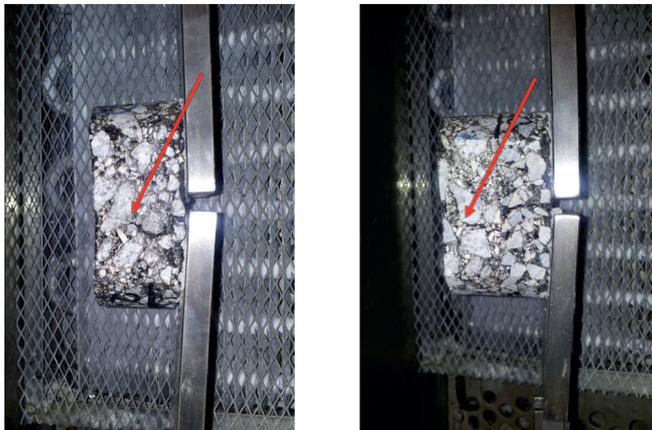


Figura 7. Ensayo Fénix a 10 °C y 1 mm/min. Testigos con capa ultradelgada

En el caso de los testigos con la capa ultradelgada (sobre el microaglomerado), la rotura observada cuando la tensión se aplica en la cara inferior es relativamente frágil. En este caso, la fisura se propaga rápidamente a través de la mezcla que está en contacto con las placas hasta la capa ultradelgada, pero ésta no se fisura y actúa como una



Figura 8. Detalle de la rotura de un testigo con entalla en la cara inferior, con capa ultradelgada. Tensión aplicada en la cara inferior del testigo



(a)

(b)

Figura 9. Ensayo Fénix aplicando la tensión en la cara superior del testigo: (a) con capa ultradelgada, (b) sin capa ultradelgada

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha caracterizado en laboratorio la resistencia a la fisuración de testigos extraídos de un pavimento envejecido antes y después de extender sobre él una capa de ultradelgada.

Para ello, se ha adaptado el ensayo Fénix, cambiando la forma y disposición de la probeta respecto a la del ensayo convencional, de forma que puedan ensayarse testigos formados por más de una capa. Se han utilizado dos configuraciones de ensayo, aplicando la tensión tanto en la cara inferior del testigo (habiendo generado una pequeña ranura para inducir la fisura), como en la cara superior (sin ranura).

Los resultados obtenidos han puesto de manifiesto que cuando no existe la capa ultradelgada, la respuesta de una mezcla envejecida es muy similar, para cualquiera de las configuraciones de ensayo utilizadas (tensión aplicada en la cara superior o inferior), mostrando una rotura más o menos frágil, dependiendo del tipo de mezcla que constituye el pavimento y de su grado de envejecimiento.

En cambio, cuando existe la capa ultradelgada se observa una respuesta claramente diferente cuando la tensión se aplica en la cara inferior (mezcla envejecida) o en la cara superior ultradelgada,

retrasando en este último caso la apertura de la fisura y mostrando una rotura mucho más dúctil. Además, en todos los ensayos realizados, se ha mantenido la adherencia de la capa de ultradelgada al soporte.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- **F. Pérez-Jiménez, G. Valdés, R. Miró, A. Martínez y R. Botella.** "Fénix. Test Development of a new test procedure for evaluating cracking resistance in bituminous mixtures", *Transportation Research Record, Journal of Transportation Research Board*, nº 2181, pp. 36-43, 2010.
- **Pérez-Jiménez, F.; Botella, R.; Martínez, A. y Miró, R.** "Analysis of the mechanical behaviour of bituminous mixtures at low temperatures". *Construction and building materials*, Vol. 46, pp. 193-202, 2013.
- **Miró, R.; Martínez, A.; Pérez-Jiménez, F. y Botella, R.** "Analysis of cracking resistance of bituminous mixtures using Fenix test". *Construction and building materials*, Vol 59, pp. 32-38, 2014.
- **Pérez-Jiménez, F.; Valdés, G.; Muñoz, M.; Miró, R.; Martínez, A.; Botella, R. y Amorós, J.** "Criterios y especificaciones para el uso del ensayo Fénix en el diseño de mezclas bituminosas tipo AC". IX Jornada Nacional ASEFMA 2014. Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA), Madrid, 2014.
- **ORDEN FOM/2523/2014.** Artículo 543: Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas. Orden FOM/2523/2014.
- **UNE-EN 13108-5 Mezclas bituminosas.** Especificaciones de materiales. Parte 5: Mezclas bituminosas tipo SMA.
- **UNE-EN 13108-2 Mezclas bituminosas.** Especificaciones de materiales: Par-

te 2: Mezclas bituminosas para capas delgadas.

- **UNE-EN 13108-9 Bituminous mixtures.** Material specifications. Asphalt for ultra-thin layer (AUTL)