

# Mezclas de alto módulo con fibras acrílicas para su empleo en zonas climáticas severas

Fernando Moreno-Navarro, fmoreno@ugr.es  
M<sup>a</sup> Carmen Rubio-Gámez, mcrubio@ugr.es  
Miguel del Sol-Sánchez, msol@ugr.es  
Gema García-Travé, labic@ugr.es

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

Esther Tomás-Fortún, esther.tomas@ciesm-intevia.com

CIESM-INTEVIA

Miguel Segarra-Martínez, msegarra@dragados.com

Dragados

Las condiciones climáticas a las que se ven expuestos los pavimentos asfálticos son un factor determinante en su comportamiento mecánico, siendo más acusado en regiones con climas extremos, donde es necesario desarrollar materiales que permitan alargar su vida de servicio sin que esto suponga un incremento de costes. Así, surge el proyecto FATE (Firmes Asfálticos para Temperaturas Extremas), cuyo objetivo es el desarrollo de una mezcla bituminosa de alto módulo de altas prestaciones mecánicas, modificada con fibras acrílicas. En esta publicación se exponen los resultados de los ensayos de laboratorio seleccionados con el objetivo de evaluar su comportamiento ante condiciones extremas (retracciones térmicas por bajas temperaturas, fisuración por fatiga, resistencia a roderas en presencia de agua, y resistencia a ciclos de hielo/deshielo.). Los resultados ponen de manifiesto que la mezcla de alto módulo con fibras se postula como un material alternativo a utilizar en pavimentos asfálticos sometidos a temperaturas extremas.

**Palabras clave:** Mezclas asfálticas, alto módulo, fibras acrílicas, climas severos

Climatic conditions are regarded as essential to the mechanical behaviour of asphalt pavements for roads, particularly in regions with an extreme climate. Thus there is the need to develop materials that can provide a longer service life under these conditions without incurring additional manufacturing costs. Therefore, the research project entitled FATE (Firmes Asfálticos para Temperaturas Extremas) aims to develop High Modulus Asphalt with the incorporation of acrylic fibres to improve its mechanical performance. This article presents the results obtained in laboratory tests carried out to evaluate the behaviour of the material under extreme climate conditions (low temperature cracking, rutting resistance, fatigue cracking, and water and freeze/thaw resistance). The results indicate that High Modulus Asphalt with acrylic fibres can be used as an alternative material in asphalt pavements for roads under extreme climate conditions.

**Keywords:** Asphalt mixture, high modulus, acrylic fibers, extreme climates

# Mezclas de alto módulo con fibras acrílicas para su empleo en zonas climáticas severas

## 1. Introducción

En las últimas décadas, las mezclas de alto módulo (MAM) han sido utilizadas en firmes de carreteras y aeropuertos, presentando un buen comportamiento mecánico y una adecuada durabilidad [1-3], debido a la combinación de un esqueleto mineral continuo con un ligante de baja penetración, lo que las dota de una elevada rigidez y capacidad para absorber y disipar tensiones [4]. Este hecho permite reducir la aparición de patologías estructurales dado que se disminuyen los esfuerzos de tracción en la parte inferior de la capa bituminosa, y los esfuerzos de compresión en la zona superficial de la subbase [5]. Como resultado, se ha comprobado que es posible reducir el espesor del firme en torno a 20-23% [6, 7], lo que lleva a un importante ahorro de material. Además, este incremento de permite aumentar la resistencia a roderas, proporcionando mayor vida de servicio de la infraestructura.

Sin embargo, su elevada rigidez puede suponer el descenso de su resistencia a fatiga y fisuración térmica, sobre todo en regiones frías. Así, como principal medida para paliar estos tipos de fallo, las dotaciones de ligante empleadas en la fabricación de las MAM son relativamente altas (en el entorno del 5,5% sobre mezcla) [7]. Sin embargo, cuando las MAM se encuentran expuestas a temperaturas de servicio extremas que combinan épocas de muy baja y alta temperatura, es necesario realizar un diseño específico que garantice una solución de compromiso entre deformabilidad (para resistir los esfuerzos de fatiga y retracciones por baja temperatura) y rigidez (una adecuada capacidad portante a altas temperaturas para evitar la aparición de roderas).

En este contexto, una de las medidas adoptadas para evitar el fallo prematuro de las MAM consiste en disponer una capa de rodadura (adaptada al tráfico y al clima) para su uso como protección superficial del resto del firme. Otra solución está relacionada con la utilización de betunes de baja penetración modificados con polímeros, lo que mejora considerablemente la resistencia a fatiga y a deformaciones plásticas [7, 8]. No obstante, ambas medidas suponen un importante incremento de costes, ya que, por un lado, el empleo de una capa de rodadura protectora supone incrementar el espesor de la sección del firme (perdiendo así el valor añadido de reducción del espesor del paquete de firme al utilizar las MAM), mientras que la utilización de un betún modificado en la capa de base (la más gruesa de la sección del pavimento), hace

que el coste económico de la sección se incremente considerablemente, provocando la pérdida de rentabilidad en el uso de estas mezclas. Todo ello hace que habitualmente el empleo de MAM en firmes de carreteras en climas extremos no sea una solución económicamente competitiva, siendo por ello de interés el desarrollo de nuevas soluciones que permitan extender el uso de estas mezclas, y por tanto, sus beneficios asociados.

En base a estas consideraciones, uno de los objetivos establecidos por el proyecto de investigación FATE (Firmes Asfálticos para Temperaturas Extremas), llevado a cabo por Dragados, Ciesm-Intevia y el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (LabIC.UGR), es desarrollar mezclas de alto módulo de mayores prestaciones mecánicas y económicamente competitivas, que puedan ser empleadas en regiones con climas extremos. Con este propósito, este artículo se centra en el estudio de una MAM que incorpora fibras acrílicas (como aditivo innovador incorporado directamente durante el proceso de mezclado) [9] con el fin de mejorar su comportamiento mecánico y reducir su susceptibilidad térmica.

## 2. Metodología

### 2.1 Materiales

Durante el desarrollo de este estudio se analizó el comportamiento mecánico de 2 mezclas de alto módulo: una mezcla de referencia (MAM 1) fabricada con un betún convencional B 20/25 (penetración EN 1426: 20-25 0,1 mm; punto de reblandecimiento EN 1427: 61-71°C) y una mezcla con la misma formulación pero incorporando fibras acrílicas como elemento modificador (MAM 2). Los áridos empleados en la fabricación de las mezclas estudiadas fueron de origen calizo en sus diferentes fracciones 12/18 mm, 6/12 mm y 0/6 mm, presentando las características apropiadas para la construcción de firmes de carreteras (PG-3). El polvo mineral empleado como filler de aportación fue carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ).

Las fibras, Figura 1, utilizadas para la modificación de la mezcla MAM 2 son de naturaleza acrílica (con 1,17 g/cm<sup>3</sup> de densidad, y entre 6 y 12 mm de longitud), las cuales son incorporadas a la mezcla para incrementar su cohesión tridimensional, y por tanto sus prestaciones mecánicas (objetivo



Figura 1. Aspecto visual de las fibras acrílicas utilizadas.

perseguido en el estudio). La dosificación utilizada fue de 0,3 % sobre el peso total de la mezcla, incorporada a la vez que los áridos para garantizar una dispersión uniforme de las mismas.

El encaje granulométrico de ambas mezclas fue el mismo, el cual corresponde a un esqueleto mineral continuo. De igual modo, ambas mezclas fueron fabricadas con el mismo contenido de betún (5,1 % sobre el peso total de la mezcla) para poder realizar un análisis comparativo fiable, siendo este porcentaje determinado a través del ensayo Marshall (NLT-159) y teniendo como principales criterios de diseño: la obtención de una mezcla ligeramente cerrada (para disminuir su susceptibilidad al agua y a los ciclos de hielo-deshielo); y el uso de un contenido de ligante no demasiado elevado para no encarecer el coste de las mezclas. La Tabla 1 recoge las principales características de las dos mezclas estudiadas. En este punto, es interesante destacar que al tratarse de fibras acrílicas (las cuales no absorben ligante), durante la fabricación de las mez-

Tabla 1. Principales propiedades de las mezclas estudiadas.

Características	MAM 1	MAM 2
Tipo de betún	20/25	20/25
Contenido de fibras (% s/m)	0	0,3
Contenido óptimo de betún (%)	5,1	5,1
Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2,625	2,652
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,534	2,515
Contenido de huecos (%)	3,3	3,5
Estabilidad (kN)	15,571	15,146
Deformación (mm)	3,5	4,0

clas de tipo MAM 2 no se observó ninguna anomalía en relación a carencia de betún o falta de envuelta del árido.

## 2.2 Plan de trabajo

Para analizar la influencia de las fibras acrílicas en el comportamiento mecánico de la mezcla de alto módulo, se llevaron a cabo diferentes ensayos de laboratorio reproduciendo distintas condiciones de servicio a las que estará sometido este material en firmes de carreteras en climas extremos, analizando así distintos aspectos que pueden afectar el comportamiento a largo plazo de las MAM (resistencia al agua y ciclos de hielo/deshielo, retracciones térmicas por bajas temperaturas, fisuración por fatiga, capacidad portante a diferentes temperaturas, y deformaciones plásticas en presencia de agua), de acuerdo con la Tabla 2.

### (i) Análisis de la susceptibilidad al agua y al hielo/deshielo

Para el estudio del efecto de la lluvia y la humedad en los pavimentos de carreteras, se realizó un ensayo de sensibilidad al agua de acuerdo a la norma EN 12697-12 [10], pero incluyendo condiciones extremas como baja energía de compactación (simulando así la situación más desfavorable que puede tener lugar durante la construcción del firme a bajas temperaturas) y ciclos de hielo/deshielo (para analizar el efecto del agua en climas fríos). Este ensayo implicó la fabricación de 6 probetas, compactadas con 35 golpes aplicados con el martillo Marshall, que fueron divididas en dos grupos: seco y húmedo. Las probetas en condiciones secas fueron almacenadas a temperatura ambiente ( $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ), mientras que las húmedas fueron sometidas a un proceso de saturación de  $30 \pm 5$  minutos bajo una presión de  $6,7 \pm 0,3$  kPa, para posteriormente ser sumergidas en agua a  $40^\circ\text{C}$  durante 72 horas. Pasado ese tiempo, esas mismas probetas se almacenaron a  $-18^\circ\text{C}$  durante 16 horas, para finalmente ser sumergidas en agua a  $60^\circ\text{C}$  hasta la descongelación del agua contenida. Una vez realizados los procesos de acondicionamiento de las probetas, éstas fueron sometidas a rotura para determinar su resistencia a la tracción indirecta (EN 12697-23) [11] a una temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . Los resultados obtenidos fueron el valor de resistencia a la tracción indirecta para cada grupo y el índice de resistencia a la tracción, obtenido como el porcentaje de resistencia conservada tras el acondicionamiento en agua y los ciclos de hielo/deshielo.

## Mezclas de alto módulo con fibras acrílicas para su empleo en zonas climáticas severas

Tabla 2. Resumen del plan de trabajo.

Tipo de ensayo	Normativa	Temperatura (°C)	Número de probetas	Observaciones
Sensibilidad al agua	EN 12697-12	25	6	Inclusión de ciclos hielo-deshielo
Rodadura	EN 12697-22	60	2	-
Triaxial confinado	EN 12697-25 Método B	40	3	Carga confinamiento: 120 kPa Carga axial: 300 kPa Frecuencia: 3 Hz Número de ciclos: 10.000
		50	3	
		60	3	
		70	3	
Módulo de rigidez	EN 12697-26, Anexo C	0	2	-
		10	2	
		20	2	
		30	2	
		40	2	
Fatiga a 4 puntos	EN 12697-24, Anexo D	10	12	Ensayo a deformación controlada: 250, 200, 150, 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ . Frecuencia 10 Hz
Resistencia a la fisuración a bajas temperaturas	EN 12697-46	Desde 10 a -30	3	-
UGR-FACT	-	20	3	-

### (ii) Estudio de la resistencia a las deformaciones plásticas

Por otra parte, para evaluar la resistencia a deformaciones plásticas de las mezclas, además del tradicional ensayo de rodadura (EN 12697-22) [12], se utilizaron el ensayo triaxial cíclico confinado (EN 12697-25) a diferentes temperaturas, y el ensayo de Hamburgo bajo agua. El ensayo de rodadura (EN 12697-22) consiste en la aplicación de una carga (700 N) sobre dos probetas prismáticas (408 mm x 256 mm x 60 mm) a través de repetidas pasadas (10.000 ciclos) de una rueda, estando el equipo dentro de una cámara a 60°C. En cada ciclo de carga se registró la medida de la deformación de la mezcla, obteniendo así la pendiente de deformación en los últimos 5.000 ciclos (parámetro conocido como WTS, mm/10<sup>3</sup> ciclos de carga). Este mismo procedimiento fue aplicado para el ensayo de Hamburgo, salvo que en este último caso las probetas son sumergidas en agua a 60°C durante la ejecución del ensayo. Este procedimiento se utiliza para la determinación de la resistencia a deformaciones plásticas de la mezcla a altas temperaturas y en presencia de agua, de forma que el estudio del comportamiento ante este ensayo puede resultar clave para garantizar su buena respuesta.

Por su parte, el ensayo triaxial (EN 12697-25, método B) [13] se utiliza para la determinación de la resistencia a deformaciones plásticas bajo cargas de confinamiento a altas temperaturas, evaluando el comportamiento mecánico de la mezcla bajo condiciones más realistas, combinando los esfuerzos cíclicos de compresión por la acción del tráfico con los esfuerzos de cortantes aparecidos durante la vida de servicio. Así, dicho ensayo consiste en la aplicación combinada a temperatura constante (durante el estudio se evaluaron diferentes temperaturas 40, 50, 60 y 70°C), de una carga de confinamiento (en torno a los 120 kPa) y otra axial cíclica sinusoidal desfasada en el origen de valor (en torno a los 300 kPa), bajo una frecuencia de 3 Hz durante 10.000 ciclos de carga. Para este ensayo se utilizaron dos probetas de 101,6 mm de diámetro y altura aserrada de 50 mm, para cada temperatura de ensayo. Como resultados, los parámetros de fluencia y deformación permanente de cada mezcla vienen determinados como la media de los valores obtenidos para cada par de probetas ensayadas.

### (iii) Capacidad portante

La capacidad portante de las mezclas fue evaluada mediante el ensayo de rigidez (UNE-EN 12697-26, anexo C)

[14] a diferentes temperaturas (0, 10, 20, 30 y 40°C), de manera que se pudo analizar su evolución en orden a garantizar que la capacidad portante de las mezclas no va a verse afectada en función de la época del año. Este ensayo se llevó a cabo sobre probetas cilíndricas (altura entre 50-75 mm, y diámetro próximo a 101,6 mm) aplicando 10 pulsos de carga para ajustar la amplitud y duración de la carga, y posteriormente otros 5 pulsos para determinar la rigidez del material. Este mismo procedimiento fue repetido sobre otro diámetro de la probeta situado a  $90\pm 10^\circ$  en relación al caso anterior, pudiendo así obtener un valor medio del módulo de rigidez a partir de las medidas en ambos diámetros.

#### **(iv) Resistencia a la fatiga**

Por otra parte, para poder garantizar el buen comportamiento de las mezclas a largo plazo, éstas fueron sometidas al ensayo de fatiga a 4 puntos (UNE-EN 12697-24, anexo D) [15]. No obstante, a pesar de que para las mezclas de alto módulo el PG-3 exige la realización de este ensayo a 20 °C, en este proyecto se llevó a cabo a una temperatura más severa de 10 °C (aunque la mezcla MAM 1 de referencia fue también evaluada a 20 °C para tener un valor comparativo). Las amplitudes de deformación estudiadas fueron 250  $\mu\text{m}/\text{m}$ ; 200  $\mu\text{m}/\text{m}$ ; 150  $\mu\text{m}/\text{m}$  and 100  $\mu\text{m}/\text{m}$ , utilizando 3 probetas para cada nivel de deformación.

#### **(v) Fisuración por retracciones térmicas**

Para evaluar la resistencia de las mezclas a la fisuración por retracciones térmicas a bajas temperaturas, se utilizó el ensayo conocido internacionalmente como TSRST (EN 12697-46) [16]. Durante este ensayo, las probetas (160 mm x 50 mm x 50 mm) son fijadas a una determinada longitud mientras que la temperatura es reducida a un ritmo de -10 K/h desde 10°C hasta -30°C. Este proceso de descenso de temperatura provoca la retracción del material que está sujeto a una determinada longitud, y por tanto, éste se ve sometido a tensiones y causa su fallo.

#### **(vi) Fisuración por fatiga**

Finalmente, se utilizó el ensayo UGR-FACT para estudiar la combinación de las acciones del tráfico y los gradientes térmicos [17]. Este ensayo fue desarrollado en el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (LabIC.UGR). El dispositivo utilizado se compone de una base, Figura 2a, dos apoyos en los que se fijan las probetas, Figura 2b, y un actuador de aplicación de carga, Figura 2c. La base está provista de una plataforma sobre la que se disponen dos carriles para el deslizamiento de los apoyos, así como de dos vástagos verticales en los que se colocan los dispositivos para medir las deformaciones verticales producidas en el material, Figura 2d. Los dos apoyos están compuestos por un carro

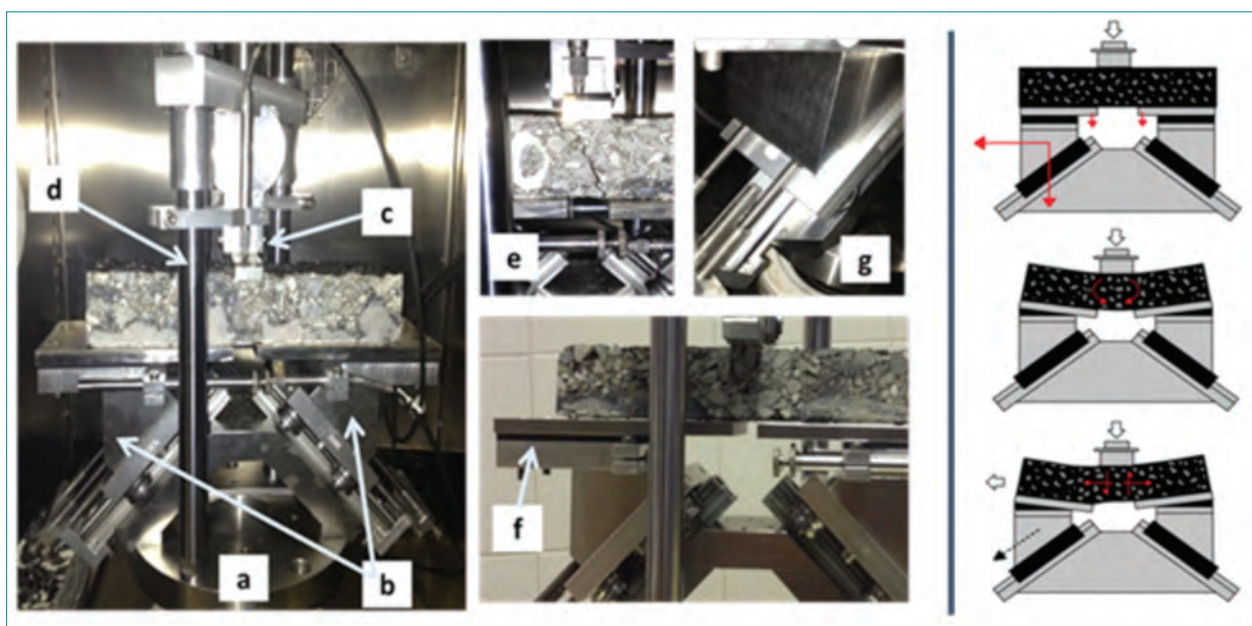


Figura 2. Esquema de la configuración del dispositivo de ensayo UGR-FACT.

## Mezclas de alto módulo con fibras acrílicas para su empleo en zonas climáticas severas

(adaptado a la forma del carril, para permitir su deslizamiento sin cabeceos ni movimientos diferenciales), así como por una placa metálica (sobre la que se pega la probeta mediante resina epoxy) en la que se ubican los LVDT's para medir las deformaciones horizontales en la parte inferior de la probeta, Figura 2e. Además, bajo estas placas de apoyo existen dos elementos elásticos, Figura 2f, de caucho que permiten la flexión del material. La distancia entre las placas puede variar con el fin de reproducir distintas condiciones de servicio y fallo de las capas inferiores (fisuración, pre-fisuración, juntas de dilatación, etc.). Por otro lado, en la parte inferior de los carros se disponen dos muelles elásticos recuperadores, que simulan el efecto de las capas subyacentes del firme, Figura 2g.

Esta configuración del dispositivo de ensayo permite reproducir las tensiones horizontales y verticales a las que estará sometida la mezcla bituminosa durante su vida de servicio en el firme, simulando así los esfuerzos de flexión, cortante y tracción debidos a las cargas del tráfico y los gradientes térmicos. Este método de ensayo es por tanto capaz de generar y propagar un proceso controlado de fisuración por fatiga en la probeta estudiada, el cual puede ser examinado a través del estudio de la energía disipada por el volumen de material en el que tiene lugar (evitando así la aleatoriedad y dispersión tridimensional de este fenómeno). De esta forma, el daño aparecido en el material puede ser cuantificado de acuerdo con el hecho de que solo la diferencia de energía disipada de un ciclo a otro provoca degradación en el material [18, 19]. Así, el valor de RDEC (tasa de variación de energía disipada, Ratio of Dissipated Energy Change) acumulado (1), puede ser utilizado para calcular el parámetro de daño me-

dio del material ( $\gamma$ ), el cual es un valor empleado para establecer una referencia de la resistencia a la fisuración por fatiga de las mezclas estudiadas [18] (2).

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

Donde  $\omega_n$  es el valor de densidad de energía disipada en el ciclo  $n$  (en  $J/m^3$ ); y  $\omega_{n+1}$  es el valor en el ciclo  $n+1$ .

$$\gamma = i = 1/N_f RDEC_i N_f \quad (2)$$

Donde  $N_f$  es el ciclo de fallo del material para el cual se produce su fisuración completa.

### 3. Análisis y discusión de resultados

#### 3.1 Sensibilidad al agua

La Figura 3a muestra el resumen de resultados obtenidos para ambas mezclas en el ensayo de sensibilidad al agua con ciclos de congelación-descongelación. Como se puede observar, a pesar de que la incorporación de fibras no supone una mejora en las propiedades de la mezcla ante esta patología, en ambos casos la resistencia conservada tras el acondicionamiento en agua y los ciclos de hielo/deshielo es satisfactoria. Por otra parte, destaca el hecho de que la resistencia a tracción indirecta aumente tras el acondicionamiento en la mezcla patrón. No obstante, este aspecto coincide con los resultados obtenidos en un proyecto llevado a cabo en Polonia (SPENS) en el que tras ensayar diversas mezclas de alto módulo utilizando este sistema de ensayo

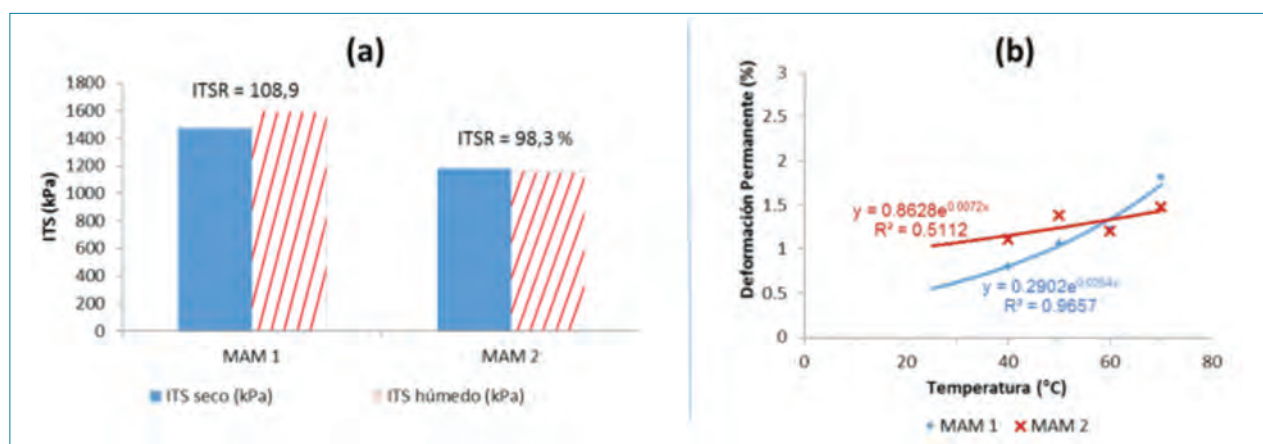


Figura 3. Resultados del ensayo sensibilidad al agua (a) y del ensayo triaxial cíclico (b).

Tabla 3. Resultados de los ensayos de rodadura y Hamburgo.

Propiedades	Resultados para ambos tipos de mezcla				
	Rodadura		Hamburgo		
	MAM 1	MAM 2	MAM 1	MAM 2	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Probeta 1	2,515	2,497	2,526	2,517
	Probeta 2	2,521	2,507	2,532	2,513
	<b>Media</b>	<b>2,518</b>	<b>2,502</b>	<b>2,529</b>	<b>2,515</b>
WTS (mm/1.000 cycles)	Probeta 1	0,130	0,111	0,320	0,080
	Probeta 2	0,175	0,070	0,360	0,040
	<b>Media</b>	<b>0,153</b>	<b>0,091</b>	<b>0,340</b>	<b>0,060</b>
Deformación final (mm)	Probeta 1	3,243	3,511	5,670	2,190
	Probeta 2	3,778	3,007	6,380	1,860
	<b>Media</b>	<b>3,511</b>	<b>3,259</b>	<b>6,000</b>	<b>2,000</b>

(con ciclos de congelación-descongelación), los resultados de resistencia conservada han mostrado valores de 114%, 118%, 104%, 107% o 121% [20, 21].

### 3.2 Ensayo de rodadura

Los resultados del ensayo de rodadura (EN 12697-22) están recogidos en la Tabla 3 (junto a los resultados del ensayo de Hamburgo) para ambas mezclas, MAM 1 y MAM 2. En este caso, el hecho de adicionar fibras a la mezcla mejora su resistencia a deformaciones plásticas, de manera que podemos destacar un efecto positivo en el comportamiento de la mezcla tras incorporar este aditivo, lo cual puede estar relacionado con el desarrollo de una red interna tridimensional que permite distribuir las tensiones y reducir las deformaciones permanentes del material. Este mismo efecto ha sido encontrado en otros estudios en los que se han utilizado otros tipos de fibras [9]. En base a estos resultados, se puede comprender que la mezcla con fibras permite reducir la aparición de roderas en firmes asfálticos sometidos a elevadas temperaturas durante periodos calurosos.

### 3.3 Ensayo de Hamburgo

Durante el estudio también se evaluó el comportamiento a deformaciones plásticas de las mezclas en presencia de agua a través del método de Hamburgo. Los resultados obtenidos vienen recogidos en la Tabla 3. En ella se muestra como el efecto

del agua causa una notable degradación en la resistencia a deformaciones plásticas de la mezcla de referencia, mientras que la mezcla con fibras mantiene sus propiedades demostrando una buena resistencia ante deformaciones plásticas. De esta forma, es posible comprobar que ante condiciones de servicio desfavorables, el efecto beneficioso de las fibras para reducir la aparición de roderas es incluso más acentuado.

### 3.4 Ensayo de triaxial

La Figura 3b recoge los resultados obtenidos en el ensayo triaxial para evaluar la resistencia a deformaciones plásticas de ambas mezclas en función de la temperatura de servicio. A partir de los resultados se puede ver que ambas mezclas se comportan satisfactoriamente para las diferentes temperaturas, pero de nuevo, se comprueba que la incorporación de fibras lleva a menores valores de deformación permanente ante temperaturas extremas, obteniendo así un comportamiento más estable y menos susceptible a las variaciones térmicas, lo que es particularmente beneficioso en climas con amplias oscilaciones térmicas donde se pueden alcanzar elevados valores de temperatura.

### 3.5 Ensayo de rigidez

La Figura 4a recoge los resultados de los ensayos de rigidez a diferentes temperaturas. Como se puede observar, la presencia de las fibras reduce ligeramente la capacidad portante

## Mezclas de alto módulo con fibras acrílicas para su empleo en zonas climáticas severas

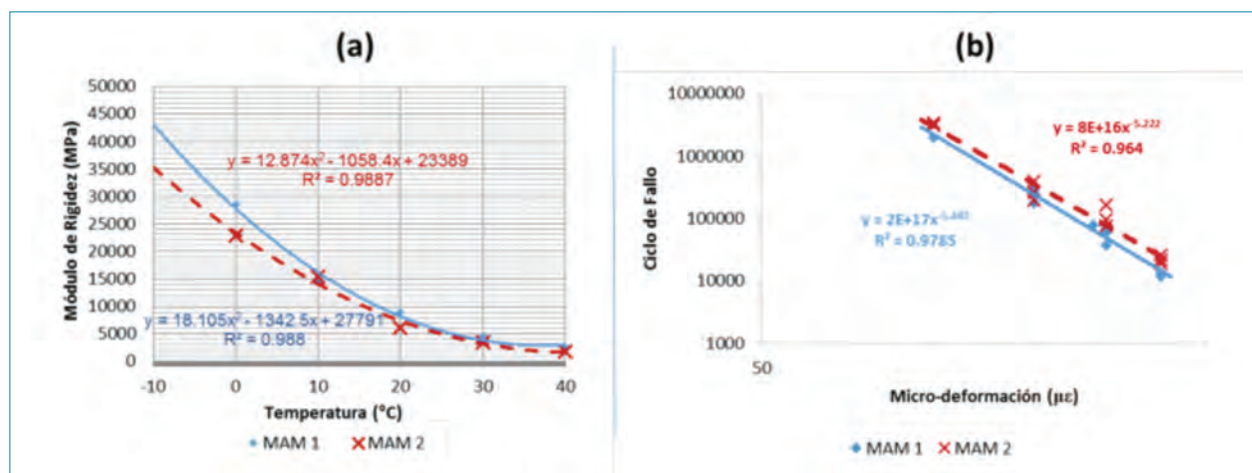


Figura 4. Resultados de módulo de rigidez en función de la temperatura (a) y de resistencia a fatiga (b).

de la mezcla a bajas temperaturas (valores inferiores a 10°C). Sin embargo, dado que este hecho no supone una pérdida de resistencia ante deformaciones plásticas (tal y como han demostrado los ensayos anteriores), este descenso de rigidez podría suponer un aspecto positivo para mejorar la resistencia a fatiga a bajas temperaturas dado que hace que la mezcla no sea tan rígida y vítrea, permitiendo mayores deformaciones antes de que se produzca su fallo por fisuración. Este mismo fenómeno de reducción de rigidez (consiguiendo un material más flexible) también ha sido encontrado en otros estudios que han incorporado otros tipos de fibras [22, 23].

### 3.6 Fatiga a 4 puntos

La Figura 4b muestra los resultados del ensayo de fatiga obtenidos para ambas mezclas ante diferentes niveles de deformación. En consonancia con los resultados obtenidos en el ensayo de módulo de rigidez, así como con otros estudios desarrollados para materiales similares [20], la adición de fibras acrílicas mejora la resistencia a fatiga de las MAM para cualquier nivel de deformación aplicado, ya que se obtiene un material más flexible y elástico. De esta forma, se puede comprobar que a pesar del descenso de rigidez registrado al incorporar fibras, la MAM con este aditivo resiste mayor número de ciclos de carga antes de agotar sus prestaciones mecánicas y de que tenga lugar su fisuración.

### 3.7 Resistencia a la fisuración a bajas temperaturas

Los resultados obtenidos en el ensayo TSRST, que permite evaluar la resistencia de las mezclas bituminosas a la fisu-

ración a bajas temperaturas (asociadas a retracciones térmicas) se muestran en la Figura 5. A partir de estos resultados se puede comprobar que la MAM con fibras es menos susceptible a la temperatura que la mezcla patrón, la cual se ve claramente afectada a temperaturas inferiores a -15°C, provocando el fallo del material, mientras que en el caso de la MAM con fibras las primeras variaciones de tensión se registraron para temperaturas inferiores a -25°C. Este hecho puede ser debido a la formación de una red tridimensional de las fibras acrílicas dentro de la mezcla, que permiten una mejor distribución de las tensiones generadas por la retracción del material ante el descenso de temperatura.

### 3.8 Ensayo UGR-FACT

Para analizar la resistencia a la fisuración, y su propagación, de acuerdo al ensayo UGR-FACT, la Figura 6a muestra los valores del parámetro de daño medio para cada mezcla, mientras que la Figura 6b presenta la evolución del daño registrado por las MAM en términos del valor medio acumulado del RDEC. Los resultados indican que el valor de daño de la MAM 1 es aproximadamente el doble que el registrado para esa misma mezcla, pero con fibras, lo que pone de manifiesto que el uso de este aditivo lleva a mayor resistencia al efecto de fatiga provocado por la combinación de cargas del tráfico y gradientes térmicos. Por su parte, la Figura 6b muestra que la propagación del daño causada en la mezcla es considerablemente reducida en el caso de la MAM 2, lo que indica que el uso de fi-



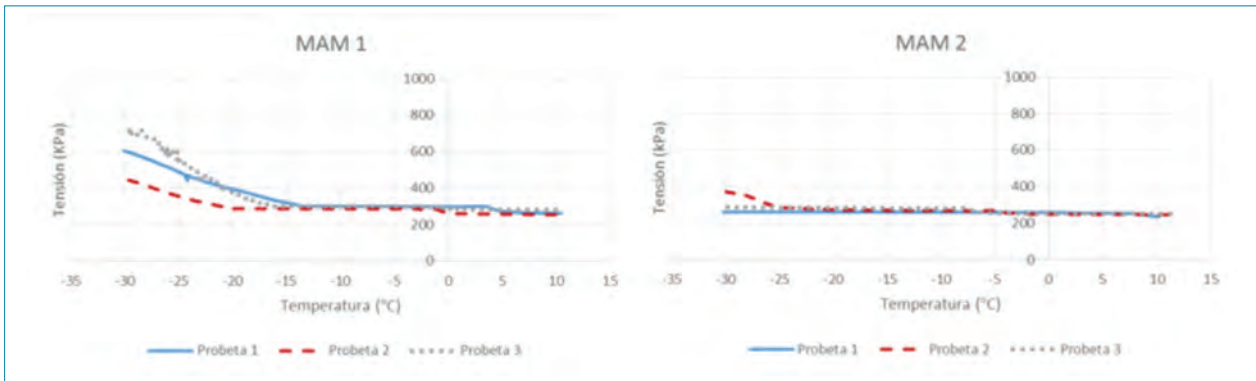


Figura 5. Resultados del ensayo TSRST.

bras acrílicas permitiría incrementar de forma acentuada la vida de servicio de estos materiales en firmes de carreteras.

#### 4. Conclusiones

A continuación se aportan las conclusiones más significativas en base a los resultados obtenidos:

- El uso de fibras acrílicas no afecta a la susceptibilidad al agua y a ciclos de hielo-deshielo de las mezclas de alto módulo. La mezcla con fibras presentó una baja susceptibilidad a la presencia de agua y hielo.
- La incorporación de fibras acrílicas a las mezclas de alto módulo aporta mayor resistencia a las deformaciones plásticas (incluso ante la presencia de agua), a la vez que

se disminuye su susceptibilidad a la temperatura, y la posibilidad de formación de roderas.

- La adición de fibras disminuye la rigidez de la MAM a bajas temperaturas, no obstante, esto no ocasiona efectos negativos en la resistencia a deformaciones plásticas, y por otra parte mejora la vida a fatiga de la mezcla dado que se incrementa su flexibilidad.
- A bajas temperaturas, la presencia de fibras acrílicas mejora la distribución de tensiones internas causadas por la retracción del material ante el descenso de temperatura. De esta forma, este aditivo permite mejorar el comportamiento mecánico de las mezclas de alto módulo en regiones con un clima frío.
- La MAM fabricada con fibras acrílicas presentó mayor resistencia al efecto combinado de las cargas del tráfico y los gradientes térmicos. Además, se vio que las fibras per-

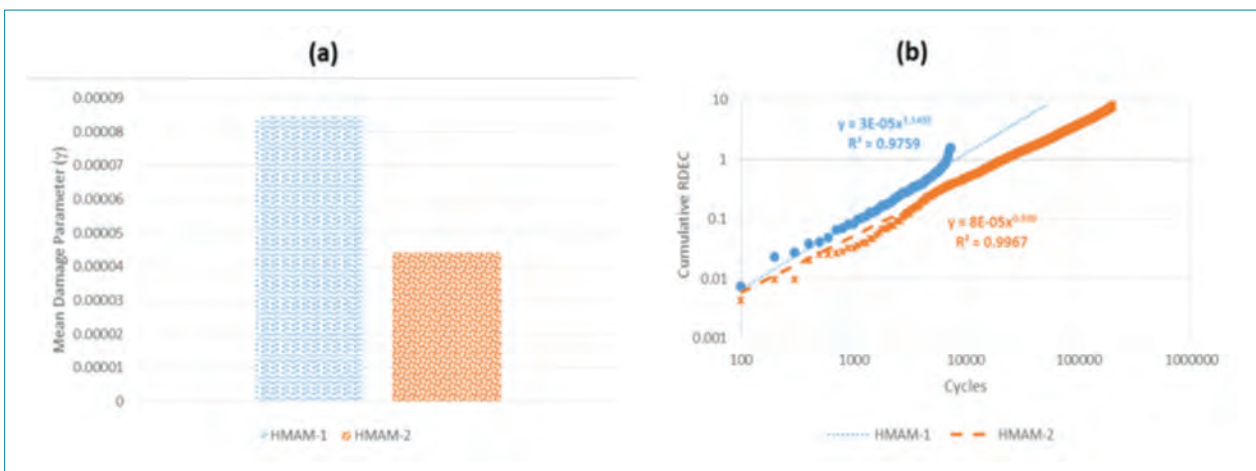


Figura 6. Resultados del ensayo UGR-FACT. a) parámetro de daño medio; b) evolución del acumulado de RDEC.

## Mezclas de alto módulo con fibras acrílicas para su empleo en zonas climáticas severas

miten mejorar la respuesta a largo plazo de las mezclas asfálticas, lo que contribuye a alargar la vida de servicio de los firmes de carreteras.

### 5. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la financiación recibida para la realización de este estudio que forma parte del proyecto de I+D "Firmes Asfálticos para Temperaturas Extremas (FATE)", referencia IPT-2012-0977-370000, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, dentro del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica, 2012-2015 y cofinanciado por el fondo FEDER.

### 6. Referencias

- [1] Diefenderfer, B. K., y Maupin, G.W. 2010. Field trials of high-modulus-high-binder-content base layer hot-mix asphalt mixtures. Research Report VTRC 17-R2, Virginia Transportation Research Council.
- [2] Nkgapele, M., Denneman, E., Anochie-Boateng, J.K.. 2012. Construction of a high modulus asphalt trial section Ethekwini: South Africa's first practical experience with design, manufacturing and paving. Proceedings of the 31st Southern African Transport Conference (SATC).
- [3] Liu, Y. Q. 2007. Application technology study on high modulus hot mix asphalt concrete. Commun Res. Inst. Liaoning Province.
- [4] Corté, J. F. 2003. Development and uses of hard grade asphalt and of high modulus asphalt mixes in France. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 503, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D. C., TRB, pp. 12-30.
- [5] Lee, H. J., Lee, J.H., Park, H.M.. 2007. Performance evaluation of high modulus asphalt mixtures for long life pavements. Construction and Building Materials, Vol. 21, pp. 1079-1087.
- [6] Catalogue des structures types de chaussées neuves de la direction des routes. LCPC/SETRA, 1998.
- [7] Ruiz, A. 2002. Mezclas de Alto Módulo. Jornadas para Jefes de Obras de Probisa, Madrid.
- [8] Bankowski, W., Tusar, M., Wiman, L.G. 2009. Laboratory and Field Implementation of high modulus asphalt concrete. Requirements for HMAC mix design and pavement design. Sustainable Pavements for European New Members States, SPENS. European Commission DG Research, 6th Framework Programme, Sustainable Surface Transport.
- [9] Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M., Hejazi, S.M. 2010. Fiber-reinforced asphalt-concrete – A review. Construction and Building Materials. Vol. 24, pp. 871-877.
- [10] EN 12697-12: Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt – Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2009.
- [11] EN 12697-23: Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt – Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2004.
- [12] EN 12697-22: Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel tracking. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2008.
- [13] EN 12697-25, method B: Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt – Part 25: Cyclic compression test. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2006.
- [14] EN 12697-26, annex C: Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2012.
- [15] EN 12697-24, annex D: Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2012.
- [16] EN 12697-46: Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt – Part 12: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2013.
- [17] 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.
- [18] 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.

- [19] 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.
- [20] Xu, Q., Chen, H., Prozzi, J.A. 2010. Performance of fiber reinforced asphalt concrete under environmental temperature and water effects. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 2003-2010.
- [21] Anurag, K., Xiao, F., Amirkhanian, S. 2009. Laboratory investigation of indirect tensile strength using roofing polyester waste fibers in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 2035-2040.
- [22] Ye, Q., Wu, S., Li, N. 2009. Investigation of the dynamic and fatigue properties of fiber-modified asphalt mixtures. *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, pp. 1598-1602.
- [23] Oda, S., Fernandes, J.L., Ildefonso, J.S. 2012. Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, Vol. 26, pp. 13-20.