

ESTUDIO DE FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON LA ADICIÓN DE MACROFIBRAS

Francisco Morea¹, Miguel Sol-Sanchez², Fernando Moreno Navarro²

¹ Departamento de Construcciones, Facultad de ingeniería UNLP - CONICET, La Plata, Argentina, francisco.morea@ing.unlp.edu.ar, franciscomorea@conicet.gov.ar

² Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (LabIC.UGR), Granada, España. msol@ugr.es, fmoreno@ugr.es

Resumen

Dentro de la construcción de pavimentos asfálticos el uso de mezclas asfálticas con fibras para reforzar y o mejorar el comportamiento no está muy difundido. La utilización de fibras para mejorar el comportamiento de un concreto asfáltico es un campo de reciente estudio a nivel investigación, sobre todo las microfibras. Las denominadas macrofibras por el contrario son un campo inexplorado. Este tipo de mejora presenta un promisorio campo de aplicación en diferentes mezclas no solo nuevas sino para refuerzos de pavimentos deteriorados para mitigar situaciones como la reflexión de fisuras o la fisuración térmica.

Cuando se busca optimizar la performance de una mezcla se analizan principalmente los modos de falla (ahuellamiento, fatiga, fisuración térmica y la susceptibilidad al agua). Las mezclas con la incorporación de macrofibras para mejorar su desempeño es un novedoso campo de acción de este grupo de investigación. Se vienen utilizando distintas micro y macrofibras de uso típico en Hormigones reforzados con fibras incorporadas a concretos asfálticos. Se ha encontrado que las micro y macrofibras mejoran el desempeño del concreto asfáltico al ahuellamiento mientras que las macrofibras adicionalmente mejoran el desempeño a fractura del concreto asfáltico. En este trabajo, se estudió una caracterización completa de una mezcla de altas prestaciones con la adición de macrofibras sintéticas y de vidrio. Además, se estudió una mezcla de control sin macrofibras. Los resultados mostraron que la adición de macrofibras mejora la sensibilidad al agua, el ahuellamiento y los módulos dinámicos de la mezcla estudiada. Además, durante las pruebas de fatiga se observó que la incorporación de ambos tipos de macrofibras mejoró en gran medida la durabilidad por fatiga a temperaturas medias del pavimento. El parámetro de daño relacionado con el comportamiento a la fatiga se mejoró en las mezclas de asfalto reforzado con fibra, extendiendo la vida útil. Las macrofibras sintéticas mostraron un mejor comportamiento a la fatiga a bajas temperaturas, mientras que las macrofibras de vidrio dieron una mejor respuesta a la temperatura más alta estudiada.

Palabras Clave: Macrofibras, Fatiga, sensibilidad al agua.

1 Introducción

Las mezclas asfálticas son una combinación de agregados pétreos y cemento asfáltico que forman parte de un sistema multicapas denominado pavimento. Estas, están destinadas a ser la capa superior del pavimento y proteger a las capas granulares subyacente de las inclemencias climáticas y de la circulación de los vehículos. Estas son las que reciben la incidencia directa de las cargas debiendo absorber la mayor parte de esa energía [1]. Por tanto, el desempeño (performance) de una mezcla asfáltica es de gran importancia para asegurar confort y resistencia al tránsito, soportar las condiciones climáticas y reducir las tensiones provocadas por el tránsito a valores admisibles para la base granular por debajo de ella.

Las condiciones a las que se ven sometidos los pavimentos son cada vez más importantes y extremas [2]. En general los pavimentos se diseñan considerando las tensiones del tránsito. Sin embargo, los gradientes térmicos y la presencia de agua afectan su capacidad resistente [3] tanto o más que las acciones de los vehículos. La valoración del desempeño de una mezcla asfáltica debe ser parte primordial del diseño de manera de obtener un pavimento resistente y durable a lo largo de su vida útil. El diseño, caracterización y evaluación del pavimento se vuelve cada vez más influyente a los efectos de que este dure en el tiempo teniendo en cuenta los diferentes modos de falla. Las fallas primordiales que presenta un pavimento pueden dividirse en fisuraciones (térmica o por fatiga), deformaciones permanentes y daño por humedad.

La incorporación de diferentes materiales a la composición de la mezcla para mejorar su desempeño y durabilidad es una técnica utilizada normalmente [4-6]. Uno de estos materiales son las fibras [7-11]. Es interesante destacar el trabajo de Bianchetto y Nosetti [11] que detallan los trabajos con fibras en mezclas asfálticas en Argentina, sobre todo en particular el de mezclas con fibras aditivadas para mezclas tibias [9]. Existen fibras cuya adición mejora el desempeño de mezclas asfálticas a diferencia de las fibras de celulosa u otras cuyo objetivo es permitir la mayor incorporación de ligante asfáltico y evitar su escurrimiento de la mezcla [12,13]. Las fibras se han utilizado históricamente para reforzar materiales frágiles controlando los procesos de fisuración en este tipo de materiales incrementando la tenacidad, capacidad de carga residual, resistencia a tracción y durabilidad. Ejemplo de esto son los Hormigones Reforzados con Fibras (HRF). En concretos asfálticos las fibras ofrecen mejoras del desempeño. Numerosas investigaciones han reportado mejoras en el comportamiento de mezclas reforzadas con fibras [14-20], pero en su mayoría se trata de microfibras (longitudes de entre 10 a 20 mm). No existen estudios con las denominadas macrofibras (longitudes promedio de entre 35 a 60 mm). Recientes investigaciones [21,22] han mostrado el aporte positivo de la incorporación de macrofibras de vidrio y sintéticas en las mejoras al ahuellamiento y fractura que otorgan a concretos asfálticos. Falta estudiar el aporte de este tipo de macrofibras en fatiga y en lo que hace a la sensibilidad al agua. Las características de acción de las fibras frente a la generación de fisuras es la de limitar el desarrollo de las mismas y transmitir las tensiones entre ambos lados de las fisuras. Este mecanismo aumentaría la resistencia a fatiga del material. Desde el punto de vista de la acción del agua al

limitar la fisuración se limita el ingreso del agua. Por lo tanto, se mejoraría la sensibilidad al agua.

El objetivo principal de esta investigación es observar el desempeño a fatiga y la sensibilidad al agua de concretos asfálticos con la incorporación de macrofibras sintéticas y de vidrio. De manera complementaria se realizaron ensayos de ahuellamiento, abrasión y modulo dinámico para obtener una mejor caracterización de las mezclas estudiadas. Se han comparado los resultados respecto a la mezcla sin la adición de fibras.

2 Experimental

2.1 Materiales

Este estudio se desarrolló en una estadía de investigación en el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada sobre una mezcla discontinua del tipo BBTM 11B cuya curva granulométrica se ve en la Figura 1. Esta BBTM es análoga a una mezcla discontinua M-10 de la normativa argentina. La mezcla se compuso con agregados y filler con las características que se detallan en la Tabla 1. Todas las variantes estudiadas aquí se realizaron con un asfalto modificado con polímeros SBS (penetración 45/80 0.1mm, punto de ablandamiento 65 °C). Esta mezcla fue diseñada de acuerdo con las especificaciones de la Norma Española - PG3 [23] para este tipo de mezclas. Por otro lado, para observar el potencial de refuerzo en este tipo de mezcla en este estudio se utilizaron dos tipos de macrofibras (de vidrio y sintéticas). Las características principales de las macrofibras se observan en la Tabla 2. Así se obtuvieron en definitiva las tres mezclas estudiadas. La mezcla control sin fibra (BBTM) y dos con dos diferentes macrofibras, de vidrio (BBTM G) y sintéticas (BBTM S).

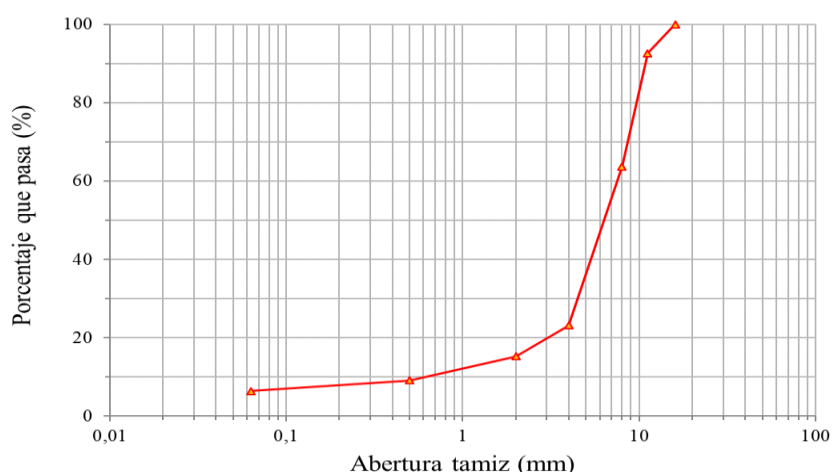


Figura 1. Curva granulométrica de la mezcla utilizada para el estudio

Tabla 1. Características de la mezcla y agregados estudiados

Agregado	Origen	% en mezcla	Densidad [g/cm ³]	Absorción [%]
Grueso (6-12 mm)	Ofita	70,5	3,21	0,84

Arena (0-6 mm)	Caliza	19,1	2,77	0,88
Filler	Cemento	5,7	3,00	-
Asfalto	AM	4,75	1,03	-

Tabla 2. Propiedades de las fibras.

Fibra		G	S
Tipo		Vidrio	Sintética
Largo	[mm]	36	55
Densidad	[g/cm ³]	2,68	0,91
Relación de aspecto (L/D)		67	60
Tensión de tracción	[MPa]	1700	560
Módulo de elasticidad	[GPa]	72	3,9
Punto de fusión	[°C]	860	155 - 165
Descomposición	[°C]	-	280
Dosificación en peso de mezcla	[%]	0,4	0,3

2.2 Plan de ensayos

El principal objetivo fue evaluar el potencial de mejora en el desempeño mecánico de un tipo de mezcla asfáltica de altas prestaciones cuando se les incorporó macrofibras de vidrio o sintéticas. El desempeño de las diferentes mezclas se caracterizó respecto al ahuellamiento, módulo dinámico, fatiga, daño por humedad y abrasión. La Tabla 3 presenta el plan de ensayos seguido. Un particular análisis se realizó sobre la respuesta a fatiga de las mezclas con la incorporación con macrofibras, la cual puede ser un factor clave para determinar la influencia de las macrofibras sobre la vida en servicio de las mezclas bituminosas.

Tabla 3. Plan de ensayos.

Ensayo	Norma	Carga (kN)	T (°C)	f (Hz)	N° de muestras
Wheel tracking	IRAM 6850 EN 12697-22 B	0,7	60		2
Modulo Dinámico	EN 12697-26 Anexo C		5	10	3
			20	10	3
			40	10	3
Sensibilidad al agua	EN 12697-12		15		6
Abrasión	EN 12697-17		25		3
Fatiga UGR FACT	[24]	0,4	10	5	3
			15		3
			20		3

2.2.1 Ahuellamiento en ensayo de rueda cargada.

Para la caracterización frente al ahuellamiento se utilizó el ensayo de rueda cargada (EN 12697-22-IRAM 6850). El ensayo simula el paso de una rueda en condiciones de temperatura y carga extremas midiendo las deformaciones permanentes en la mezcla asfáltica por medio de un LVDT. Se grafica la curva de deformaciones permanentes en función de los ciclos de carga para obtener como parámetros de caracterización de la resistencia al ahuellamiento la pendiente de ahuellamiento o velocidad de deformación (WTS), Ecuación 1, y la profundidad proporcional de huella (PRD), Ecuación 2. Para cada mezcla se ensayaron al menos dos probetas.

$$WTS \left[\frac{mm}{10^3 \text{ ciclos}} \right] = \frac{D_{10000} - D_{5000}}{5} \quad (1)$$

$$PRD [\%] = 100 \cdot \frac{D_{10000}}{e} \quad (2)$$

Donde D_{10000} y D_{5000} son las deformaciones en mm correspondientes a los ciclos 10000 y 5000 de carga respectivamente y e es el espesor de la probeta en mm.

2.2.2 Modulo Dinámico (EN 12697-26. Anexo C).

El módulo dinámico de las diferentes mezclas estudiadas se midió a 5, 20 y 40 °C de acuerdo a la norma EN 12697-26 anexo C para evaluar la influencia de las macrofibras en la capacidad portante de las mezclas a diferentes temperaturas.

2.2.3 Sensibilidad al agua (EN 12697-12).

Respecto al daño por humedad en la mezcla, la adición de fibras puede ayudar a minimizar este. La sensibilidad al agua se determinó de acuerdo a la norma EN12697-12. Allí se evalúa el índice de resistencia conservada medida a partir del ensayo de tracción indirecta a 15 °C. A tal fin se deben moldear probetas de mezcla que se dividen en dos grupos: un lote de probetas se somete a un ciclo de inmersión en agua a 60 °C durante 24 hs, mientras el otro lote se deja de control sin sufrir acondicionamiento. Finalmente, ambos grupos se rompen a tracción indirecta a 15 °C y se compara la resistencia media de cada grupo. La norma estipula que la resistencia del grupo acondicionado en agua no debe ser inferior al 90 % de la resistencia del grupo de control.

2.2.4 Ensayo de abrasión – “Cántabro”.

El ensayo Cántabro es parte del diseño de este tipo de mezclas discontinuas estudiadas. La pérdida de masa a 25 °C en probetas de 100 mm de diámetro fue medida por medio del ensayo de abrasión (EN 12697-17) para observar como las macrofibras actúan en la resistencia a la desintegración de la mezcla.

2.2.5 Ensayo de Fatiga

La respuesta a fatiga se estudió con el equipo Fatigue Asphalt Cracking Test de la Universidad de Granada (UGR-FACT) [24]. Esta prueba proporciona una comprensión global del fenómeno de fisuración por fatiga al reproducir las condiciones de servicio (tanto cargas de tráfico como gradientes térmicos) esperadas en los pavimentos de las carreteras. La prueba se realizó a 10 °C, 15 °C y 20 °C, ya que la temperatura

juega un papel esencial en el desempeño de los materiales bituminosos. El ensayo se realizó sobre probetas de 220x60x40 mm aplicando condiciones de tensión controlada (carga cíclica con una amplitud de tensión de 0,4 MPa y una frecuencia de 5 Hz) con el fin de simular las condiciones reales que suele soportar el pavimento, junto con los efectos del tráfico de alta velocidad.

El UGR-FACT reproduce los esfuerzos que conducen a la falla del pavimento. El dispositivo de prueba está compuesto por una base (Figura 2a), dos soportes donde se fija la muestra (Figura 2b) y una placa de aplicación de carga (Figura 2c). La base tiene una plataforma que está compuesta por dos superficies inclinadas con dos carriles que permiten el deslizamiento de los apoyos, y de dos ejes verticales que se utilizan para medir deformaciones verticales en la parte superior de la probeta (Figura 2d). Los dos soportes están compuestos por un carro que se adapta a la forma del carril en la base (que conduce a una transmisión de carga efectiva), y una placa de soporte (a la que se fija la probeta con resina epoxi) donde se mide la deformación horizontal (LVDT) (Figura 2e). Además, bajo estas placas de soporte, se introducen dos elementos elásticos para permitir la flexión de la probeta (Figura 2f) y un resorte que simula las capas de cimentación (Figura 2g). La distancia entre los soportes puede variar, dependiendo del tipo de deterioro que se quiera reproducir (p. Ej., Fisura, prefisura, junta de dilatación, bache, etc.). Finalmente, el cabezal de aplicación de la carga está compuesto por una pieza de acero lo suficientemente gruesa como para evitar deformaciones durante la aplicación de la carga (evitando así errores diferenciales debido a su propia deformación, que no están relacionados con la probeta) a la vez que proporciona una superficie plana. para los calibres de deformación vertical (Figura 2f).

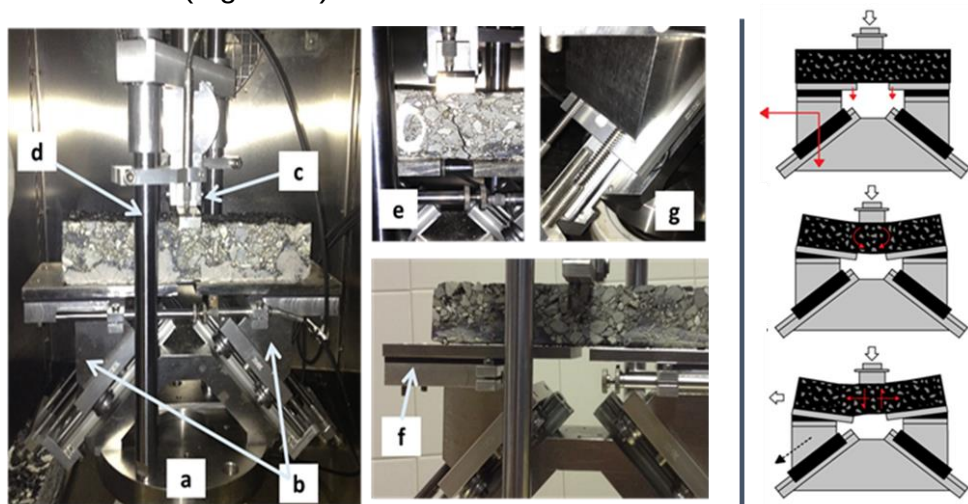


Figura 2. Equipo UGR FACT

La geometría simple del equipo es capaz de generar deformaciones tanto horizontales como verticales en la probeta, que reproducen los esfuerzos de flexión y cortante debidos a la carga del tránsito, así como los esfuerzos de tracción debidos al efecto de gradientes térmicos. Así, el método de ensayo es capaz de generar y propagar un proceso de agrietamiento por fatiga controlado, y se estudia su evolución a través de la energía disipada en un volumen representativo de la probeta donde ocurre el fenómeno, evitando su aleatoriedad y dispersión tridimensional. Los resultados se expresan en términos de energía disipada, y el daño producido en la muestra se cuantifica de acuerdo con el hecho de que solo la diferencia de energía

disipada de un ciclo a otro provoca la degradación del material. Así tasa de cambio de Energía Disipada, RDEC del inglés Ratio of Dissipated Energy Change (Ecuación 3), se utiliza para analizar la evolución del daño producido en el espécimen.

$$RDEC_{n+1} = \frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_n} \quad (3)$$

donde ω_n es la energía disipada producida en ciclo de carga n (en J/m^3); y ω_{n+1} es la energía disipada producida en ciclo de carga $n + 1$ (en J/m^3).

3 Resultados

En la primera etapa, Las mezclas seleccionadas (con y sin macrofibras) se caracterizaron completamente en cuanto a rigidez, ahuellamiento, sensibilidad al agua y en cuanto a pérdidas en el cántabro. La Tabla 4 muestra los valores de los módulos de rigidez a diferentes temperaturas para las mezclas estudiadas con el fin de evaluar el efecto de las fibras sobre la capacidad portante del material bituminoso. Se puede observar un aumento de la rigidez a todas las temperaturas estudiadas de las mezclas con macrofibras en comparación con la de control BBTM, lo que indica una mayor capacidad portante.

Al comparar los módulos de ambas mezclas asfálticas con macrofibras, la BBTM G muestra menos susceptibilidad térmica que la BBTM S. Asimismo, en términos generales, el BBTM con macrofibras de vidrio mostró una mayor rigidez que el BBTM S a las altas temperaturas estudiadas (20 y 40 °C) y una menor rigidez a 5 °C, lo que podría conducir a un mejor comportamiento (considerando la relación de este parámetro con otras propiedades como resistencia tanto a deformaciones permanentes como al agrietamiento). No obstante, se debe considerar que ambas mezclas reforzadas presentan valores de rigidez similares.

Table 4. Módulo de rigidez a diferentes temperaturas.

	Módulo de rigidez (MPa)		
T (°C)	5	20	40
BBTM DS*	7850,4 ± 562,7	2102,0 ± 193,2	496,7 ± 37,4
BBTM S DS*	9399,6 ± 1014,6	2779,6 ± 403,7	582,8 ± 31,23
BBTM G DS*	8266,2 ± 785,9	2822,0 ± 289,3	673,8 ± 58,4
*DS: Desviación Standard			

En la Figura 3 y Tabla 5 se muestran los resultados de la prueba de ahuellamientos. Se observa que las mezclas con macrofibras condujeron a mejoras en el comportamiento frente al ahuellamiento en comparación con la mezcla de control. La Figura 3 refleja que la inclusión de fibras condujo a menores deformaciones durante la etapa inicial de las pruebas al tiempo que redujo la tendencia de deformación a largo plazo. Esto podría estar relacionado con el hecho de que las macrofibras probablemente actúen de dos maneras respecto a las deformaciones permanentes:

primero generan un interlocking de los agregados gruesos; y segundo, aumentar la viscosidad de masa del mastic. Ambos mecanismos mejoran la resistencia al ahuellamiento de la mezcla asfáltica.

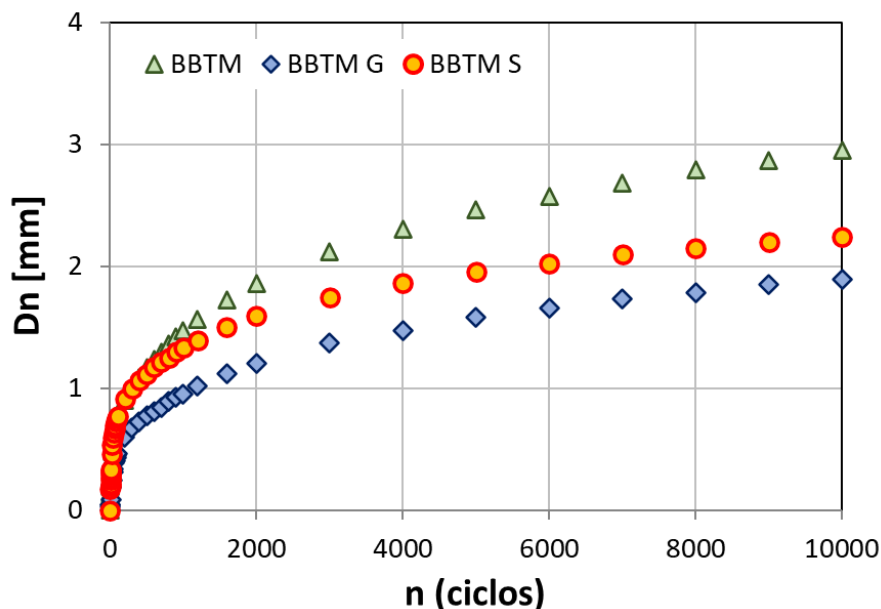


Figure 3. Ahuellamientos en el WTT de las mezclas estudiadas.

El efecto positivo de las macrofibras se observa claramente en la disminución de los valores WTS de BBTM G y BBTM S en comparación con BBTM, ver Tabla 5. Esto es significativo si se tiene en cuenta que este tipo de mezcla asfáltica de altas prestaciones se utiliza como carpeta de rodadura y sometidas a altas cargas de tránsito. En cuanto a la influencia del tipo de macrofibra, el BBTM G mostró menor WTS y esto puede estar relacionado con la mayor rigidez de esta mezcla asfáltica. Además, se puede observar una disminución importante en el valor de PRD de los FRAC (35% y 25% para BBTM G y BBTM S, respectivamente) en comparación con la de control. La incorporación de ambas fibras conduce a menores valores de deformación, lo que denota el efecto positivo de estos materiales.

Table 5. Resultados de otros ensayos de desempeño.

Ensayo	BBTM	BBTM G	BBTM S	PG3 limites
Ahuellamiento (EN 12697-22 B)				
D ₁₀₀₀₀ Huella a 10000 ciclos (mm)	2,96	1,90	2,25	
PRD* (%)	7,5	4,9	5,6	
WTS ** (mm/10 ³ ciclos)	0,099	0,062	0,058	< 0,070 – 0,10
Sensibilidad al agua (EN 12697-12)				
ITSR*** (%)	90,3	93,6	97,0	> 90
Cantabro (EN 12697-17)				
Pérdida de Masa en seco (%)	7,5	6,7	8,1	< 20
*PRD: Proportional Rut Depth.				

**WTS: Wheel Tracking Slope.

***ITSR: Indirect Tensile Strength Ratio

La Tabla 5 también muestra los resultados de las pruebas de abrasión y sensibilidad al agua. Todas las mezclas presentan excelentes resultados de abrasión que cumplen adecuadamente con los requisitos de la especificación por lejos. En cuanto a la sensibilidad al agua, todos los asfaltos cumplen los requisitos de la norma EN 12697-12. No obstante, se puede observar que la mezcla de control BBTM apenas cumplió con el límite especificado ($> 90\%$ en el PG3 [23]), mientras que ambas mezclas con fibras mostraron mejores respuestas. Por tanto, se puede decir que las macrofibras mejoraron la cohesión y limitaron el despegue entre asfalto y áridos en relación a la sensibilidad al agua.

Para analizar el efecto de las macrofibras en la resistencia a fatiga de las mezclas se realizaron ensayos en el UGR FACT. La Figura 5 muestra valores medios de los ciclos de falla por fatiga a las diferentes temperaturas de ensayo. Se puede observar que la adición de macrofibras alargó la vida de las mezclas asfálticas mejorando su comportamiento a fatiga. Se puede observar que, la vida a fatiga de la BBTM se redujo con un aumento de temperatura de 10 a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el BBTM G y el BBTM S mantuvieron su vida a la fatiga en este gradiente de temperatura, presentando mayor número de ciclos a falla que el BBTM de control. No obstante, se debe considerar que a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ la vida a la fatiga es similar entre BBTM y BBTM S, pero la BBTM G aún mostró mayor resistencia a la fatiga que las otras dos mezclas asfálticas estudiadas (más del doble de los ciclos de fatiga). Estos resultados podrían estar relacionados con el hecho de que a 10 y $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, las macrofibras sintéticas permitieron incrementar la resistencia de la mezcla por su comportamiento más elástico a tales temperaturas, pero al llegar a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, ya no pudieron mostrar esta capacidad para aumentar la elasticidad del material. Por otro lado, como las macrofibras de vidrio son más rígidas que las sintéticas, condujeron a una mayor mejora de la resistencia a la fatiga al aumentar la temperatura de prueba.

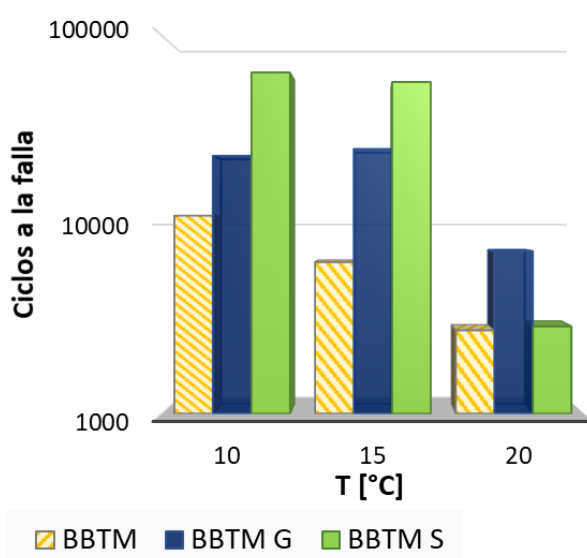


Figura 5. Valores medios de ciclos a la falla por fatiga a diferentes temperaturas.

Normalmente, se espera que la energía disipada aumente hasta la falla. Sin embargo, cuando se analizó el avance de la energía disipada y el delta de deformación horizontal frente a ciclos en mezclas de fibras estudiadas a 10 ° C, se encontró que ambas variables presentaron un proceso de estabilización (o incluso reducción) en el mismo número de ciclo en todas las muestras estudiadas. Esto podría explicarse en cómo se espera sea el accionar de las macrofibras frente al proceso de fisuración. Potencialmente las macrofibras comienzan a actuar cuando aparece la microfisuración en el mastico. Luego, las fibras que atraviesan las fisuras toman y transfieren la carga entre ambos lados y mantienen o reducen la apertura de la fisura. Esto normalmente se conoce como que las fibras "cosen la fisura". En consecuencia, cambia el equilibrio de deformación y, en consecuencia, la energía disipada. Esto se observó más claramente a 10 ° C que a las otras dos temperaturas estudiadas. No obstante, se debe considerar que la influencia o magnitud de este efecto depende de la orientación y cantidad de fibras que atraviesan las grietas, la rigidez de las fibras y la adherencia entre ligante asfáltico y fibras. Esto explica la dispersión observada en las diferentes muestras de mezclas con fibras.

Gráfico de Energía Disipada (J/m^3) vs Ciclos de carga para diferentes BBTMs a $T = 10^\circ\text{C}$.

Legenda:

- BBTM 1 (Círculo azul)
- BBTM 2 (Círculo azul oscuro)
- BBTM 3 (Círculo verde)
- BBTM G 1 (Triángulo naranja)
- BBTM G 2 (Triángulo morado)
- BBTM G 3 (Triángulo naranja claro)

El gráfico muestra la energía disipada en función de los ciclos de carga. Se observan dos regiones de interés marcadas con círculos rojos:

- Una región de transición entre 1000 y 10000 ciclos de carga, donde la energía disipada aumenta significativamente.
- Una región de alta energía disipada (entre 10000 y 100000 ciclos de carga) que muestra un efecto de las fibras, con una energía disipada que puede superar los 1800 J/m^3 .

Figura 6. Energía disipada versus los ciclos de carga mezclas BBTM y BBTM G.

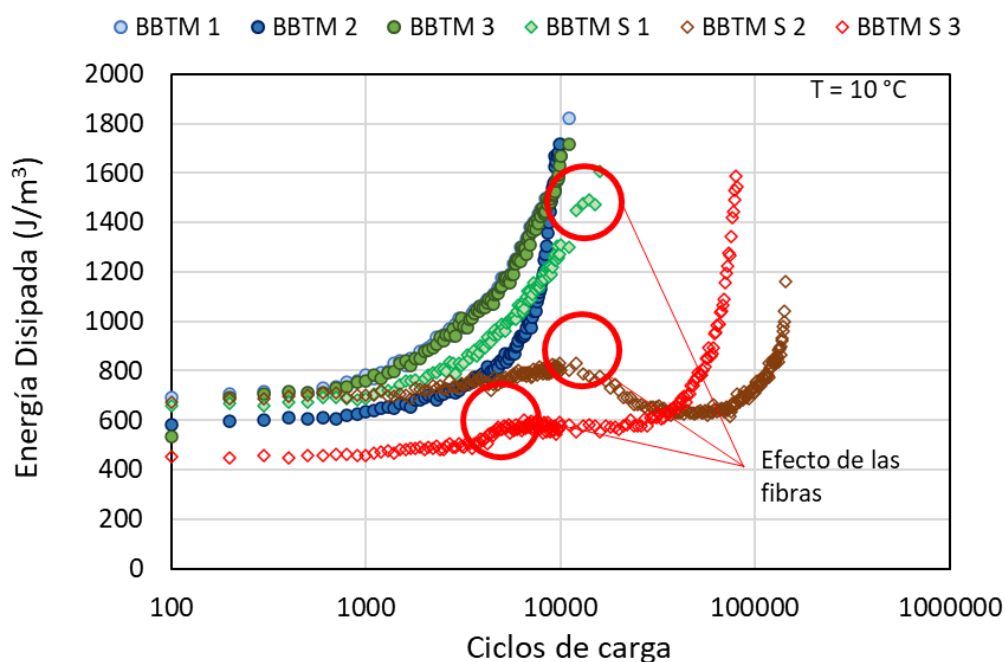


Figura 7. Energía disipada versus los ciclos de carga mezclas BBTM y BBTM S.

4 Conclusiones

Este trabajo explora principalmente las posibles mejoras en el comportamiento de la mezcla asfáltica con la incorporación de macrofibras como refuerzo, con el objetivo de incrementar el desempeño de estas para su aplicación en pavimentos y alargar su vida útil. Para ello, se llevaron a cabo una serie de ensayos de laboratorio para evaluar la influencia de dos tipos de macrofibras en el comportamiento de una mezcla discontinua, centrándose en la resistencia a la fatiga donde las macrofibras podrían jugar un papel fundamental. Las principales conclusiones obtenidas fueron las siguientes.

Como era de esperar, la variación de temperatura modificó el comportamiento a la fatiga; Se encontraron efectos diferenciales en función de la temperatura con respecto al tipo de macrofibras. A baja temperatura (10 ° C) las macrofibras sintéticas aumentan la resistencia a la fatiga mientras que a temperatura normal (20 ° C) las macrofibras de vidrio proporcionan una mayor resistencia.

- Las macrofibras aumentan la rigidez de la mezcla asfáltica. La mezcla con macrofibras de vidrio muestra menos susceptibilidad térmica que las mezclas con macrofibras sintéticas.

- La incorporación de macrofibras mejora el comportamiento al ahuellamiento, mostrando las macrofibras de vidrio las menores deformaciones permanentes. La adición de macrofibras también imparte algunos beneficios en el desempeño de la sensibilidad al agua. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre el efecto del tipo de fibras sobre el desempeño de la mezcla en propiedades como sensibilidad al agua y abrasión.

Por lo tanto, se confirmó el potencial efecto positivo de las macrofibras sobre el comportamiento a la fatiga y la consiguiente extensión de la vida útil de las mezclas asfálticas, principalmente debido al efecto de las fibras que permiten un mecanismo para coser las fisuras. Si bien estos beneficios también podrían estar asociados a la reducción del contenido de huecos de aire al utilizar las fibras, es importante mencionar que este fenómeno se debe principalmente al volumen que ocupan las fibras, mientras que los huecos en el agregado mineral y la relación de ligante asfáltico permanecen iguales, y por lo tanto, las composiciones volumétricas de las mezclas resultan comparables.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi mujer Natalia Soledad Alvarez, sin ella y todo su apoyo mi viaje a España, este trabajo y mi carrera nunca hubieran sido posibles. Nada hubiera sido posible de no ser por tu apoyo incondicional mi vida, que descanses en paz. Te amo y siempre lo hare, Francisco

Agradecer a la Facultad de Ingeniería de la UNLP y a la Universidad de Granada que hicieron posible el desarrollo de esta investigación. Un reconocimiento especial al grupo de investigadores del LabIC de la universidad de granada por su apoyo y ayuda durante mi estancia allí.

Referencias

- [1] Pereira P., Pais J. (2017). Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. Volume 4, Issue 4, 316-346.
- [2] Dormon, G.M., Metcalf, C.T. (1965). Design Curves for Flexible Pavements Based on Layered System Theory. *Highway research Record* 71. Highway Research Board, 69-84.
- [3] Moreno Navarro F., Sol-Sánchez M., Tomás-Fortún E. & Rubio-Gámez M. (2016). High-modulus asphalt mixtures modified with acrylic fibers for their use in pavements under severe climate conditions. *Journal of Cold Regions Engineering*, 30, 30–34. doi:10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000108.
- [4] Angelone S., Martinez F., Cauhape Casaux M. (2016). A Comparative Study of Bituminous Mixtures with Recycled Polyethylene Added by Dry and Wet Processes. 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, RILEM Bookseries 11. DOI 10.1007/978-94-017-7342-3_47.
- [5] Moghadas Nejad F., Azarhoosh A.R. , Hamed GH.H., Azarhoosh M.J. (2012). Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials* 31, 384–388 doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.01.004.
- [6] Moreno-Navarro F., Iglesias G. R., Rubio-Gámez M. C. (2016). Experimental evaluation of using stainless steel slag to produce mechanomutable asphalt mortars for their use in smart materials. *Smart Materials and Structures* 25(11):115036.
- [7] Musa N., Aman M., Shahadan Z., Taher M., Noranai Z. (2019). Utilization of synthetic reinforced fiber in asphalt concrete – a review. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 10-05:678-694.
- [8] Tanzadeh J., Reza Shahrezagamasaei R. (2017). Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, 144, 260–270. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.184.

- [9] Bianchetto, H.; Amorós, J.; Hacker, E.; Fretes, N.(2015). Mezcla SMA elaborada con asfalto multigrado y fibras aditivadas con ceras reductoras de las temperaturas operativas: características y beneficios funcionales y medioambientales. 18º Congreso Iberoamericano del Asfalto. Bariloche, Argentina.
- [10] Kumar P., Sikdar P. K., Bose S. & Chandra S. (2004). Use of Jute Fibre in Stone Matrix Asphalt. Road Materials and Pavement Design, 5(2), 239-249, doi: 10.1080/14680629.2004.9689971.
- [11] Bianchetto, H.; Nosetti, R.A. (2015). Experiencias con mezclas `fibroasfálticas` en Argentina. 10º Congreso de la Vialidad Uruguaya, Montevideo.
- [12] Woodside A., Woodward W., Akbulut H. (1998). Stone mastic asphalt: assessing the effect of cellulose fibre additives. Proc. Instn Civ.Engrs Mun. Engr:103-108.
- [13] Drüschner L. & Schäfer V. (2000). Stone Mastic Asphalt. German Asphalt Association. pp 37.
- [14] 19 Norambuena-Contreras J., Serpell R., Valdés Vidal G., González A. & Schlangen E. (2016). Effect of fibres addition on the physical and mechanical properties of asphalt mixtures with crack-healing purposes by microwave radiation. Construction and Building Materials, 127, 369–382. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.005.
- [15] Guo Q., Li L., Cheng Y., Jiao Y., & Xu C. (2015). Laboratory evaluation on performance of diatomite and glass fiber compound modified asphalt mixture. Materials & Design, 66, 51–59. doi:10.1016/j.matdes.2014.10.033.
- [16] Park P., El-Tawil S., Park S. & Naaman A. (2015). Cracking resistance of fiber reinforced asphalt concrete at -20°C. Construction and Building Materials, 81, 47–57. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.005.
- [17] Yoo P. & Kim K. (2014). Thermo-plastic fiber's reinforcing effect on hot-mix asphalt concrete mixture. Construction and Building Materials, 59, 136–143. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.038.
- [18] Qian S., Ma H., Feng J., Yang R. & Huang X. (2014). Fiber reinforcing effect on asphalt binder under low temperature. Construction and Building Materials, 61, 120–124. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.035.
- [19] Liu Q., Schlangen E., van de Ven M., van Bochove G. & van Montfort, J. (2012). Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four-point bending fatigue test. Construction and Building Materials, 29, 403–409. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.058.
- [20] Serin S., Morova N., Saltan M. & Terz S. (2012). Investigation of usability of steel fibers in asphalt concrete mixtures. Construction and Building Materials, 36, 238–244. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.113.
- [21] Morea F. & Zerbino R. (2018), a. Improvement of asphalt mixture performance with glass macro-fibers. Construction and Building Materials, 164, 113–120. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.198.
- [22] Morea F. & Zerbino R. (2018), b. Incorporation of synthetic macrofibres in Warm Mix Asphalt. Road Materials and Pavement Design, Published online 28 Jun 2018. doi: 10.1080/14680629.2018.1487874.
- [23] PG3: Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales (PG-3/75). Ministerio de Fomento de España. (2015). Pp. 513.

[24] Moreno-Navarro F., Rubio-Gámez M.C. (2013). UGR-FACT test for the study of fatigue cracking in bituminous mixes. *Construction and Building Materials* 43:184–190.