

# MEJORAS DEL DESEMPEÑO DE MEZCLAS DISCONTINUAS DE ALTAS PRESTACIONES A TRAVÉS DE LA INCORPORACIÓN DE DIFERENTES MACROFIBRAS

María Rosario Calvo Sastre<sup>1</sup>, Francisco Morea<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Departamento de Construcciones, Facultad de ingeniería UNLP, La Plata, Argentina, rochicalvo.s@hotmail.com

<sup>2</sup> Departamento de Construcciones, Facultad de ingeniería UNLP - CONICET, La Plata, Argentina, [francisco.morea@ing.unlp.edu.ar](mailto:francisco.morea@ing.unlp.edu.ar), franciscomorea@conicet.gov.ar

## Resumen

La incorporación de fibras con fines de refuerzo de mezclas asfálticas es un tema de mucho interés actualmente. Los estudios de la incorporación de macrofibras, Fibras largas de alta resistencia, es un tema reciente de estudio. A bajas y medias temperaturas las mezclas asfálticas fallan por fisuración (por fatiga o térmica) y las macrofibras actúan mejorando la resistencia a esta. Si consideramos la incorporación de este tipo de macrofibras en mezclas de altas prestaciones para carpeta de rodamiento como son los microaglomerados y la Stone mastic asphalt (SMA) estaríamos brindando al pavimento un plus de desempeño sobre todo frente a condiciones climáticas extremas. En este trabajo se estudió el desempeño en general de mezclas discontinuas (microaglomerados y SMA) con la incorporación de macrofibras de vidrio y sintéticas. Se analizó principalmente la resistencia a la fisuración por medio de ensayos de fractura por flexión en vigas entalladas a bajas temperaturas (-15 y 5 °C). Se encontró que la adición de las macrofibras a estas mezclas de altas prestaciones mejora en gran medida la resistencia a fractura de las mezclas lo que da un potencial de mejor durabilidad de este tipo de mezclas frente a condiciones climáticas extremas.

**Palabras Clave:** Mezclas Discontinuas, Macrofibras, Desempeño.

## 1 Introducción

Dentro del diseño de mezclas asfálticas es cada vez más importante considerar el futuro desempeño de la misma para resistir las cargas del tránsito como las inclemencias climáticas. Los microaglomerados discontinuos y la Stone Mastic Asphalt (SMA) son mezclas de altas prestaciones desarrolladas para condiciones extremas que se susciten en el pavimento y brinden mejoras sustanciales de confort al tránsito.

La adición de nuevos materiales es comúnmente usada para mejorar el desempeño de mezclas asfálticas y las mezclas de altas prestaciones no son la excepción. La incorporación de diferentes materiales a la composición de la mezcla para mejorar su desempeño y durabilidad es una técnica utilizada normalmente [1-3].

Dentro de los diversos materiales, uno de ellos son las 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 [4-7]. La incorporación de fibras con fines de mejora del desempeño es actualmente un campo de investigación muy fuerte e incluso algunos tramos experimentales en pavimentos [8-13]. Sin embargo, dentro de los numerosos trabajos en revistas internacionales todos ellos se refieren a fibras cortas (longitudes < 20mm). Existen otros tipos de fibras largas o macrofibras que brindan mejoras sustanciales en mezclas densas frente al ahuellamiento y fisuración térmica [14, 15]. También en recientes trabajos se ha encontrado que la adición de este tipo de macrofibras brinda mejoras en la resistencia a fatiga de una mezcla discontinua del tipo BBTM11B (Microaglomerado M-10 en argentina) [16].

Si consideramos la incorporación de este tipo de macrofibras en mezclas de altas prestaciones para carpeta de rodamiento como son los microaglomerados y la Stone mastic asphalt (SMA) estaríamos brindando al pavimento un plus de desempeño sobre todo frente a condiciones climáticas extremas. Es debido a esto que en este trabajo se estudió el desempeño de mezclas discontinuas (microaglomerados tipo F y M y SMA) con la incorporación de macrofibras de vidrio y sintéticas. Se analizó principalmente la resistencia a la fisuración por medio de ensayos de fractura por flexión en vigas entalladas a bajas temperaturas (-15 y 5 °C). Además, se estudió el desempeño al ahuellamiento de estas mezclas.

## **2 Experimental**

### **2.1 Materiales**

Este estudio se desarrolló sobre tres diferentes mezclas, dos microaglomerados discontinuos del tipo F-10 y M-10 y una SMA-10. Las mezclas se compusieron con agregados, filler y cal con las características que se detallan en la Tabla 1. Todas las variantes estudiadas aquí se realizaron con un asfalto modificado del tipo AM3 de la norma IRAM 6596 (Penetración 70, punto de ablandamiento 70.8 °C, retorno elástico torsional 76.7%). Esta mezcla fue diseñada de acuerdo con las especificaciones del pliego de Vialidad Nacional 2017 para cada uno de estas mezclas. El objetivo de este trabajo fue observar el potencial de refuerzo con la incorporación de macrofibras en este tipo de mezcla de altas prestaciones en cuanto a su desempeño. Se utilizaron dos tipos de macrofibras (de vidrio y sintéticas). Las características principales de las macrofibras se observan en la Tabla 2. En el caso particular de las mezclas con macrofibras sintéticas se realizaron las mismas con técnicas de mezclas semicalientes. Esto atiende a lograr que este tipo de macrofibras brinden su mayor potencial como ya se ha visto en trabajos anteriores [15].

Tabla 1. Características de las mezcla y agregados estudiados

	M-10	F-10	SMA-10
<b>Agregado</b>	<b>% en mezcla</b>		
Grueso (6-12 mm)	70,5	69,6	75,4
Arena (0-6 mm)	19,1	-	-
Arena (0-3 mm)	-	17,1	10,3
Filler	4,7	7,6	7,5
Cal	1,0	1,0	0,9
Fibras de celulosa			0,4
Asfalto	4,75	4,75	5,75

Tabla 2. Propiedades de las fibras.

Fibra		V	S
Tipo		Vidrio	Sintética
Largo	[mm]	36	55
Densidad	[g/cm <sup>3</sup> ]	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	0,4

Es importante destacar que en este trabajo la SMA de control se diseñó con fibras de celulosa y que en las SMA con la incorporación de macrofibras se reemplazaron las fibras de celulosa por estas. Por lo tanto, se consideró como parte del estudio analizar el escurrimiento de las SMA.

## 2.2 Plan de ensayos

El principal objetivo fue evaluar el potencial de mejora en el desempeño mecánico de mezcla discontinuas de altas prestaciones cuando se les incorporó macrofibras de vidrio o sintéticas. El desempeño de las diferentes mezclas se caracterizó respecto al ahuellamiento y fractura por flexión en vigas entalladas. En el caso de las SMA se evaluó también el escurrimiento en este tipo de mezclas. A continuación, se detallan las metodologías de ensayo.

### 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 Fractura por flexión en vigas entalladas

Este ensayo se utilizó para evaluar el comportamiento a fractura. Se realiza sobre vigas entalladas de 50x75x300 mm, ver Figura 1, que se obtienen por corte a partir de una placa de mezcla asfáltica 300x300x50 mm compactada con compactador de placa EN12697-33. Las vigas son entalladas una profundidad de 15 mm en el centro, esta profundidad asegura una adecuada intensidad de tensiones para iniciar la propagación de fisura, pero es lo suficientemente corta para evitar que la viga se fisure bajo por su propio peso. Las vigas se cargan al centro de una luz de 280 mm midiendo la apertura de fisura (CMOD en inglés) mediante un extensómetro tipo CLIP gage fijo en la cara inferior a ambos lados de la entalla. A partir de un sistema de lazo cerrado el ensayo se realiza bajo control de la apertura de fisura a una velocidad de 1 mm/min. La Figura 1 muestra un esquema de la viga y la disposición de ensayo. Los ensayos de fractura se desarrollaron a 5 y -15 °C para evaluar el desempeño a bajas y muy bajas temperaturas. Para cada variante de mezcla y temperatura se ensayaron al menos tres probetas.

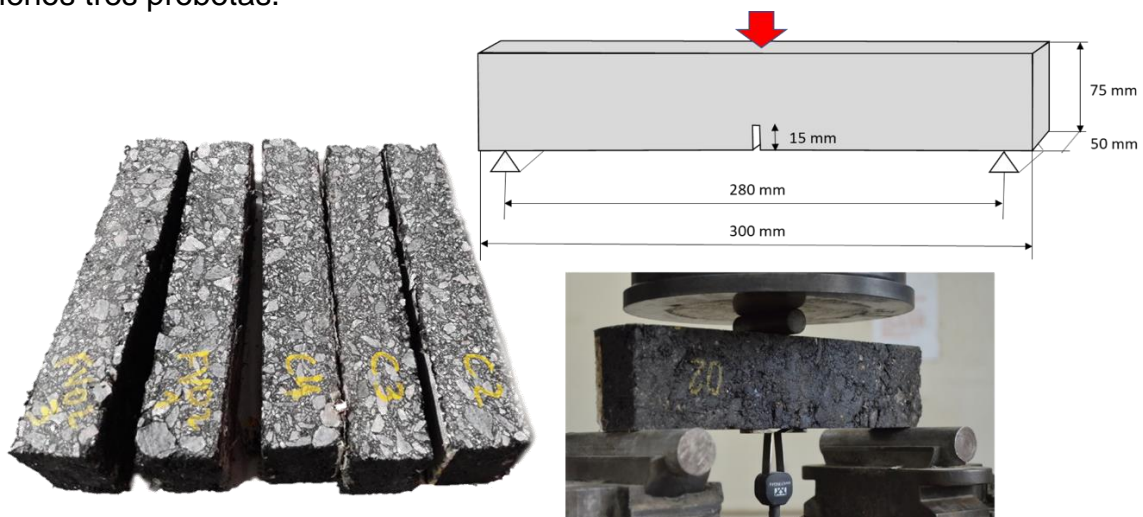


Figura 1. Ensayos de fractura en flexión.

Como resultado del ensayo se obtiene la curva tensión deformación como la que se muestra en la Figura 2. A partir de esta curva se obtienen los parámetros de tensión máxima y tensiones residuales para diferentes aperturas de fisura. Además, se puede calcular la tenacidad a fractura como el área bajo la curva tensión deformación. En

este estudio, se calculó la tenacidad hasta una apertura de fisura de 3 mm, T3, como se observa en la Figura 2.

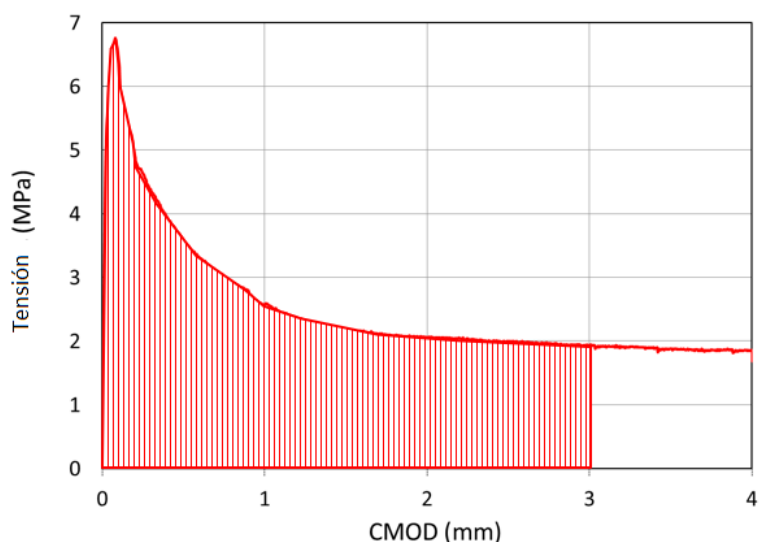


Figura 2. Curva típica del ensayo de fractura por flexión

### 2.2.3 Ensayo de escurrimiento

Este ensayo se utilizó para evaluar el escurrimiento de asfalto de las mezclas SMA tanto con fibras de celulosa (mezcla de control) como con macrofibras de vidrio y sintéticas. Cabe recordar que en las mezclas con macrofibras se reemplazó las fibras de celulosa por estas macrofibras. De allí la importancia de evaluar el escurrimiento. El ensayo se realizó con el método de Schellenberg (UNE-EN 12697-18).

## 3 Resultados

Este trabajo tiene como objetivo estudiar el desempeño de microaglomerados discontinuos y SMA con la incorporación de macrofibras de vidrio y sintéticas. Para observar las potenciales mejoras de la incorporación de las macrofibras se analizó principalmente el desempeño al ahuellamiento y la resistencia a la fisuración. A continuación, se vuelcan los principales resultados.

En la Tabla 3 se volcaron las principales propiedades volumétricas de las diferentes mezclas estudiadas. Se observa que las mezclas con macrofibras presentan valores similares de sus principales propiedades volumétricas a las mezclas de control respectivas. La incorporación de macrofibras no trajo problemas en lograr las densificaciones de las diferentes mezclas. En el caso particular de las SMA se observa que los valores de Vacíos compactados de la mezcla ( $VCA_{mix}$ ) son comparables con lo que se asegura el contacto interparticular que se exige en este tipo de mezclas. En la Tabla 3 también se vuelcan los resultados de escurrimiento obtenidos en las mezclas SMA. Se observa que todas cumplen con los requisitos de escurrimiento del pliego de Vialidad Nacional 2017 (escurrimientos  $e < 0,3 \%$ ). Es importante remarcar que en la SMA con macrofibras de vidrio este escurrimiento fue mucho menor que la mezcla de control (recordando que se reemplazaron las fibras de celulosa por las diferentes macrofibras).

Tabla 3. Principales propiedades volumétricas y de escurrimiento de las mezclas.

Mezcla	Densidad	Vacíos	VAM	VCAmix <sup>2</sup>	e
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[%]	[%]	[%]
<b>M-10</b>					
C	2,121 <sup>1</sup>	16,1	26,1	-	-
FV	2,099 <sup>1</sup>	17,0	26,9	-	-
FS(T)	2,119 <sup>1</sup>	16,2	26,2	-	-
<b>F-10</b>					
C	2,366	5,7	17,0	-	-
FV	2,346	6,5	17,7	-	-
FS(T)	2,338	6,8	17,9	-	-
<b>SMA-10</b>					
C	2,361	4,5	18,1	38,8	0,14
FV	2,336	5,5	19,0	39,4	0,09
FS(T)	2,342	5,3	18,8	39,3	0,19
<sup>1</sup> En las M-10 las densidades se determinaron geoméricamente <sup>2</sup> VCAmix calculado como indica AASTHO MP8 < 42,1 % (Vacíos Varillado AASTHO T19)					

Sobre las diferentes mezclas se realizaron ensayos de ahuellamiento en el Wheel tracking. En la Figura 3 se vuelcan los resultados obtenidos para cada una de las mezclas y sus variantes con macrofibras. Las curvas mostradas corresponden al promedio de dos ensayos realizados sobre cada tipo de mezcla. En primera instancia se observa en las mezclas M-10 (Figura 3a) como la incorporación de las macrofibras genera una mejora del desempeño. Si bien el nivel de ahuellamiento final es similar en todas, la mezcla de control (C) presenta una pendiente de ahuellamiento más importante que las mezclas con macrofibras de vidrio y sintéticas. Esto se ve claramente en la Tabla 4 donde se volcaron los parámetros de WTS y PRD de las diferentes mezclas estudiadas. Las WTS de las mezclas con macrofibras son 30 y 40 % menores que la mezcla M-10 C. En lo que respecta al otro Microaglomerado discontinuo, el F-10, y la SMA-10; los resultados de ahuellamiento de las mezclas con macrofibras son similares a los de sus respectivas mezclas de control. No se observan diferencias significativas en las curvas de ahuellamiento ni en los resultados de WTS y PRD de estas mezclas mencionadas (ver Figuras 3 b y c y Tabla 4). Es claro que en el caso del Microaglomerado M-10, que tiene gran cantidad de vacíos, las macrofibras brindan mayor resistencia estructural al paquete granulométrico (aumento del interlocking de agregados y de la viscosidad de masa del mastico). En el caso de las otras dos mezclas este aporte no es al menos visible.

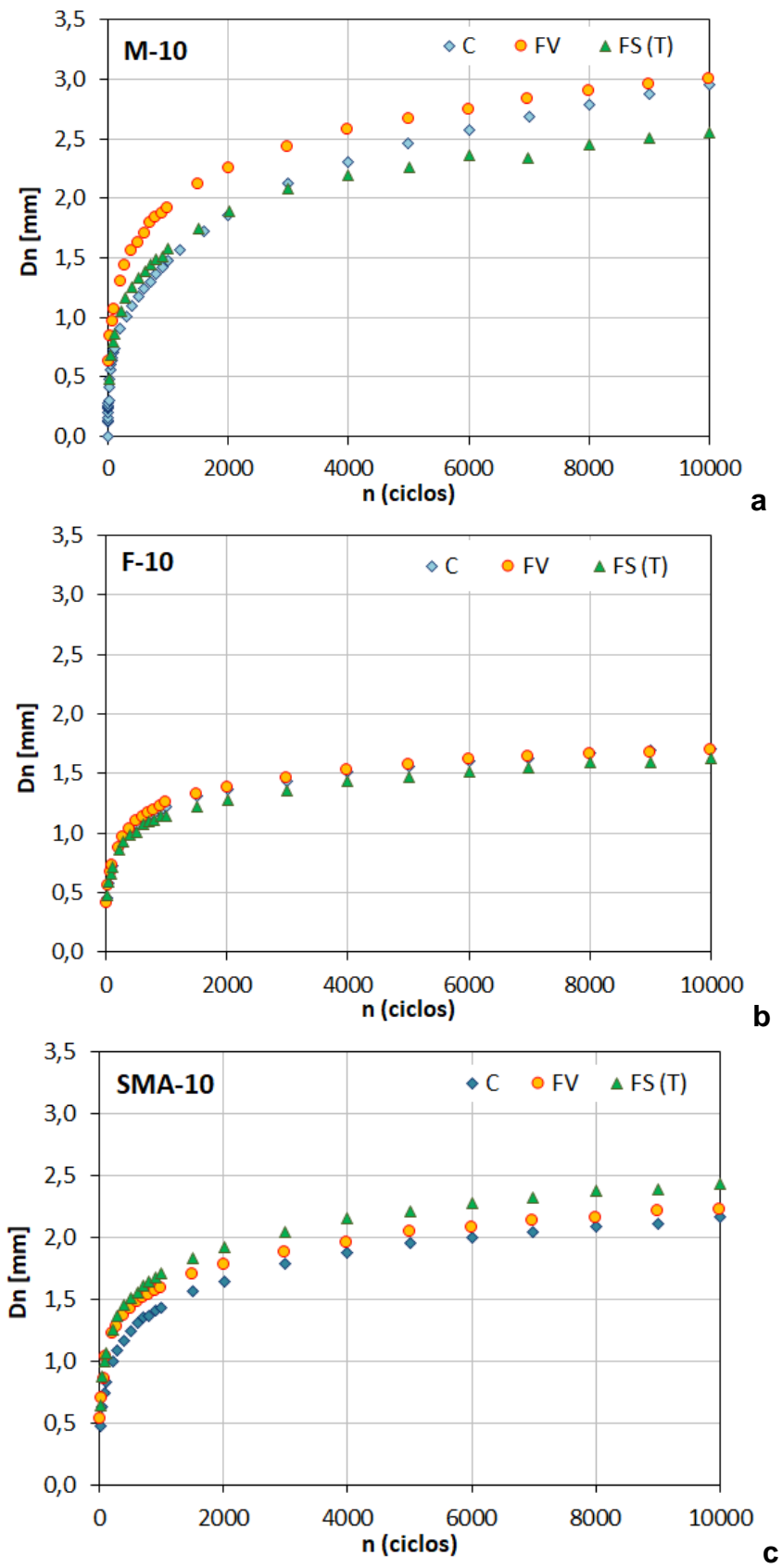


Figura 3. Ensayos de Wheel tracking

Tabla 4. Parámetros calculados de los ensayos de Wheel tracking

	M-10		F-10		SMA 10	
	WTS	PRD	WTS	PRD	WTS	PRD
<b>C</b>	0,099	7,5	0,029	3,4	0,041	4,1
<b>FV</b>	0,067	6,0	0,025	3,3	0,035	4,3
<b>FS (T)</b>	0,057	5,1	0,030	3,2	0,044	4,6

Respecto a la resistencia a la fractura a bajas temperaturas en las figuras 4, 5 y 6 se volcaron los resultados calculados de tenacidad hasta una apertura de fisura de 3 mm (T3) para las dos temperaturas de ensayo, 5 y -15 °C. Además, se muestran la mejora proporcional en la tenacidad de las mezclas con macrofibras respecto a la mezcla de control. En la Figura 4 se observan los resultados para el micro M-10. Es claro que la adición de macrofibras de vidrio (FV) y sintéticas (FS) mejora el comportamiento a fractura de la mezcla. Se observa un aumento de la tenacidad lo que implica una mayor resistencia a la fisuración. La adición de las FV tiene una mejora del orden (20 %) para ambas temperaturas de estudio. Por su parte se ve que las fibras sintéticas (FS) tienen mayor impacto en su mejora a -15 °C. Esto puede asociarse a que aun a esas bajas temperaturas las fibras sintéticas mantienen un comportamiento elástico que ayuda a resistir sin romperse las mayores tensiones de carga y aguantar el crecimiento de la fisuración más tiempo.

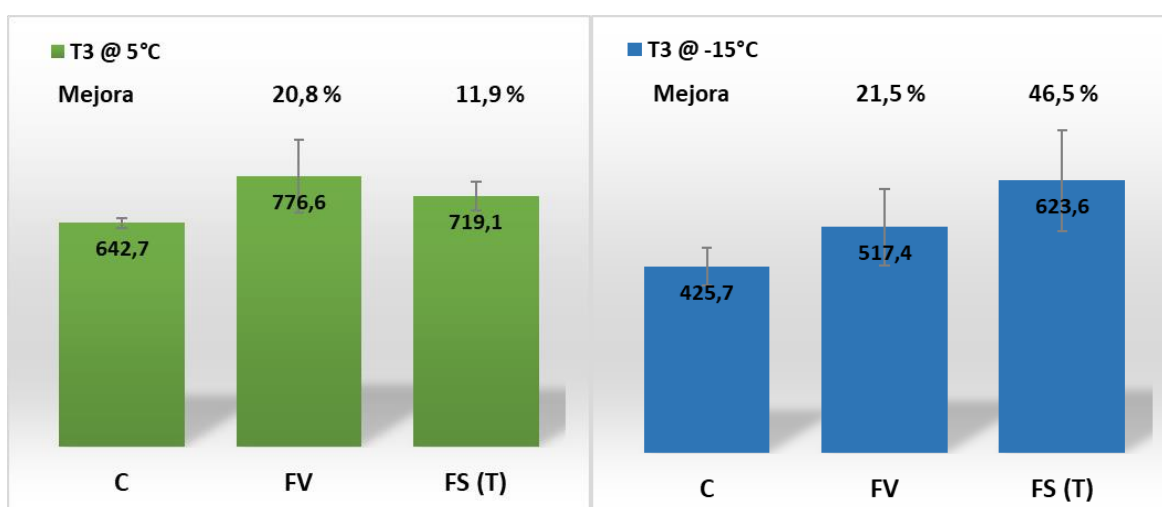


Figura 4. Resultados de tenacidad T3 para las mezclas Microaglomerados M-10

Al igual que en el caso de la M-10, se observa en la Figura 5 como la incorporación de las macrofibras aumenta la resistencia a fractura del micro F-10 con un claro aumento de la tenacidad. Es de destacar la mejora observada en la tenacidad a -15 °C. Al igual que en la mezcla M-10 se observa que a -15 °C las macrofibras sintéticas tienen mayor impacto en la mejora de la tenacidad del micro F-10 que a 5 °C. Es claro que se obtiene una clara e importante aumento en la resistencia a fractura a -15 °C. Sin embargo, no es despreciable la mejora generada por estas macrofibras en este tipo de micros a 5 °C.



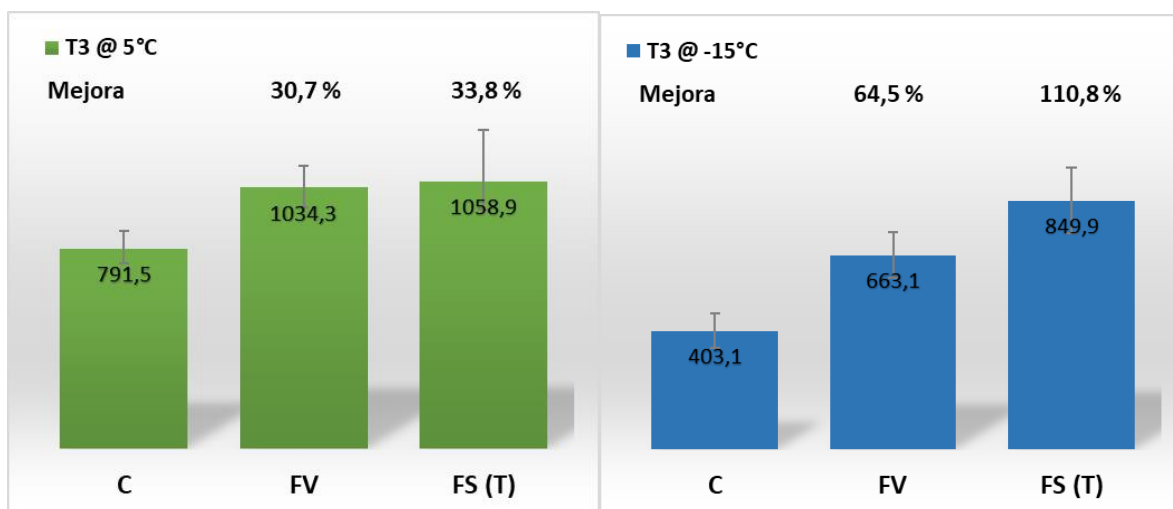


Figura 5. Resultados de tenacidad T3 para las mezclas Microaglomerados F-10

En la figura 6 se observa los resultados de tenacidad obtenidos en el ensayo de fractura de las SMA-10 a ambas temperaturas de estudio. Al igual que en los microaglomerados ambas macrofibras mejoran la resistencia a fractura a las temperaturas estudiadas. Se observa el mismo comportamiento de las fibras sintéticas cuando se pasa de la temperatura de 5 °C a - 15 °C. Resulta interesante en este caso de las SMA que el cambio de las fibras de celulosa por estas macrofibras mejora su resistencia a la fisuración sin modificar el comportamiento al ahuellamiento y el escurrimiento (incluso lo mejora en el caso de las macrofibras de vidrio).

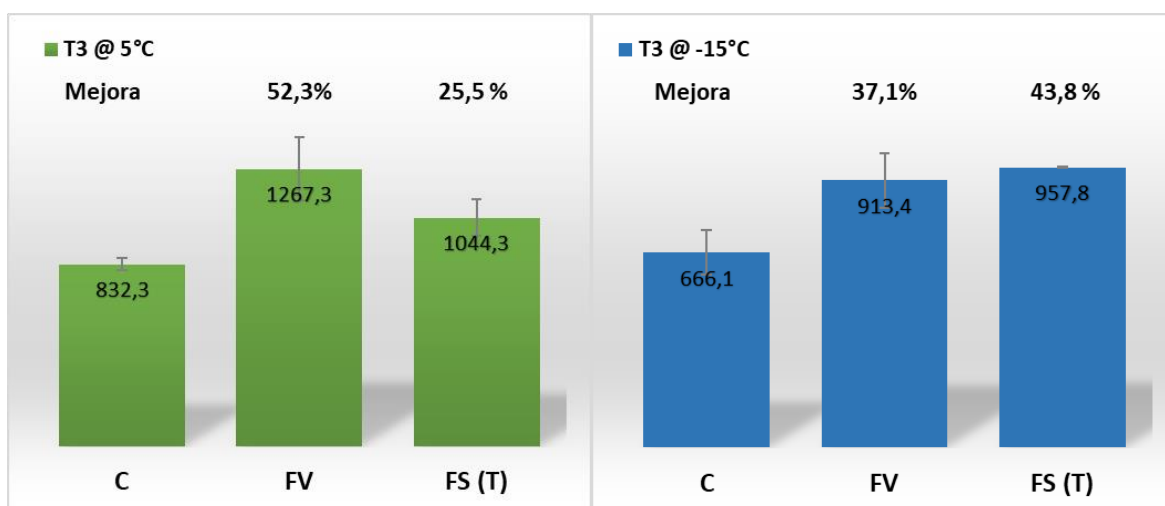


Figura 6. Resultados de tenacidad T3 para las mezclas SMA-10

#### 4 Conclusiones

Este trabajo explora principalmente las posibles mejoras en el comportamiento de la mezcla de altas prestaciones 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

centrándose en la resistencia a fractura por flexión a bajas temperaturas donde las macrofibras podrían jugar un papel fundamental. Las principales conclusiones obtenidas fueron las siguientes.

En carácter general la adición de macrofibras de vidrio y sintéticas mejoró el desempeño a fisuración a bajas temperaturas de los dos microaglomerados estudiados (M-10 y F-10) y la Stone Mastic Asphalt (SMA).

La adición de macrofibras mejoró la resistencia al ahuellamiento y fractura a bajas temperaturas de microaglomerados del tipo M-10. Se disminuyó notablemente las pendientes de ahuellamiento en este tipo de mezcla.

En el Microaglomerado F-10, la adición de macrofibras de vidrio y sintéticas mejoró de manera importante el desempeño a bajas temperaturas, sobre todo las sintéticas a muy bajas temperaturas (-15 °C). La adición de las macrofibras en el micro F-10 mostro resultados similares a la mezcla de control en el comportamiento al ahuellamiento.

En la mezcla SMA, el reemplazo de las fibras de celulosa por macrofibras de vidrio o sintéticas mejoró de manera importante el desempeño a bajas temperaturas. Se obtuvo similar comportamiento al ahuellamiento y bajos niveles de escurrimientos del asfalto. En el caso del reemplazo con macrofibras de vidrio se disminuyó notoriamente el escurrimiento.

## Referencias

- [1] 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.
- [2] Moghadas Nejad F., Azarhoosh A.R. , Hamedí GH.H., Azarhoosh M.J. (2012). Influence of using nanomaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials* 31, 384–388 doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.01.004.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Drüschner L. & Schäfer V. (2000). Stone Mastic Asphalt. German Asphalt Association. pp 37.
- [6] 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.
- [7] Hassan H. & Al-Jabri K. (2005). Effect of organic fibers on open-graded friction course mixture properties. *International Journal of Pavement Engineering*, 6:1, 67-75, doi: 10.1080/10298430500087936.
- [8] 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.
- [9] 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.

- [10] Xiong R., Fang J., Xu A., Guan B. & Liu Z. (2015). Laboratory investigation on the brucite fiber reinforced asphalt binder and asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 83, 44–52. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.089
- [11] Park P., El-Tawil S., Park S. & Naaman A. (2015). Cracking resistance of fiber reinforced asphalt concrete at  $-20^{\circ}\text{C}$ . *Construction and Building Materials*, 81, 47–57. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.005.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Morea F. & Zerbino R. (2018). Improvement of asphalt mixture performance with glass macro-fibers. *Construction and Building Materials*, 164, 113–120. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.198.
- [15] Morea F. & Zerbino R. (2020). Incorporation of synthetic macrofibres in Warm Mix Asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 21-2: 542-556. doi: 10.1080/14680629.2018.1487874.
- [16] Morea F., Sol-Sanchez M., Moreno-Navarro F., Zerbino R. (2020). Fatigue behaviour of macrofiber reinforced gap graded asphalt mixtures. *Materials and Structures*. 10.1617/s11527-020-01511-x.