

## MEZCLAS ASFÁLTICAS ESPECIALES REFORZADAS CON MACROFIBRAS

González Lucia, Morea Francisco, Torrijos María Celeste, Zerbino Raúl.

Unidad de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Civil (UIDIC). Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería UNLP. Calle 115 y 48 La Plata.

[francisco.morea@ing.unlp.edu.ar](mailto:francisco.morea@ing.unlp.edu.ar).

### Introducción

Este trabajo se centra dentro de los proyectos de Investigación y transferencia de la Facultad de Ingeniería de la UNLP. Más precisamente se asocia a los proyectos “Empleo de fibras en mezclas asfálticas y en refuerzo de pavimentos del tipo overlays” (PPID-I011) y al proyecto “Empleo de fibras en hormigones y otros compuestos para construcción y reparación de obras de infraestructura sustentables” (11-I244). Los resultados que se muestran aquí son una parte de un cumulo aun mayor que han permitido la difusión del tema del trabajo tanto en presentaciones en congresos nacionales e internacionales como en publicaciones en revistas indexadas de primer nivel.

La adición de nuevos materiales es comúnmente usada para mejorar el desempeño y durabilidad de mezclas asfálticas [1-3], entre ellas, la adición de fibras [4-11]. Las fibras de celulosa son las más comúnmente utilizadas en mezclas asfálticas SMA y drenantes con el objetivo de permitir la mayor incorporación de ligante asfáltico y evitar escurrimientos de ligante durante el mezclado y compactación de la mezcla [12-13]. No obstante, otros tipos de fibras pueden desarrollar otras funciones como controlar la fisuración y mejorar la tenacidad, resistencia a tracción y capacidad de carga residual. Consecuentemente, mejorar el desempeño y durabilidad de las mezclas asfálticas. El uso de fibras como elemento de refuerzo y mejora del comportamiento es objeto de varias investigaciones e incluso algunos tramos experimentales en pavimentos [14-22]. Sin embargo, dentro de los numerosos trabajos en revistas internacionales todos ellos se refieren a fibras cortas (longitudes < 25mm, menor que el tamaño máximo del agregado). Existen otros tipos de fibras largas o macrofibras que brindan mejoras sustanciales en mezclas densas frente al ahuellamiento y fisuración térmica [23, 24]. 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) [25].

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, un microaglomerado F-10 y una SMA, con la incorporación de macrofibras de vidrio. Se analizó principalmente la resistencia a fatiga a 20 °C y fisuración por medio de ensayos de fractura por flexión en vigas entalladas a bajas temperaturas (-15 y 5 °C). Adicionalmente, se caracterizó el módulo dinámico y el desempeño al ahuellamiento de estas mezclas.

### Experimental

#### Materiales

Este estudio se desarrolló sobre dos diferentes mezclas, un microaglomerado discontinuo del tipo F-10 y una Stone Mastic Asphalt (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%, PG76(v)). Esta mezcla fue diseñada de acuerdo con las especificaciones del pliego de Vialidad Nacional 2017 para cada tipo de estas mezclas. El objetivo de este trabajo fue observar el potencial de refuerzo

con la incorporación de macrofibras de vidrio en este tipo de mezcla de altas prestaciones en cuanto a su desempeño. Las características principales de las macrofibras se observan en la Tabla 2.

Tabla 1. Características de las mezcla y agregados estudiados.

<b>Agregado</b>	<b>F-10</b>	<b>SMA-10</b>
	<b>% en mezcla</b>	
Grueso (6-12 mm)	69,6	68,8
Arena (0-3 mm)	17,1	15,6
Filler	7,6	8,5
Cal	1,0	0,9
Fibras de celulosa		0,47
Asfalto	4,75	5,75

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.

Tabla 2. Propiedades de las fibras.

<b>Fibra</b>	<b>V</b>
Tipo	Vidrio
Largo	[mm] 36
Densidad	[g/cm <sup>3</sup> ] 2,68
Relación de aspecto (L/D)	67
Tensión de tracción	[MPa] 1700
Módulo de elasticidad	[GPa] 72
Punto de fusión	[°C] 860
Descomposición	[°C] -
Dosificación en peso de mezcla	[%] 0,4

#### 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. El desempeño de las diferentes mezclas se caracterizó a fatiga, fisuración a bajas temperaturas, ahuellamiento y modulo dinámico. En el caso de las SMA se evaluó también el escurrimiento en este tipo de mezclas. Para dicha evaluación se utilizaron la siguiente batería de ensayos de caracterización normalmente utilizados en el estudio de mezclas asfálticas:

*Ensayo de Fatiga por flexión en cuatro puntos.* Para la caracterización a fatiga a 20°C y 10 Hz de frecuencia (EN 12697-24) a diferentes niveles de deformación (200 a 500  $\mu$ strains).

*Fractura por flexión en vigas entalladas* para evaluar el comportamiento a fractura sobre vigas entalladas de 50x75x300 mm que se obtienen por corte a partir de una placa de mezcla asfáltica 300x300x50 mm compactada con compactador de placa EN12697-33. Este ensayo es similar al de la norma EN14651-05 para hormigones. El ensayo se puede observar en las referencias [23, 24]. Los ensayos de fractura se desarrollaron a 5 y -15 °C para evaluar el desempeño a bajas y muy bajas temperaturas.

*Modulo Dinámico.* Para tener una idea del comportamiento de las mezclas con y sin macrofibras se determinó las curvas maestras de modulo dinámico a 20 °C [26]. Para la construcción de estas curvas maestras se determinaron los módulos dinámicos por compresión diametral (EN 12697- 26 anexo C) a diferentes temperaturas (10, 20, 30 y 40 °C) y diferentes frecuencias de ensayo (0.5, 1, 2, 4 y 10 Hz).

*Ahuellamiento en ensayo de rueda cargada.* Para la caracterización frente al ahuellamiento se utilizó el ensayo de rueda cargada (EN 12697-22, IRAM 6850).

**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. El ensayo se realizó con el método de Schellenberg (UNE-EN 12697-18).

## Resultados

Este trabajo tenía como objetivo estudiar el desempeño de un Microaglomerado discontinuo y una SMA con la incorporación de macrofibras de vidrio. Para observar las potenciales mejoras de la incorporación de las macrofibras se analizó principalmente el desempeño a fatiga, resistencia a la fisuración, modulo dinámico y al ahuellamiento. A continuación, se vuelcan los principales resultados.

En la Tabla 3 se volcaron las principales propiedades de las diferentes mezclas estudiadas. Se observa que las mezclas con macrofibras presentan valores similares a las mezclas de control respectivas en sus principales propiedades volumétricas y de modulo dinámico. La incorporación de macrofibras no trajo problemas en lograr las densificaciones de las diferentes mezclas. Es importante recordar en la SMA que las fibras de celulosa fueron reemplazadas por macrofibras de vidrio. En primer lugar, como se puede observar en la Tabla 3, el reemplazo del tipo de fibras no afectó los valores de vacíos en el agregado mineral (VMA) y Vacíos compactados de la mezcla ( $VCA_{mix}$ ). Estos resultados son importantes porque aseguran que la SMA con macrofibras mantiene un volumen adecuado entre agregados gruesos y se garantiza el contacto interparticular (uno de los principales objetivos que se buscan en la SMA). El otro aspecto importante por considerar es el escurrimiento. Las fibras de celulosa se agregan por diseño para mantener el mayor contenido de asfalto en las SMA sin que se escurra este durante el proceso de mezclado y colocación. El reemplazo de macrofibras cumplió con los requisitos del pliego de Vialidad Nacional 2017 teniendo valores de escurrimiento inferiores al 0,3%. Se observa en la Tabla 3 como la SMA con macrofibras de vidrio presentó un valor de escurrimiento mucho menor que con las fibras de celulosa. Estos resultados son muy importantes porque demostraron que, además de las posibles mejoras en el rendimiento que brindan las macrofibras, pueden cumplir con los estándares de diseño de las SMA con respecto al escurrimiento.

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

Mezcla	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Vacíos [%]	VAM [%]	VCA <sub>mix</sub> <sup>1</sup> [%]	Vacíos Varillados <sup>2</sup> [%]	E <sub>din</sub> (20 °C – 2Hz) [MPa]	e [%]
<b>F-10</b>							
C	2,366	5,7	17,0	-	-	5874	-
FV	2,346	6,5	17,7	-	-	4868	-
<b>SMA-10</b>							
C	2,361	4,5	18,1	38,8	42.1	3008	0,14
FV	2,336	5,5	19,0	39,4	42.1	2813	0,09

VCA<sub>mix</sub> calculado como indica AASTHO MP8 <sup>2</sup> Vacíos Varillado según AASTHO T19

Sobre las diferentes mezclas se evaluaron los módulos dinámicos a diferentes temperaturas y frecuencias con los que se elaboraron las curvas maestras a la temperatura de referencia de 20 °C. Se observa en la figura 1 que las mezclas de control y sus versiones con macrofibras de vidrio resultan similares. Las macrofibras no representan una diferencia en esta propiedad para este tipo de mezclas discontinuas. Cabe resaltar que el propósito que se espera de estas macrofibras es primordialmente controlar o trabajar en el control de la fisuración. La acción o potencial de acción de las fibras se observa cuando se producen las fisuras. Una vez que se genera una microfisuración las fibras empiezan a actuar como puente de transferencia de cargas entre ambos labios de las fisuras limitando el crecimiento de estas.

Dentro de la evaluación del desempeño de las mezclas se realizaron ensayos de ahuellamiento en el Wheel tracking. En la Tabla 4 se vuelcan los resultados obtenidos en los ensayos de Wheel tracking representados en los parámetros de WTS, D<sub>10000</sub> y PRD para ambas mezclas y sus variantes con macrofibras. En primera instancia se observó como la

incorporación de las macrofibras genera una leve mejora del desempeño. Si bien el nivel de ahuellamiento final ( $D_{10000}$ ) fue similar, la mezcla de control (C) presenta una pendiente de ahuellamiento ligeramente mayor que las mezclas con macrofibras de vidrio. Sin embargo, es de resaltar que estas no son diferencias significativas ya que todos los resultados representan buenos comportamientos para este tipo de mezclas y cumplen los requisitos de los pliegos de Validación Nacional 2017.

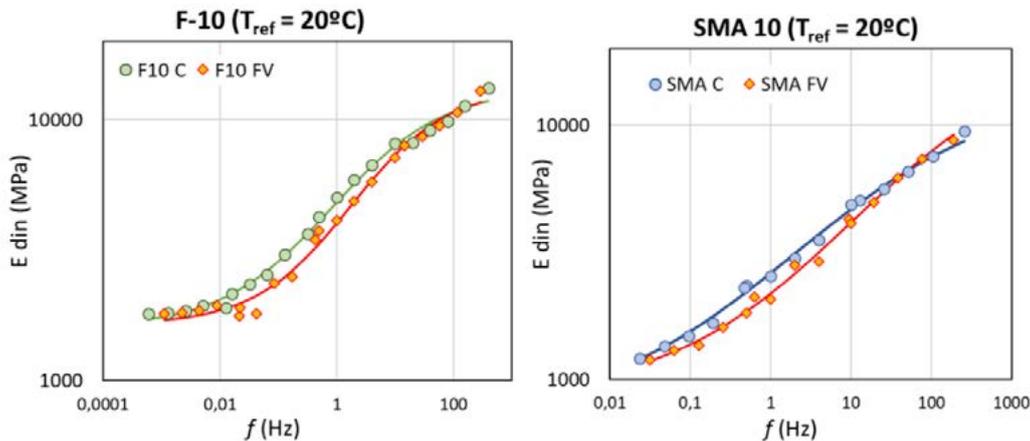


Figura 1. Curvas maestras de Módulo Dinámico.

Tabla 4. Parámetros calculados de los ensayos de Wheel tracking.

	F-10		SMA 10	
	C	FV	C	FV
<b>WTS</b> (mm/10 <sup>3</sup> ciclos)	0,029 ± 0,005	0,025 ± 0,003	0,041 ± 0,007	0,035 ± 0,001
<b>D<sub>10000</sub></b> (mm)	1,71	1,70	2,16	2,22
<b>PRD</b> (%)	3,4 ± 0,3	3,3 ± 0,1	4,1 ± 0,2	4,3 ± 0,1

Respecto a la resistencia a la fractura a bajas temperaturas en la Tabla 5 se volcaron los resultados de resistencia de máxima o de pico ( $f_p$ ) y de tenacidad hasta una apertura de fisura de 3 mm (T3) para las dos temperaturas de ensayo, 5 y -15 °C en los ensayos de fractura por flexión en vigas entalladas. Además, se muestran allí, la mejora proporcional en la tenacidad de las mezclas con macrofibras respecto a la mezcla de control. En primera instancia se observa que las mezclas con macrofibras presenta un incremento en la resistencia de pico ( $f_p$ ) a ambas temperaturas de ensayo. Lo más notable es que la adición de macrofibras de vidrio (FV) mejora el comportamiento a fractura de la mezcla en lo que respecta al aumento de la tenacidad dando una mayor resistencia a la fisuración. En el caso del Microaglomerado F-10, se observa en la tabla 5, que la adición de las FV representa una mejora del orden 30 a 65 % en la tenacidad respecto a la mezcla de control para ambas temperaturas de estudio. En el caso de la mezcla SMA-10, al igual que en el F-10, las macrofibras de vidrio mejoran la resistencia a fractura a las temperaturas estudiadas. Se observa una mejora del orden 52 y 37 % en la tenacidad respecto a la mezcla de control para las temperaturas de 5 y -15°C respectivamente. Vale recordar y resulta interesante en este caso de la SMA el cambio de las fibras de celulosa por estas macrofibras mejora su resistencia a la fisuración e impide el escurrimiento. Las mejoras de tenacidad que muestran las mezclas con macrofibras aportan mayores resistencias a la fisuración a bajas temperatura. Esta mayor resistencia podría derivar en una menor fisuración de la superficie del pavimento y en la reducción del ancho de las fisuras (las fibras cosen las fisuras), aumentando así la durabilidad de las mezclas y alargando la vida útil del pavimento.

Tabla 5. Resultados de Resistencia a fisuración.

		F-10		SMA 10	
		C	FV	C	FV
$f_p$ @ 5°C		3.5 ± 0.2	3.9 ± 0.6	3.2 ± 0.8	4.1 ± 0.4
$f_p$ @ -15°C		7.9 ± 0.5	8.8 ± 0.2	8.3 ± 0.7	9.7 ± 1.3
T3 @ 5°C	(J/m <sup>2</sup> )	791.5 ± 70.4	1034.3 ± 87.2	832.3 ± 26.6	1267.3 ± 145.3
Mejora	(%)	<b>30.7</b>		<b>52.3</b>	
T3 @ -15°C	(J/m <sup>2</sup> )	403.1 ± 58.9	663.1 ± 77.0	666.1 ± 76.9	913.3 ± 93.7
Mejora	(%)	<b>64.5</b>		<b>37.1</b>	

De acuerdo con lo visto las macrofibras presentan un impacto positivo frente a la fisuración. Parte del estudio era observar el impacto que tienen las macrofibras de vidrio en el desempeño a fatiga en estas mezclas de altas prestaciones. En la Figura 2 se vuelcan las leyes de fatiga obtenidas para los microaglomerados F-10 y SMA con y sin macrofibras. En primera instancia, se observa que las mezclas con macrofibras presentan una mejora en la vida a fatiga de ambas mezclas bajo estudio, microaglomerado F-10 y la SMA. En el caso del F-10 se observa que la ley de fatiga de la mezcla con macrofibra se corre paralelamente a la de control aumentando los ciclos a la falla para todos los niveles de deformaciones estudiadas. Por tanto, una mejora en la resistencia a fatiga brindada por las macrofibras.

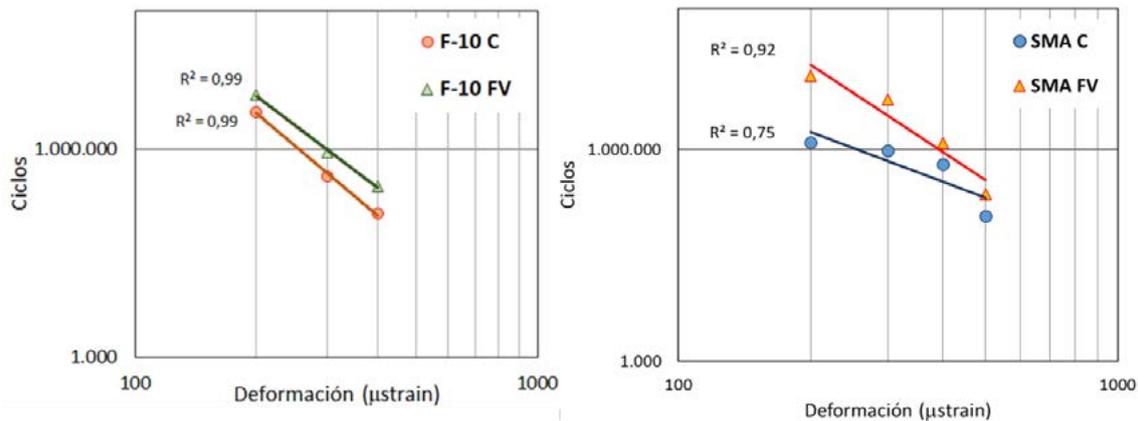


Figura 2. Leyes de Fatiga.

Todo lo observado en estos ensayos, sobre todo a medias y bajas temperaturas, muestra el impacto positivo de la adición de las macrofibras, estas trabajan o empiezan a actuar al inicio de la fisuración o cuando el material se microfisura haciendo la fibra como un puente entre ambos lados de las fisuras, limitando y demorando la apertura o desarrollo de las fisuras. Cabe destacar que de acuerdo con los resultados observados la adición de estas fibras no modifica en gran medida otras propiedades tanto volumétricas como el módulo dinámico. Al respecto se observa en la Tabla 6 los valores de módulo dinámico medidos en el ensayo de fatiga a flexión en cuatro puntos a los 100 ciclos, valor que se toma como parámetro inicial para definir la falla a fatiga en el ensayo. Se observa que las dos versiones de las mezclas estudiadas, con y sin macrofibras, inicialmente presenta un comportamiento similar. Sin embargo una vez que se va desarrollando el deterioro por fatiga de la mezcla, microfisuración, las fibras comienzan a actuar alargando la vida de la mezcla antes de la falla.

Tabla 6. Módulo inicial a los 100 ciclos medidos en el ensayo de fatiga.

		F-10		SMA 10	
		C	FV	C	FV
Módulo <sub>100 ciclos</sub>	(MPa)	2541 ± 153	2459 ± 585	1615 ± 190	1674 ± 338

## 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 fatiga y fisuración a bajas temperaturas del Microaglomerado F-10 y la Stone Mastic Asphalt (SMA).

La SMA con macrofibras resultó con bajos niveles de escurrimiento respecto de la SMA con fibras de celulosa considerando que se reemplazó estas con macrofibras de vidrio.

Las mejoras de tenacidad que muestran las mezclas con macrofibras aportan mayores resistencias a la fisuración a bajas temperatura. Esta mayor resistencia podría derivar en pavimentos de mayor durabilidad.

Respecto a fatiga se observó un corrimiento de las leyes de fatiga hacia mayores ciclos antes de la falla para todo el rango de deformaciones estudiadas en las mezclas con macrofibras respecto a las de control. Por lo tanto, la adición de macrofibras de vidrio mejoró el desempeño a fatiga de las mezclas estudiadas.

## 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. , Hamed 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] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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
- [9] 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.
- [10] 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.

- [11] Ferreira da Costa L., Grangeiro de Barros, A., Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes, L., Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena, A. (2020). Asphalt mixture reinforced with banana fibres. *Road Materials and Pavement Design*. On line. doi: 10.1080/14680629.2020.1713866.
- [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] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Fucheng Guo, Rui Li, Shuhua Lu, Yanqiu Bi, Haiqi He (2020). Evaluation of the Effect of Fiber Type, Length, and Content on Asphalt Properties and Asphalt Mixture Performance. *Materials*, 13(7), 1556; doi: 10.3390/ma13071556.
- [19] Kefei Liu, Teng Li, Chaofan Wu, Kang Jiang, Xianming Shi. (2021). Bamboo fiber has engineering properties and performance suitable as reinforcement for asphalt mixture. *Construction and Building Materials*. Vol 290. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123240.
- [20] Thaworn Takaikaew, Menglim Hoy, Suksun Horpibulsuk, Arul Arulrajah, Alireza Mohammadinia, Jitwadee Horpibulsuk. (2021). Performance improvement of asphalt concretes using fiber reinforcement. *Journal Heliyon*, 7(5). Doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07015.
- [21] Reza Tanzadeh, Javad Tanzadeh, Mehrdad honarmand, Seyed Amid Tahami. (2019). Experimental study on the effect of basalt and glass fibers on behavior of open-graded friction course asphalt modified with nano-silica. *Construction and Building Materials*, 212: 467-475. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.010.
- [22] Tam Minh Phan, Son Ngoc Nguyen, Chang-Bae Seo, Dae-Wook Park. (2021). Effect of treated fibers on performance of asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 274. On line. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122051.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.y
- [26] Cauhapé Casaux, M. Angelone, S., & Martínez, F. (2017). Evaluación del comportamiento viscoelástico de mezclas asfálticas mediante modelos mecánicos (Evaluation of the viscoelastic behavior of asphalt mixtures by mechanical models). *Proceedings of the XIXº Congreso Ibero Americano del Asfalto*, Medellín, Colombia.