

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON LA INCORPORACIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS DE ARAMIDA Y POLIPROPILENO.

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF ASPHALT MIXTURES WITH INCORPORATION OF ARAMID AND POLYPROPYLENE SYNTHETIC FIBERS.

Fecha de envío: 19 de junio de 2018

Fecha de aprobación: 17 de agosto de 2018

Ing. Luis Mardones Parra
Universidad de La Frontera.
Temuco. Chile. luis.mardones.p@ufrontera.cl

Dra. Alejandra Calabi Floody
Universidad de La Frontera.
Temuco. Chile. alejandra.calabi@ufrontera.cl

Dra. Elsa Sánchez Alonso
Universidad de La Frontera.
Temuco. Chile. elsa.sanchez@ufrontera.cl

Dr. Gonzalo Valdés Vidal.
Universidad de La Frontera.
Temuco. Chile. gonzalo.valdes@ufrontera.cl

RESUMEN

Las carreteras están expuestas a agentes externos, como la lluvia, radiación solar, el aumento del flujo vehicular, entre otras, que contribuyen a generar deterioros en los pavimentos asfálticos. Esto hace necesaria la búsqueda nuevas tecnologías capaces de dar solución a estas condiciones externas. En la actualidad, la utilización de asfaltos modificados con polímeros es una de las alternativas más utilizadas, puesto que le otorga una mayor durabilidad a la estructura de pavimento. Sin embargo, la literatura indica que existen otras técnicas lo suficientemente competitivas que permiten la obtención de buenos resultados, como el uso de fibras sintéticas. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo principal evaluar la influencia de la incorporación de fibras sintéticas de aramida y polipropileno en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. Para ello, se realizó un diseño de una mezcla IV-A-12 (comúnmente utilizada en Chile) con un ligante tipo CA-2 (de acuerdo a las especificaciones chilenas) con incorporación de diferentes porcentajes de fibras. Las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas modificadas fueron comparadas con una mezcla de referencia. A través de una fase experimental realizada, se evaluaron las propiedades de fisuración térmica, daño por humedad y el comportamiento frente a las deformaciones permanentes. Los resultados muestran que la adición de las fibras sintéticas de aramida y polipropileno reducen el daño por humedad y el ahuellamiento, mejorando también la respuesta frente a la fisuración térmica.

Palabras claves: Mezclas Asfálticas, Fibras sintéticas, fibras de aramida, fibras de polipropileno.

ABSTRACT

Roads are exposed to external conditions such as rain, solar radiation and the increase of vehicular flow, among others; which generates distresses on asphalt pavements. It is necessary to research new technologies being able to improve the behavior of pavements against external conditions. Currently, the use of polymer modified asphalts is one of the most used alternatives, because they provide a greater durability to the pavement structure. However, literature review has shown that there are other competitive techniques to obtain good results, such as the use of synthetic fibers. Therefore, the main objective of this research is to evaluate the influence of the addition of aramid and polypropylene synthetic fibers in the mechanical properties of asphalt mixtures. For this purpose, a IV-A-12 asphalt mixture (mainly used in Chile) with a CA-24 asphalt binder (according to Chilean specifications) were manufactured, incorporating different percentages of synthetic fibers. The mechanical properties of the modified asphalt mixtures were compared with a reference hot asphalt mixture. Through the experimental phase, thermal cracking, moisture damage and rutting properties were evaluated. The results have shown that the use of aramid and polypropylene fibers in asphalt mixtures reduced the moisture damage and rutting, nevertheless the thermal cracking was improved.

Key words: Asphalt mixture, Synthetic fiber, Aramid fiber, Polypropylene fiber.

INTRODUCCIÓN

Los pavimentos permanentemente son expuestos a las cargas del tránsito y a los agentes ambientales, lo que genera un progresivo deterioro, teniendo como resultado la disminución de los estándares de confort y calidad, y un aumento en los costos de mantención y conservación. La solución a este problema, radica en la utilización de metodologías constructivas llamativas desde el punto de vista técnico, con el potencial de combatir los agentes que disminuyen la capacidad estructural de los pavimentos.

La mejora en las propiedades mecánicas en los pavimentos se consigue con la incorporación de agentes modificadores que al interactuar en la mezcla asfáltica, proporcionan un aumento en el desempeño mecánico de éstas (Abtahi, Sheikhzadeh, & Hejazi, 2010). Dentro de los distintos modificadores de mezclas se encuentran los aditivos, ceras, polímeros, aceites, entre otros, destacándose los polímeros sobre los demás por ser uno de los más comercializados y por proveer un considerable aumento del desempeño mecánico de las mezclas (Al-Hadidy & Yi-qiu, 2009; Haddadi, Ghorbel, & Laradi, 2008). Sin embargo, los avances tecnológicos y la disminución de recursos han obligado a optar por materiales más innovadores, con buenas prestaciones mecánicas y con buena afinidad con las mezclas asfálticas, como lo es el uso de fibras sintéticas y/o naturales las cuales han demostrado tener la capacidad de proveer de una mayor durabilidad a los pavimentos. (Abiola, Kupolati, Sadiku, & Ndambuki, 2014; Abtahi et al., 2010).

La literatura muestra que existen distintos tipos de fibras, las cuales proveen de características positivas a las mezclas asfálticas. Abtahi et al. (2010) al realizar una revisión sobre el uso de fibras de polipropileno, poliéster, amianto, celulosa, carbón, vidrio y nailon en mezclas asfálticas, mencionaron que cambia la viscoelasticidad de las mezclas (Huang & White, 1996), aumentan los módulos dinámicos (Wu, Ye, Li, & Yue, 2007), disminuye la susceptibilidad al agua, mejorando el comportamiento frente a las deformaciones permanentes y aumentando la resistencia a la fisuración térmica (ciclos de hielo-deshielo) (Abtahi et al., 2010). También se ha utilizado fibra de vidrio por vía seca, la cual provee de una mejor capacidad frente a los esfuerzos de tensión

cortante (cizalle) gracias al efecto de puente generado por las fibras a lo largo del plano de falla y un aumento de hasta un 50% en su %ITSR (Yoo & Kim, 2015). Ahmad & Kareem (2015) estudiaron la incorporación de fibras de polipropileno y concluyeron que estas son capaces de mejorar la vida a la fatiga de las mezclas (Ahmad & Kareem, 2015), pudiendo ser explicado por (Kutay, M. E., Gibson, N., & Youtcheff, 2008; Yoo & Kim, 2015), quienes mencionan que las fibras actúan como un puente entre microgrietas generadas por las repeticiones de cargas, absorbiendo y transmitiendo las tensiones, limitando su propagación y crecimiento (Kutay, M. E., Gibson, N., & Youtcheff, 2008; Yoo & Kim, 2015), otorgándole una mayor flexibilidad a la mezcla (Wu et al., 2007). A su vez, se ha estudiado la incorporación fibras sintéticas como la aramida, la que gracias a su alta rigidez es utilizada para mejorar la resistencia mecánica de mezclas asfálticas (Abiola et al., 2014). Este tipo de fibras también es utilizada en combinación con otras fibras cuyo punto de fusión es similar a las temperaturas de fabricación de las mezclas asfálticas, como lo son las fibras de poliolefina y polipropileno, donde es posible mejorar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas (Aliha, Razmi, & Mansourian, 2017; Kaloush, Zeiada, Biligiri, Rodezno, & Reed, 2010).

Dentro de las ventajas que tiene la incorporación de fibras en el ligante asfáltico, (Wu, Ye, & Li, 2008) en su investigación menciona que con el aumento del porcentaje de fibras de poliéster es posible aumentar la viscosidad del ligante asfáltico (Wu et al., 2008), mientras que (Afonso, Dinis-Almeida, & Fael, 2017) concluye que el aumento de fibras de celulosa requiere aumentar el contenido de ligante asfáltico en la mezcla, el cual se retiene en las fibras y permite un mejor recubrimiento de los áridos, sin afectar el comportamiento frente a las deformaciones permanentes (Afonso et al., 2017)

En otros campos de investigación se ha logrado conseguir mejorar las propiedades de autoreparación en la matriz árido-ligante con la adición de fibras metálicas, capaces de reparar grietas de hasta 0.639mm (Pamulapati, Elseifi, Cooper, Mohammad, & Elbagalati, 2017; Yang, Kim, & Yoo, 2016).

La respuesta mecánica de las mezclas con adición de fibras está directamente relacionada con la dosificación establecida en la fase de diseño ya que así es posible optimizar el refuerzo de las fibras y conseguir aumento en la rigidez de la mezcla (Chen, Xu, Chen, & Zhang, 2009; Reyes, O., Camacho, J. & Mejia, 2017). Generalmente la incorporación de fibras en la mezcla reduce las densidades y aumentan los huecos, debido a que las fibras absorben el ligante asfáltico (Chen et al., 2009), por lo mismo, es que una de las formas de evitar este fenómeno, es aumentar las temperaturas de fabricación y el grado de compactación (Xu, Chen, & Prozzi, 2010).

Los métodos de incorporación de las fibras son a través de la vía seca y húmeda. La literatura demuestra que la vía seca permite una mejor distribución de la fibra sobre la mezcla, ya que esta técnica de incorporación es más sencilla y se minimiza considerablemente la aglutinación de la fibra en la mezcla con respecto a la incorporación en húmedo (Abtahi et al., 2010).

En numerosas investigaciones se han utilizado diferentes tipos, tamaños y proporciones de fibras para mejorar el rendimiento de los materiales asfálticos. Rápidamente las ventajas que generan la aportación de fibras sobre el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas está siendo reconocida y está siendo considerada como un buen agente modificador, siendo contemplada como una solución dentro procedimientos estandarizados como es el caso de EE.UU, donde la Asociación de Pavimentos Flexibles de Ohio desarrolló una especificación estándar para el uso

fibra de polipropileno para la construcción de pavimentos de alto desempeño (ITEM 400 HS., 1998).

OBJETIVOS

En base a lo anteriormente mencionado, el objetivo de esta investigación es evaluar el desempeño mecánico de mezclas asfálticas con adición de fibras sintéticas de polipropileno y aramida por vía seca.

METODOLOGÍA

Se realizó el diseño de una mezcla con el uso de una granulometría semidensa IV-A-12 (comúnmente utilizada en Chile para capas de rodadura), cumpliendo con los estándares exigidos de acuerdo a la normativa chilena, Tabla 1. Se utilizó un ligante tipo CA-24 (especificación chilena) y áridos de origen fluvial. Por otra parte, se utilizó una combinación de las fibras sintéticas de aramida y polipropileno en una relación 1:7 en peso respectivamente (Figura 1), cuya caracterización fue desarrollada por (Mello, Kaloush, & Biligiri, 2008), resumidas en la TABLA 2. Para la fabricación de las mezclas reforzadas con fibras, se consideró una incorporación de un 0.05% de fibra en relación al peso de la mezcla, además hubo un procedimiento de dispersión de las fibras de aramida la cual fue incorporada en tres proporciones iguales sobre los áridos, mientras que las fibras de polipropileno fueron incorporadas directamente sobre la mezcla una vez incorporado el ligante asfáltico. El contenido óptimo de ligante asfáltico fue de un 5.2% sobre el peso de los áridos, considerándose la misma dosificación para la mezcla patrón como para la mezcla con fibras. Adicionalmente, en la fase de fabricación se realizó un proceso de acondicionamiento de la mezcla (AASHTO R30), que simula el envejecimiento a corto plazo y la absorción del ligante que se produce durante la fase de precompactación del proceso de construcción.

Tabla 1 Diseño mezcla patrón. Cumplimiento de los criterios del diseño Marshall.

Parámetro	Unidad	Valor	Especificación
Compactación	Golpes	75 golpes por cara	75 golpes por cara
Estabilidad	N	14,040	Min. 9,000
Fluencia	0.25mm	9.3	Min. 8 y Max. 16
Huecos en la mezcla	%	4.8	Min. 4 y Max.
VAM	%	15.4	Min. 15
Densidad	Kg/m ³	2,360	-



(a)

(b)

Figura 1 Fibras sintéticas. (a) Fibras de aramida. (b) Fibras de polipropileno.

TABLA 2 Caracterización fibras sintéticas. Fuente: Kaloush (2008)

Fibras	Aramida	Polipropileno
Forma	Monofilamentos	Fibrilida retorcida
Peso Especifico	1.45	0.91
Resistencia a la Tracción (MPa)	3,000	483
Largo (mm)	Max. 38.1	19.05
Color	Amarillo	Canela
Resistencia Acido / Alcalino	Inerte	Inerte
Temperatura de Descomposición °C	>450	157

La mezcla patrón junto a la mezcla con fibras fueron sometidas a distintos ensayos que permiten evaluar sus propiedades mecánicas de desempeño frente a la resistencia a la fisuración, daño por humedad y deformaciones plásticas, también se obtuvieron propiedades volumétricas y de módulo de rigidez (UNE-12697-26).

Módulo de rigidez

La metodología utilizada para evaluar la rigidez de las mezclas, es la especificada en la norma española UNE-12697-26. Anexo C. Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY). Esta consiste en la aplicación de impulsos de carga repetidos que se alternan con tiempos de reposo a lo largo del plano diametral de la probeta. Se realiza el registro de la deformación diametral horizontal de la probeta durante la aplicación de cada impulso de carga. Las temperaturas evaluadas fueron 15°C, 20°C y 25°C, con una precisión de $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

Ensayo Fénix

El método FENIX permite evaluar la resistencia a la fisuración a través de la aplicación de un esfuerzo a tracción directa a la mitad de una probeta cilíndrica. El procedimiento de compactación de las probetas sigue la metodología establecida por la norma UNE-EN 12697-31. La probeta de 100 mm fabricada mediante compactador giratorio, se secciona por la mitad y se le realiza una entalla de 5 (mm) a lo largo de su plano diametral y así poder inducir el plano de fallo. Posteriormente, mediante un pegamento epóxico, se fijan unas placas de acero sobre las caras planas separadas por la entalladura. Una vez fijadas las placas, se procede a fijar a los soportes de la prensa, lo cual permite un movimiento de rotación respecto de las fijaciones. Finalmente, se somete probetas semicirculares a un esfuerzo de tracción directa a una velocidad de desplazamiento constante de 1 mm/min hasta llegar a la rotura de la probeta (Valdés et al., 2013). Las temperaturas evaluadas fueron -10°C, 0 °C y 10°C, con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$.

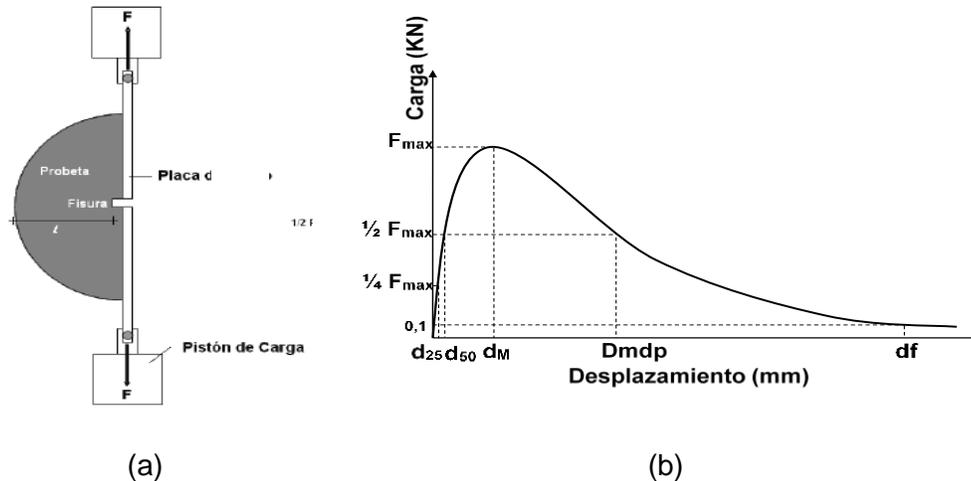


Figura 2 Ensayo FENIX. (a) Montaje ensayo Fénix, (b) Gráfica carga- desplazamiento. Fuente: (Valdés et al., 2009)

Del procedimiento de ensayo se puede obtener una curva en función de los datos adquiridos de carga aplicada y su desplazamiento, Figura 2. De esta curva se obtienen los parámetros involucrados en el proceso de fisuración: Carga máxima de tracción, índice de rigidez a la tracción, desplazamiento 50% F_{max} postpico, energía disipada e índice de tenacidad

Carga máxima de tracción (F_{max}): Es el mayor valor alcanzado por la probeta ante los esfuerzos de tracción que es sometida.

Índice de Rigidez a Tracción (I_{RT}): Establece un indicador del grado de rigidez del material, mostrando que tan flexible o rígida es la mezcla asfáltica evaluada.

Desplazamiento 50% F_{max} postpico (Δ_{mdp}): Es el desplazamiento registrado una vez que la carga ha caído a la mitad del valor de la carga. Este parámetro permite indicar la capacidad de la mezcla para admitir deformaciones.

Energía disipada en el proceso de Fisuración (G_D): Trabajo realizado en el proceso de fisuración dividido en el área de fractura. Es la representación de la fuerza de adhesión de los materiales de la mezcla asfáltica.

Índice de Tenacidad (I_T): Es la tenacidad de la mezcla asfáltica, que es la capacidad de mantener unidos los materiales que constituyen la mezcla una vez que se ha iniciado el fallo de fisuración.

Ensayo de Sensibilidad al Agua

Este ensayo busca determinar el efecto que produce el agua en la resistencia de la mezcla asfáltica, sometiendo las probetas a un efecto de saturación en agua a temperatura media de 40°C. Para este procedimiento se fabrican probetas mediante el compactador Marshall, las cuales se separan en dos grupos iguales, un grupo es acondicionado a temperatura ambiente (20°C) entre 68 y 72 horas, y el otro grupo se somete a un proceso de saturación y luego se acondiciona en un baño de agua a temperatura controlada de 40°C por el mismo periodo de tiempo que el grupo seco. Una vez terminado este periodo se dejan acondicionando juntas a 20°C, por mínimo de 2 horas antes de realizar el ensayo de tracción indirecta. La velocidad de desplazamiento del axial que ejerce la carga es de 50mm/min (UNE EN 12697:12).

Hamburg Wheel Tracking

Este ensayo busca medir el grado de deformación permanente, el daño por humedad y el deterioro al que se ve expuesta una mezcla al ser sometida a una serie de ciclos de pasadas de una rueda cargada dentro de un recipiente lleno de agua, que mantiene la temperatura del sistema que oscila entre los 25 °C y 70 °C, siendo 50 °C la temperatura mayormente utilizada. Los resultados obtenidos expresan el grado de ahuellamiento que presentan los tipos de mezclas y la presencia de stripping en ellas (AASHTO T324-14). Debido a la falta de normativas en Chile, el cumplimiento de las deformaciones plásticas se verifica mediante las especificaciones de los Departamentos de Transporte de los Estados de Texas y Colorado de EEUU.

Las probetas usadas en este ensayo tienen 150 [mm] de diámetro y son compactadas mediante el compactador giratorio hasta alcanzar un porcentaje de huecos de un $7 \pm 1\%$. Para estas pruebas experimentales se estableció un periodo de acondicionamiento de 30 minutos a 50°C, posteriormente se aplica una carga en movimiento de 705 ± 4.5 [N] con una duración de 10000 ciclos.

Adicionalmente, se determinó la pendiente de ahuellamiento entre los ciclos 5.000 y 10.000 en función de la profundidad de la huella, ecuación 1.

$$WTS_{Agua} = \frac{H_{10.000} - H_{5.000}}{5} \quad (1)$$

donde

WTS_{Agua} = Pendiente de ahuellamiento (mm/10³ ciclos)

H= Profundidad de la huella.

RESULTADOS

Densidad y Módulo de Rigidez

Con respecto a la densidad, es posible observar que las probetas fabricadas con incorporación de fibras sintéticas no presentan grandes diferencias con respecto a la mezcla patrón, ya que no se ve reflejado una variación superior al 1%, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Este comportamiento se manifiesta independientemente del tipo y nivel de compactación utilizado en el proceso de fabricación.

Al analizar los valores de módulo de rigidez entre 15 °C y 25 °C, es posible observar que las mezclas reforzadas con fibras presentan en promedio valores de módulo de rigidez un 13% inferior que las mezcla patrón, cumpliendo todas mezclas con el 97% de la densidad Marshall exigido en las especificaciones de construcción, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Estos resultados no concuerdan con lo determinado en otra investigación en que se evaluó el módulo de rigidez en otro rango de temperaturas (4,4°C, 37,7°C y 54.4°C). Esta investigación indica que las fibras de aramida poseen un coeficiente de dilatación térmica negativo, lo que genera una mayor contracción con el aumento de la temperatura, mejorando el refuerzo en la mezcla, aumentando su módulo de rigidez (Kaloush, Biligiri, Zeiada, Rodezno, & Reed, 2010).

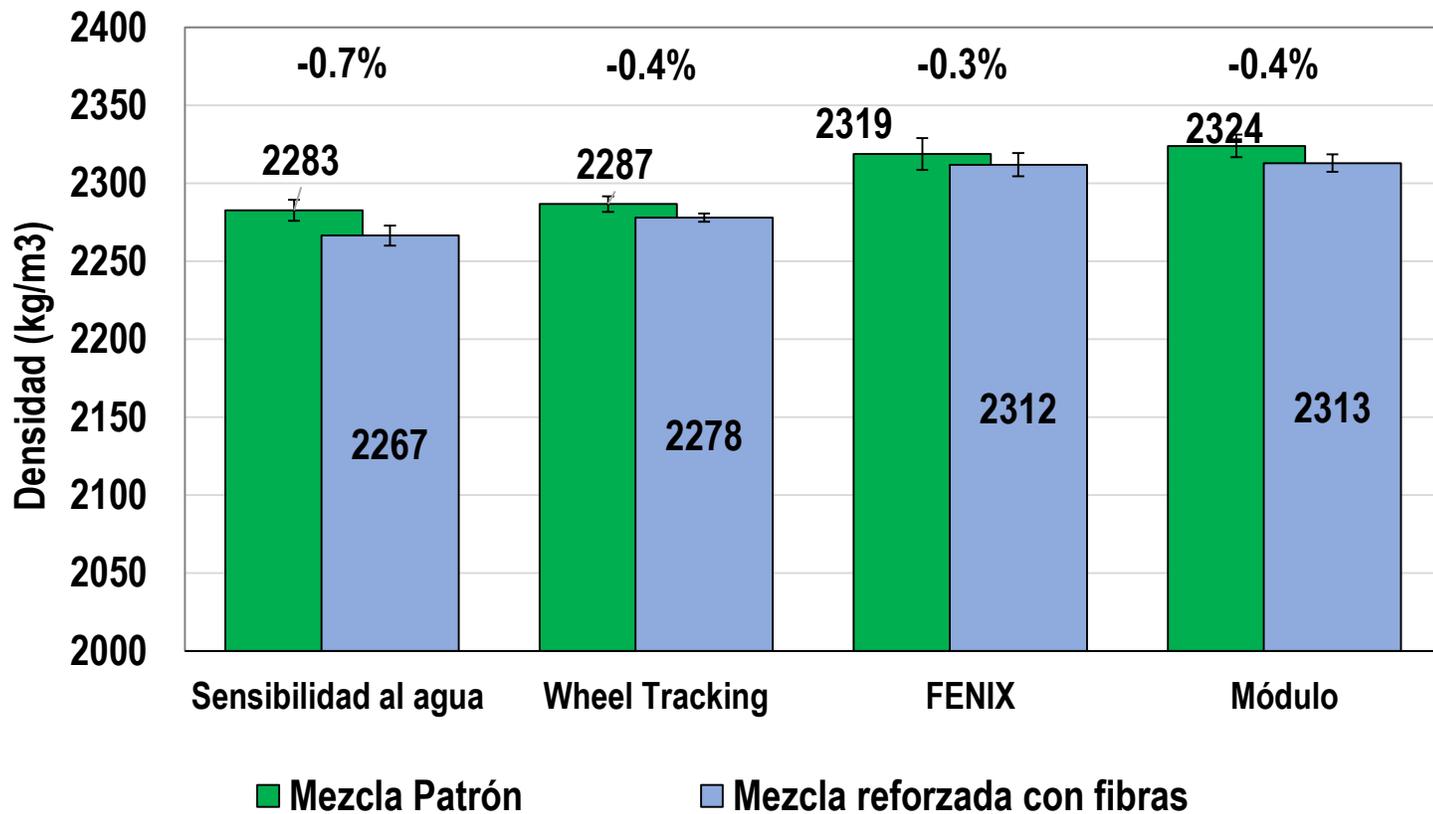


Figura 3 Comparación de las densidades de las mezclas evaluadas

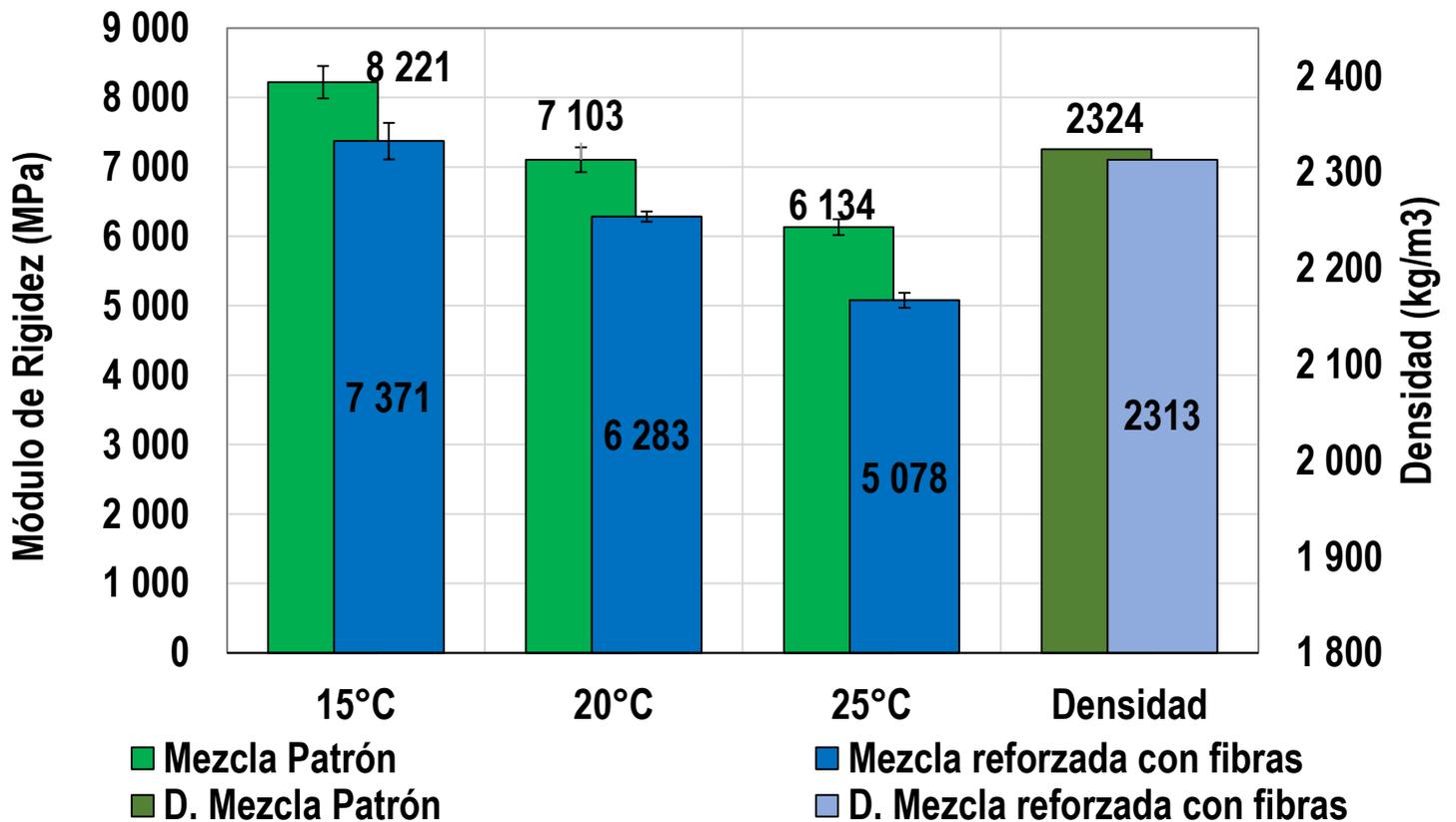


Figura 4 Módulos de Rigidez de las mezclas evaluadas a la temperatura de 15°C, 20°C y 25°C vs densidad según compactación Marshall.

Resistencia a la Fisuración.

La adición de fibras sintéticas de polipropileno y aramida tienen una gran incidencia en el comportamiento frente a la fisuración térmica (Figura 5). Se observó que estas mezclas modificadas presentaron una mayor resistencia a tracción (Fmax) a la temperatura de -10°C, mejorando entorno al 13% respecto a una mezcla patrón. A la temperatura de 0°C la mezcla modificada presentó un comportamiento similar respecto a la mezcla de referencia y a los 10°C se registró una disminución entorno a un 14% en el Fmax.

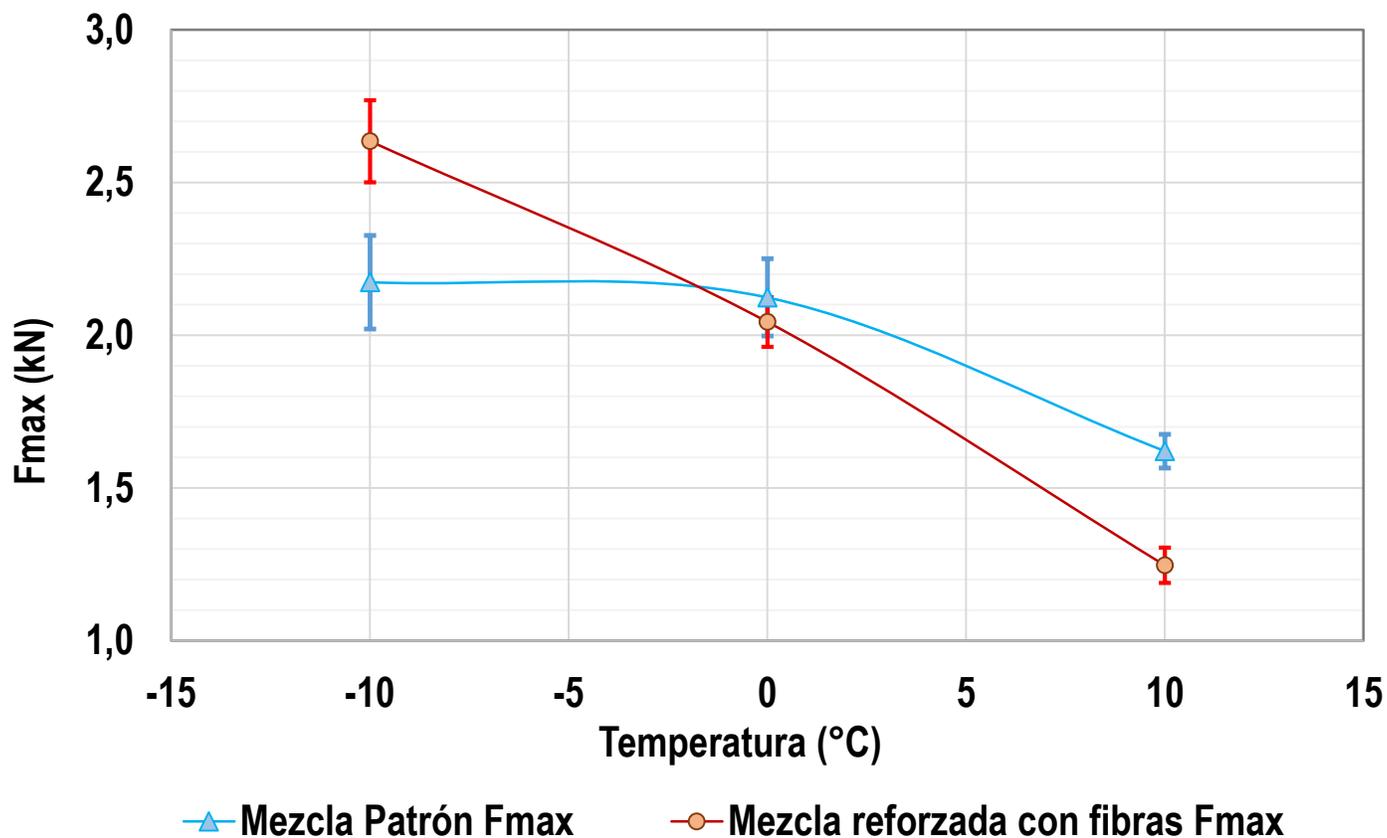


Figura 5 Resistencia a la fisuración vs temperatura

También se observó que la mezcla con fibras presentó un comportamiento más flexible a la mayor temperatura evaluada, registrando una mayor capacidad de deformación (Δ_{mdp}) respecto a la mezcla patrón. A las temperaturas de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ no se perciben diferencias significativas, ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. A su vez, es posible percibir que a la temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ la mezcla con incorporación de fibras registra un valor promedio de IRT igual a $8,15\text{ KN/mm}$, muy similar al de la mezcla patrón con un valor promedio de $8,23\text{ KN/mm}$. A la temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ la mezcla reforzada con fibras presenta una mayor rigidez a tracción. Sin embargo, a esta temperatura se observa una mayor dispersión estadística. En cuanto a la rigidez a la temperatura de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ se puede observar un comportamiento similar al de la mezcla patrón, no obstante, existe un aumento de casi un 41% de su capacidad de flexión.

En la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se puede observar que tanto el parámetro de energía disipada como el de índice de tenacidad aumentan con el incremento de la temperatura. Cabe señalar que la mezcla con la incorporación de fibras sintéticas en todo el rango de temperatura evaluado presenta una mayor tenacidad respecto a la mezcla patrón (dado por el mayor valor promedio de GD), no obstante, se destaca un incremento considerable entre los $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. También se observó que la mezcla con fibras permite disipar una mayor cantidad de energía en el proceso de fisuración, describiendo un aumento casi lineal en todo el rango evaluado, mientras que la mezcla de referencia no presenta un aumento de GD tan significado comparado con la mezcla reforzada con fibras. Estos resultados son comparables con el trabajo de (Kaloush, Zeiada, et al., 2010), quien observó un aumento entre el 50 y 75% de la energía de

fractura al utilizar fibras sintéticas de iguales características, asegurando que con el aumento de la energía de fractura existe una menor fisuración térmica.

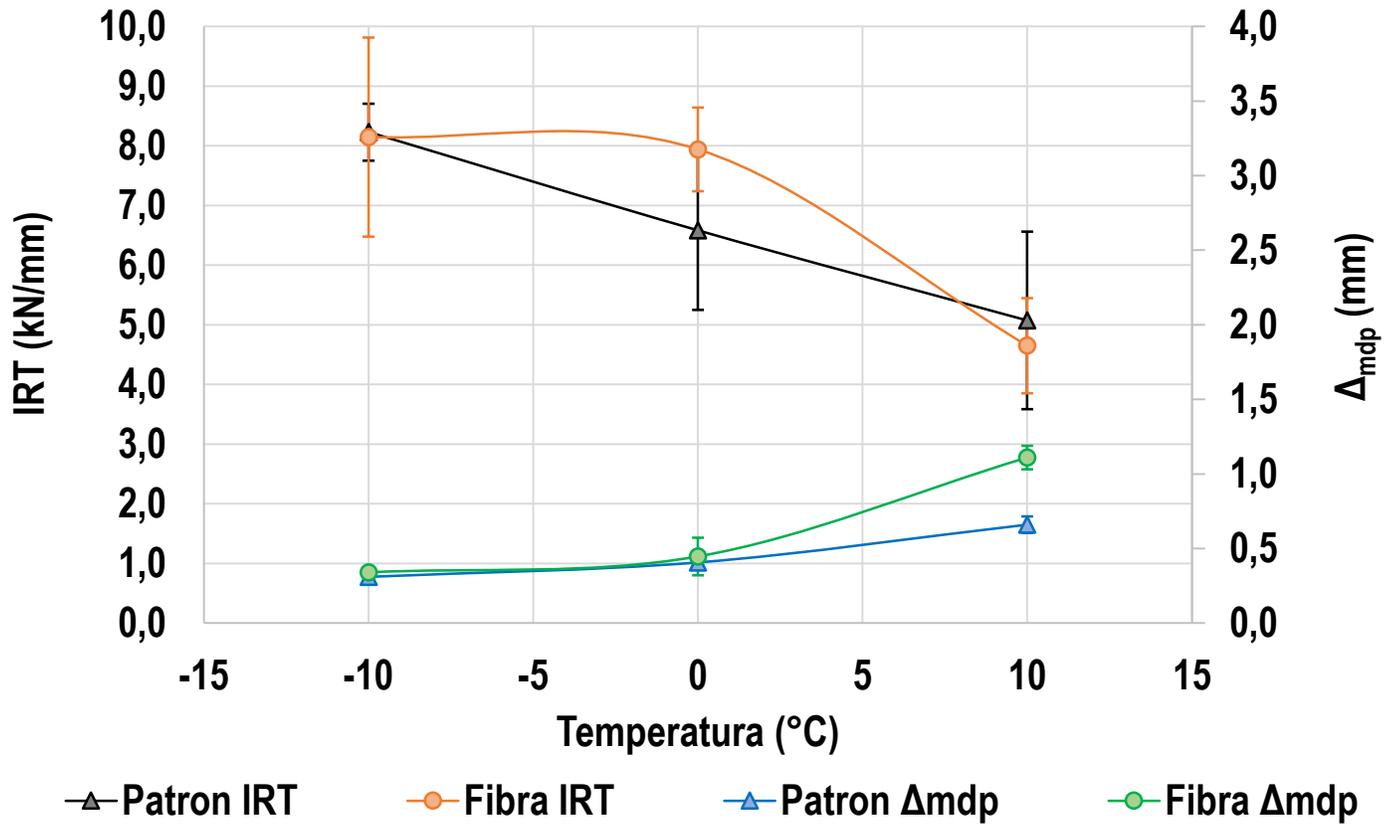


Figura 6 Relación entre IRT vs Δ_{mdp} a distintas Temperaturas.

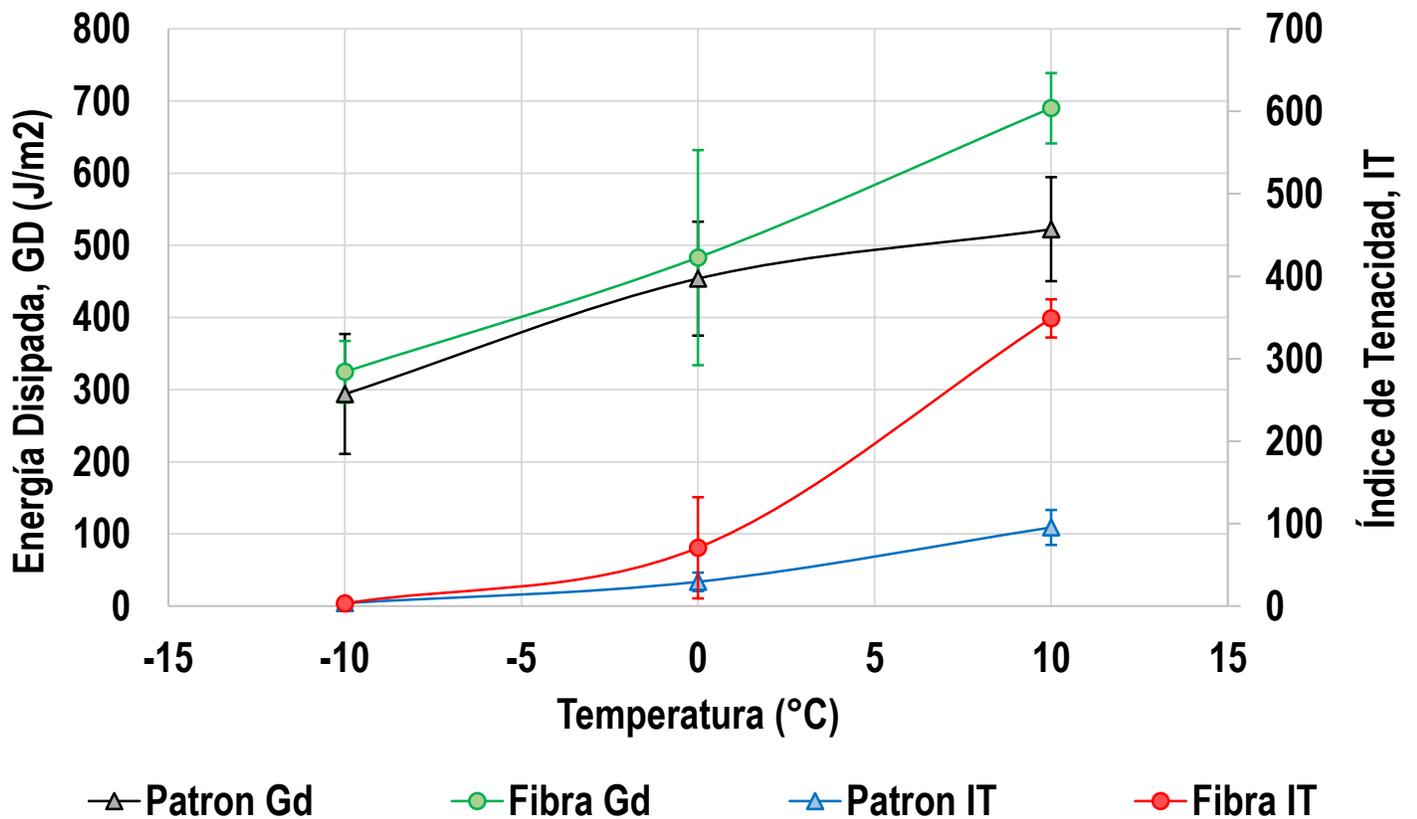


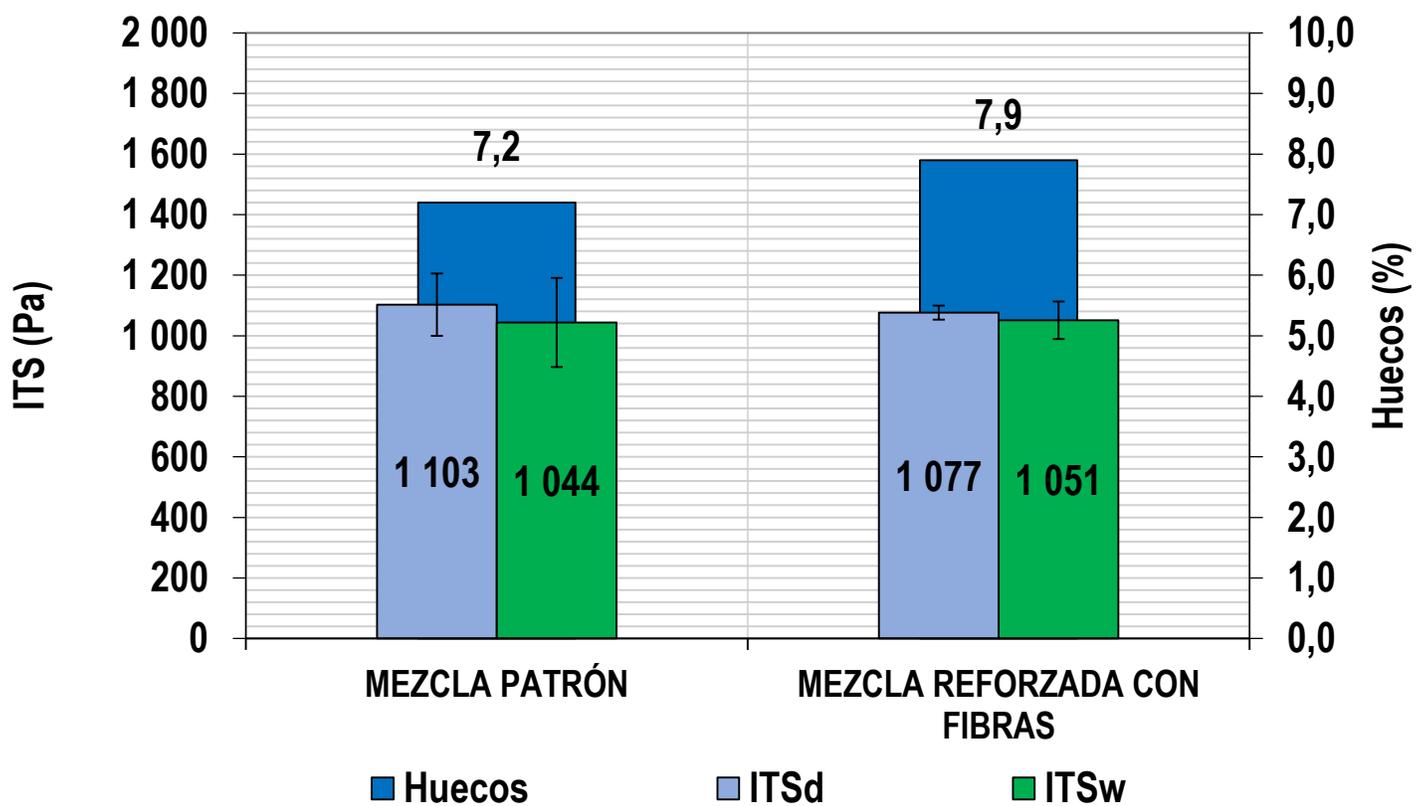
Figura 7 Relación entre la energía disipada vs Índice de tenacidad a distintas Temperaturas.

Sensibilidad al Agua

La normativa chilena no emplea el parámetro de sensibilidad al agua en el diseño de mezclas asfálticas, por lo que se utilizarán los límites de cumplimiento de la norma española para evaluar los resultados obtenidos. Según el pliego de prescripciones técnicas español (PG-3), se requiere un mínimo de 80% del valor de ITSR para emplear la mezcla en capa base o intermedia, y un 85% para capa de rodadura.

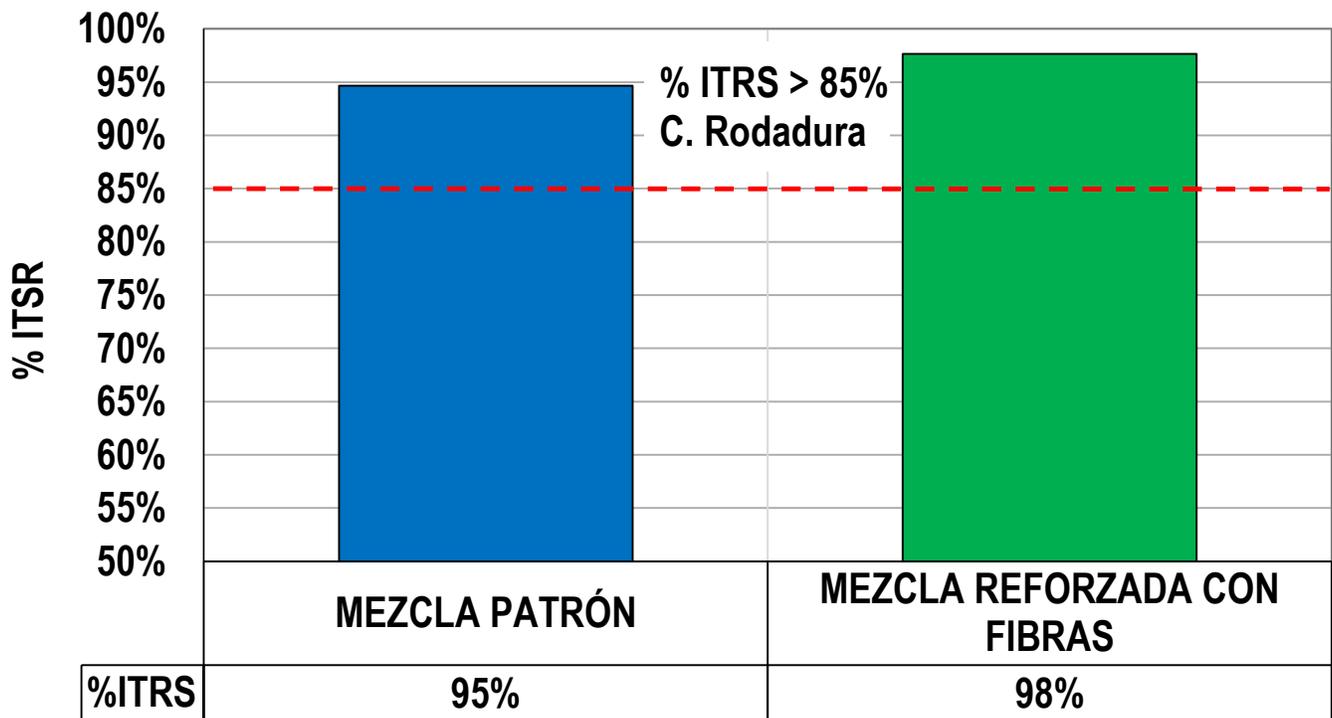
En la Figura 9(a) es posible observar que la mezcla reforzada con fibras posee una menor resistencia a la tracción en seco (ITSd) que la mezcla patrón, sin embargo, en húmedo (ITSw), la resistencia a la tracción es muy similar, destacándose una disminución mayor para la mezcla patrón entorno al 5%, mientras que para la mezcla modificada con fibras ocurre una disminución de un 2%. También es posible notar que las mezclas modificadas con fibras a pesar de tener un mayor porcentaje de vacíos (7,9%) que la mezcla patrón (7,2%), no es tan susceptible al daño generado por la acción del agua en la cohesión entre el árido y el ligante asfáltico.

En general, los resultados obtenidos muestran que ambas mezclas evaluadas cumplen con lo establecido en el pliego de prescripciones técnicas español, pudiéndose emplear ambos tipos de mezclas como capa de rodadura (ITSR>85%). Los resultados muestran que las mezclas con fibras sintéticas poseen un valor de ITSR de un 98% siendo levemente mayor que la mezcla patrón con un 95%, acorde al cálculo realizado bajo la norma europea, Figura 9(b).



(a)

Figura 8 Susceptibilidad al agua mezcla patrón y mezcla reforzada con fibras sintéticas.



(b)

Figura 9 Susceptibilidad al agua mezcla patrón y mezcla reforzada con fibras sintéticas.

Deformaciones Plásticas.

Para analizar comportamiento de las mezclas frente a las deformaciones plásticas se utilizó los parámetros establecidos en la especificación estadounidense debido a que en Chile no existe normativa para realizar el ensayo. Se empleó el criterio establecido por el Departamento de Transporte de Colorado (CDOT) que indica una profundidad máxima de la huella de 10mm.

Se puede observar que la mezcla reforzada con fibras sintéticas tiene un mejor comportamiento frente a las deformaciones plásticas, pues tuvo un ahuellamiento promedio de 3,94mm mientras que la mezcla patrón registró 6,29mm. Las desviaciones respecto al promedio del ahuellamiento final registran 0.8mm para mezcla patrón y 0.3 mm para mezcla con fibra. También se observa que la mezcla patrón posee una pendiente de ahuellamiento ($WTS_{Agua(5000-10000)}$) de $0.28 \text{ mm}/10^3$ ciclos y la mezcla reforzada con fibras un $WTS_{Agua(5000-10000)}$ de $0.15 \text{ mm}/10^3$ ciclos, lo que significa que la mezcla con fibras presenta un menor incremento en el tiempo en el ahuellamiento que la mezcla patrón. Es comportamiento es similar al descrito por (Mello et al., 2008), quienes mencionan que al incorporar estas fibras en las mezclas asfálticas es posible conseguir un ahuellamiento gradual en la mezcla, mejorando la respuesta frente a las deformaciones permanentes, debido al refuerzo generado por las fibras de aramidas.

Además, se evaluó el efecto de stripping, observándose que ninguna de las mezclas presentó este fenómeno debido a que no hubo un cambio en pendiente de la curva de ahuellamiento. A modo general, la mezcla patrón y la mezcla modificada con fibras sintéticas cumple con el valor de ahuellamiento máximo permisible por esta normativa del CDOT, Figura 10.

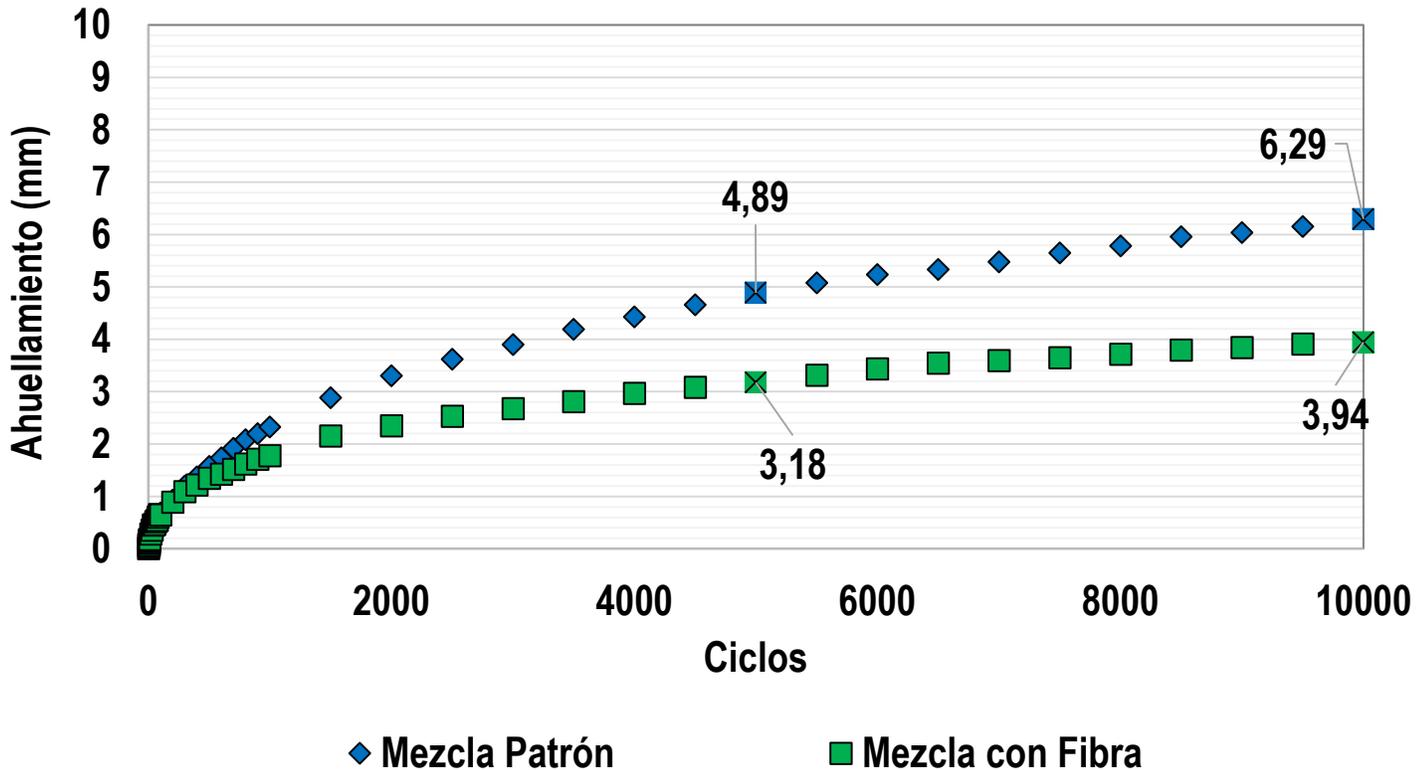


Figura 10 Curva de ahuellamiento de la mezcla patrón y mezcla reforzada con fibras sintéticas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el desempeño mecánico de mezclas asfálticas con la incorporación de fibras sintéticas a través de una metodología experimental. En base en los resultados de los ensayos realizados se puede concluir lo siguiente:

Las metodologías empleadas en la fabricación de probetas fueron realizadas bajo una misma energía de compactación, cumpliendo con las especificaciones establecidas por las normas empleadas. Al utilizar la misma energía de compactación las densidades de las mezclas con incorporación de fibras no presentaron variaciones significativas respecto a las densidades de la mezcla patrón.

La aportación de las fibras sintéticas muestra una disminución del módulo de rigidez entre un 10 y 17% en comparación a la mezcla de referencia para las temperaturas evaluadas, destacando que ambas mezclas cumplen con el 97% de la densidad Marshall.

El aporte de las fibras a la mezcla resulta beneficioso en el rango de temperaturas que va desde los 0 a 10°C mejorando su capacidad de flexión, tenacidad y permitiendo una disipación de

energía mas eficiente en el proceso de fisuración. Sin embargo, con la adición a la temperatura de -10°C , no se observa diferencias significativas con respecto a la mezcla patrón.

La incorporación de fibras de aramida y polipropileno en la mezcla asfáltica, contribuye a una reducción en el daño por humedad, alcanzando un valor de ITSr de un 98%, lo que indica que la resistencia a la tracción indirecta en condición seca y húmeda presenta valores similares, cumpliendo con lo exigido por la normativa española para capa de rodadura ($\text{ITSr} > 85\%$).

La adición de las fibras sintéticas reduce en un 37,4% el ahuellamiento en relación a la mezcla patrón, concluyendo que las fibras mejoran la respuesta a altas temperaturas, asegurando buen comportamiento frente a deterioros asociados a la deformación permanentes y stripping.

BIBLIOGRAFÍA

- Abiola, O. S., Kupolati, W. K., Sadiku, E. R., & Ndambuki, J. M. (2014). Utilisation of natural fibre as modifier in bituminous mixes: A review. *Construction and Building Materials*, 54, 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.037>
- Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M., & Hejazi, S. M. (2010). Fiber-reinforced asphalt-concrete - A review. *Construction and Building Materials*, 24(6), 871–877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.009>
- Afonso, M. L., Dinis-Almeida, M., & Fael, C. S. (2017). Study of the porous asphalt performance with cellulosic fibres. *Construction and Building Materials*, 135, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.222>
- Ahmad, A., & Kareem, Y. (2015). Fatigue Behavior of Polypropylene Fiber Reinforced Bituminous Concrete Mix, 4(02), 449–453.
- Al-Hadidy, A. I., & Yi-qiu, T. (2009). Effect of polyethylene on life of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1456–1464. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.004>
- Aliha, M. R. M., Razmi, A., & Mansourian, A. (2017). The influence of natural and synthetic fibers on low temperature mixed mode I + II fracture behavior of warm mix asphalt (WMA) materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 182, 322–336. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.06.003>
- Chen, H., Xu, Q., Chen, S., & Zhang, Z. (2009). Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures. *Materials and Design*, 30(7), 2595–2603. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.030>
- Haddadi, S., Ghorbel, E., & Laradi, N. (2008). Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1212–1219. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.028>
- Huang, H., & White, T. D. (1996). Dynamic Properties of Fiber-Modified. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 98–104. Retrieved from <https://doi.org/10.3141/1545-13>
- ITEM 400 HS. (1998). Standard specification for asphalt concrete - high stress using polypropylene fibers Using polypropylene Fibers. *Flexible Pavements Inc.*
- Kaloush, K. E., Biligiri, K. P., Zeiada, W. A., Rodezno, M. C., & Reed, J. X. (2010). Evaluation of Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Material Characterization Tests. *Journal of Testing and Evaluation*, 38(4), 102442. <https://doi.org/10.1520/JTE102442>
- Kaloush, K. E., Zeiada, W. A., Biligiri, K. P., Rodezno, M. C., & Reed, J. X. (2010). Evaluation of Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Material Characterization Tests. *Journal of Testing and Evaluation*, 38(4), 102442. <https://doi.org/10.1520/JTE102442>
- Kutay, M. E., Gibson, N., & Youtcheff, J. (2008). Kutay, M. E., Gibson, N., & Youtcheff, J. In *Conventional and viscoelastic continuum damage (VECD) - Based fatigue analysis of polymer modified asphalt pavements*.
- Mello, L. G., Kaloush, K. E., & Biligiri, K. P. (2008). Evaluation of Fiber Reinforcement in Hot Mix Asphalt Using Advanced Material Characterization Tests. In *The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition 2-5 March 2008, Cancun, Mexico*

(pp. 0–7).

- Pamulapati, Y., Elseifi, M. A., Cooper, S. B., Mohammad, L. N., & Elbagalati, O. (2017). Evaluation of self-healing of asphalt concrete through induction heating and metallic fibers. *Construction and Building Materials*, 146, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.064>
- Reyes, O., Camacho, J. & Mejia, M. (2017). Resistencia mecánica y dinámica de mezclas asfálticas adicionadas con fibras sintéticas. *Congreso Ibero-Latinoamericano Del Asfalto CILA XX*.
- Valdés, G., Pérez-Jiménez, F., & Botella, R. (2009). Ensayo Fénix, una Nueva Metodología para Medir la Resistencia a la Fisuración en Mezclas Asfálticas. *Revista de La Construcción*, 8(1), 114–125.
- Valdés V, G. A., Pérez-Jiménez, F. E., & Botella N, R. (2013). Nuevo procedimiento para evaluar el comportamiento a fatiga en pavimentos asfálticos a través del ensayo Fénix New procedure to assess the fatigue behavior in asphalt pavements by Fénix test. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 21(3), 362–371. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052013000300006>
- Wu, S., Ye, Q., & Li, N. (2008). Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers. *Construction and Building Materials*, 22(10), 2111–2115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.018>
- Wu, S., Ye, Q., Li, N., & Yue, H. (2007). Effects of fibers on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 22(4), 733–736. <https://doi.org/10.1007/s11595-006-4733-3>
- Xu, Q., Chen, H., & Prozzi, J. A. (2010). Performance of fiber reinforced asphalt concrete under environmental temperature and water effects. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2003–2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.012>
- Yang, J. M., Kim, J. K., & Yoo, D. Y. (2016). Effects of amorphous metallic fibers on the properties of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 128, 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.082>
- Yoo, P. J., & Kim, T. W. (2015). Strengthening of hot-mix asphalt mixtures reinforced by polypropylene-impregnated multifilament glass fibres and scraps. *Construction and Building Materials*, 75, 415–420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.009>