

UNIVERSIDAD DEL BÍO- BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

PROFESOR PATROCINANTE:

DR. JOSÉ NORAMBUENA CONTRERAS

(Universidad del Bío-Bío)

CO-DIRECTOR:

DR. ÁLVARO GONZÁLEZ VACCAREZZA

(Universidad del Desarrollo)

MEDIDA DEL MÓDULO DE RIGIDEZ DE MEZCLAS ASFÁLTICAS REFORZADAS CON FIBRAS USANDO EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

**PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS
PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

MARÍA JOSÉ SAN MARTÍN MALDONADO

Concepción, Abril de 2016

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos...

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo de mi profesor guía Dr. José Norambuena, tanto en el ámbito académico como personal. Quisiera destacar su preocupación en todos los momentos que fueron necesarios. Agradezco también a la profesora Irene González-Torre por su amabilidad y disposición para resolver las dudas que se presentaron en este proceso.

Además, un especial agradecimiento a mi profesor co-director y docente investigador de la Universidad del Desarrollo Dr. Álvaro González, por el buen recibimiento y apoyo durante la estancia en el laboratorio de Obras Civiles de dicha universidad, poniendo a mi disposición el equipo necesario para realizar los ensayos respectivos.

También agradecer a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) del Gobierno de Chile, por el apoyo financiero otorgado al Proyecto FONDECYT de Iniciación 2014 N°11140103 del cual forma parte este estudio.

Finalmente, agradezco a mis padres y hermanos, por su incondicional amor y preocupación. En especial a mi hermano Christopher San Martín que desde un lugar mejor me protege y cuida. Te quiero demasiado, y sé que en cada paso que doy estas tú a mi lado.

MEDIDA DEL MÓDULO DE RIGIDEZ DE MEZCLAS ASFÁLTICAS REFORZADAS CON FIBRAS USANDO EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

María José San Martín Maldonado
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
majsanma@alumnos.ubiobio.cl

Dr. José Norambuena Contreras
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
jnorambuena@ubiobio.cl

RESUMEN

Esta Tesis se enmarca dentro de un proyecto de investigación que consiste en el desarrollo de una nueva mezcla asfáltica reforzada con fibras de lana de acero con propiedades de auto-reparación de sus grietas usando calentamiento por microondas. Como contexto general, es sabido que la adición de fibras de lana de acero a las mezclas asfálticas puede influir en su comportamiento físico y mecánico. Sin embargo, aún no está claro cómo funciona dicha influencia. Debido a esto, esta investigación tiene como principal objetivo evaluar la influencia de las fibras de lana de acero en el módulo de rigidez de mezclas asfálticas reforzadas con fibras. Con este objetivo, se evaluaron cinco diseños diferentes de mezcla asfáltica semi-densa, empleando la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico en la mezcla, pero con cinco porcentajes diferentes de fibras. Para ello, se empleó el ensayo de tracción indirecta, evaluando la influencia de las fibras en muestras Marshall pre-acondicionadas a cuatro diferentes temperaturas: 0°C, 10°C, 20°C y 40°C. Finalmente, los principales resultados y análisis de este estudio se presentan en este documento.

Palabras claves: mezcla asfáltica; fibras metálicas; módulo de rigidez; ensayo tracción indirecta.

Conteo de palabras: 7158 + 8 Figuras/Tablas*250 + 1 Figura/Tabla* 500 = 9658 Palabras Totales.

MEASUREMENT OF STIFFNESS MODULUS OF FIBER-REINFORCED ASPHALT MIXTURES USING THE INDIRECT TENSILE TEST

María José San Martín Maldonado

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío
majsanma@alumnos.ubiobio.cl

José Norambuena Contreras, Ph.D

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío
jnorambuena@ubiobio.cl

ABSTRACT

This thesis is part of a research project consisting on the development of a new asphalt mixture reinforced with steel wool fibers, with self-healing properties using microwave heating. In this context, it is known that the addition of steel wool fibers to asphalt mixtures has an influence on their physical and mechanical behavior. However, it is still unclear how this influence works. Due to this, the main objective of this research is to evaluate the influence of steel wool fibers on the stiffness modulus of fiber-reinforced asphalt mixtures. With this purpose, five different semidense asphalt mixtures, with the same aggregates gradation and amount of asphalt cement but with five different percentages of steel wool fibers, were evaluated. To do this, indirect tensile test was used to evaluate the influence of fibers on the stiffness modulus of Marshall specimens preconditioned at four different temperatures: 0°C, 10°C, 20°C and 40°C. Finally, main results of the study and their analysis are presented in this document.

Keywords: Asphalt mixtures; Metallic fibers; Stiffness modulus; Indirect Tensile Test.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES.....	1
1.2	HIPÓTESIS.....	3
1.3	OBJETIVOS.....	3
1.3.1	<i>Objetivo general</i>	3
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	3
1.4	DECLARACIÓN DE AUTOR.....	3
2	MATERIALES Y MÉTODOS	4
2.1	MATERIALES.....	4
2.2	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS MARSHALL.....	4
2.3	DENSIDAD APARENTE Y CONTENIDO DE HUECOS EN MEZCLA.....	5
2.4	DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD Y DIÁMETRO DE LAS FIBRAS.....	5
2.5	MORFOLOGÍA DE LAS FIBRAS.....	6
2.6	MEDIDA DEL MÓDULO DE RIGIDEZ POR TRACCIÓN INDIRECTA.....	7
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	8
3.1	MORFOLOGÍA DE LAS FIBRAS ANTES Y DESPUÉS DEL MEZCLADO Y COMPACTACIÓN MARSHALL.....	8
3.2	EFFECTOS DE LAS FIBRAS EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MUESTRAS MARSHALL ..	11
3.3	INFLUENCIA DE LAS FIBRAS EN EL MÓDULO DE RIGIDEZ DE LAS MUESTRAS MARSHALL .	12
4	CONCLUSIONES	17
5	REFERENCIAS	19

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición de la mezcla asfáltica reforzada con fibras_	6
---	---

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Equipo de ensayo de tracción indirecta.....	7
Figura 2. Curvas representativas de: (a) impulso de carga, mostrando el período ascendente y la carga máxima, y (b) amplitud de deformación.....	8
Figura 3. Resultados del análisis de probabilidad sobre la longitud de fibras: (a) gráfico de probabilidad-probabilidad Weibull, (b) histograma de frecuencias.. ..	9
Figura 4. Imágenes SEM de la fibra de lana de acero antes y después del mezclado y compactación Marshall: (a) aspecto superficial de una fibra de lana de acero y sección transversal antes del mezclado, (b) fibras individuales dañadas por aplastamiento y corte...	10
Figura 5. Resultados experimentales de densidad aparente de muestras Marshall en función del contenido de huecos.. ..	11
Figura 6. Variación de los valores de módulo de rigidez medidos en dirección longitudinal (A) y transversal (B) de muestras Marshall.. ..	12
Figura 7. Resultados medios del módulo de rigidez en muestras Marshall en función: a) de la temperatura de ensayo y b) del contenido de huecos... ..	14
Figura 8. Valores de ratios de módulo de rigidez de muestras con fibras respecto a muestras sin fibras a) en función de la temperatura de ensayo b) gráfico probabilidad-probabilidad normal de los ratios.....	15

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Una mezcla asfáltica es un material compuesto por áridos y cemento asfáltico, y es uno de los materiales más utilizados para la construcción de carreteras. En Chile, un 88% de la red vial pavimentada ha sido construida usando este material (MOP, 2014). Sin embargo, las condiciones climáticas combinadas con las cargas del tráfico contribuyen a generar daños prematuros e irreversibles en los pavimentos (Delgadillo et al. 2012).

Así mismo, los daños ocasionados por el agua (Airey y Choi, 2002), el envejecimiento (Airey, 2003) y las variaciones térmicas también afectan a la resistencia mecánica, reduciendo la vida útil de los pavimentos asfálticos (Delgadillo et al. 2012). Estos factores pueden tener una influencia negativa en la rigidez del cemento asfáltico y en la pérdida de partículas de las mezclas asfálticas (Norambuena-Contreras, 2013). De este modo, todo esto implica realizar reparaciones periódicas, lo que supone un alto costo para los gobiernos de cada país (Thenoux et al. 2007).

Por lo tanto, con el objetivo de mejorar el comportamiento mecánico y aumentar la vida útil de los pavimentos asfálticos se pueden incorporar distintos tipos de fibras (de origen vegetal, sintético y mineral) en el diseño de nuevas mezclas asfálticas (McDaniel, 2015). Referente a las fibras minerales, por ejemplo, las fibras metálicas son conocidas por aumentar las características de resistencia, fatiga y ductilidad en materiales compuestos (Fitzgerald, 2000). Además, otras fibras metálicas, como las fibras de lana de acero, pueden ser adicionadas a la mezcla con el objetivo de incrementar la conductividad térmica y eléctrica. De este modo, las fibras metálicas pueden ser utilizadas en el desarrollo de nuevos pavimentos flexibles con fines energéticos (Wu et al. 2005) y de auto-reparación de sus grietas usando procesos de calentamiento por inducción electromagnética (Liu, 2012; García et al. 2015) o radiación microondas (Sun et al. 2013). Esta última tecnología demanda un contenido de fibras metálicas menor al requerido a través del calentamiento por inducción, lo que se puede traducir en una reducción considerable de costos y energía (Gallego et al. 2013).

Por otro lado, la adición de fibras de lana de acero también puede influir en el comportamiento físico y mecánico de la nueva mezcla asfáltica (García et al. 2013). Como se ha demostrado en algunas investigaciones (Norambuena-Contreras et al. 2012), los daños generados por agua se relacionan generalmente con la pérdida de partículas, causada por la infiltración del agua a través

de la estructura del pavimento, disminuyendo la unión entre áridos y cemento asfáltico (Khattak y Kyatham, 2008). Además, se ha demostrado que el porcentaje de pérdida de partículas aumenta exponencialmente con el incremento del contenido de huecos en la mezcla y que las fibras de lana de acero mejoran la resistencia mecánica de las mezclas. Sin embargo, como el contenido de huecos en la mezcla se incrementa con el volumen de fibras de lana de acero, este incremento de resistencia puede verse reducido (Norambuena-Contreras et al. 2015). Adicionalmente, las fibras pueden contribuir a prevenir la formación y propagación de grietas (McDaniel, 2015). Específicamente, las fibras tienen una alta resistencia a la tracción en relación a las mezclas asfálticas, por lo que pueden mejorar la cohesión y la resistencia a la tracción de las mezclas (Mahrez et al. 2003). Se ha demostrado que tanto en mezclas densas como en mezclas porosas el uso de fibras mejora la resistencia al agrietamiento en comparación con mezclas sin fibras (McDaniel, 2015).

Por otra parte, la rigidez de la mezcla asfáltica está relacionada directamente con la resistencia a la deflexión de pavimentos (Ye et al. 2009). Algunos autores han señalado que el uso de fibras puede aumentar el módulo de rigidez en mezclas asfálticas reforzadas con fibras (Bennert, 2012). Sin embargo, estudios recientes (McDaniel, 2015) han demostrado que algunas mezclas reforzadas con fibras no presentan cambios significativos en sus propiedades de rigidez en comparación a mezclas sin fibras.

Por todo lo anterior, esta investigación tiene como principal objetivo evaluar la influencia de las fibras de lana de acero en las propiedades de rigidez de mezclas asfálticas reforzadas con fibras. Con este objetivo, se han evaluado cinco diseños diferentes de mezcla asfáltica semi-densa, empleando la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico en mezcla, pero con cinco porcentajes diferentes de fibras. Finalmente, mediante la realización de ensayos de tracción indirecta se ha evaluado la influencia de las fibras en el valor del módulo de rigidez de probetas tipo Marshall pre-acondicionadas a cuatro diferentes temperaturas.

1.2 Hipótesis

- La adición de fibras metálicas puede incrementar la resistencia mecánica de la nueva mezcla asfáltica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Evaluar la influencia de las fibras de lana de acero en las propiedades de rigidez de mezclas asfálticas reforzadas con fibras.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades físicas de las mezclas asfálticas con y sin adición de fibras metálicas.
- Medir el módulo de rigidez de las mezclas con 5 porcentajes de fibras, incluyendo una de referencia, a 4 diferentes temperaturas.
- Realizar un análisis comparativo de las variables medidas.
- Definir un porcentaje óptimo de fibras para mejorar el módulo de rigidez bajo distintas temperaturas.

1.4 Declaración de autor

Finalmente, parte de esta tesis corresponde a una traducción al idioma Español de los artículos científicos:

- Norambuena-Contreras J, Valdés-Vidal G, González A, Serpell R. Effect of fibres addition on the mechanical properties of self-healing asphalt mixtures, enviado para su revisión a la revista Construction and Building Materials (Editorial Elsevier), en Marzo 2016.
- Norambuena-Contreras J, González-Torre I, Sánchez M, Dowling R. Development of a new asphalt mixture with self-healing properties, In: press. 18th Ibero-Latin American Asphalt Congress, CILA-XVIII2015, Bariloche, Argentina. 2015.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

En este estudio se ha utilizado una mezcla asfáltica semi-densa tipo IV-A-12, considerando ésta como la mayormente utilizada en la construcción de pavimentos asfálticos en Chile (Delgadillo et al. 2012). La granulometría de la mezcla se muestra en la Tabla 1. Los áridos, de procedencia fluvial, fueron clasificados en tres fracciones: árido grueso o gravilla (entre los tamices 5-12.5mm y densidad 2.779g/cm³), árido fino o arena (entre los tamices 0.08-5mm y densidad 2.721g/cm³), y filler (tamiz <0.08mm y densidad 2.813g/cm³). El cemento asfáltico usado fue un CA-24 con una penetración a 25°C de 56dmm, viscosidad absoluta a 60°C de 3077P, y densidad de 1.039g/cm³. Además, se adicionaron a la mezcla asfáltica fibras de lana de acero cortadas mecánicamente. El material usado para las fibras fue acero de bajo contenido en carbono, con una densidad de 7.180g/cm³. Estas fibras tienen un diámetro promedio de 0.157mm con una relación de aspecto promedio de 30 y una longitud inicial en el rango de 2 a 8mm, lo que significa que tanto fibras cortas como largas fueron sumadas a la matriz de mezcla asfáltica. Finalmente, se usaron 5 porcentajes diferentes de fibras en las mezclas: 0%, 2%, 4%, 6% y 8%, por volumen total del cemento asfáltico, ver Tabla 1. En total, se prepararon 5 tipos diferentes de mezclas asfálticas: 1 mezcla asfáltica sin fibras (mezcla de referencia) y 4 mezclas asfálticas con diferentes contenidos de fibras, empleando la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico en mezcla, pero variando la masa de las fibras adicionadas a la mezcla.

2.2 Preparación de las muestras Marshall

Para la fabricación de las muestras, los materiales fueron mezclados manualmente dentro de un recipiente metálico a una velocidad constante de 100 r.p.m. Así, previo al proceso de mezclado, los áridos fueron calentados a una temperatura de 150°C durante 24 horas, mientras que el cemento asfáltico y las fibras metálicas se calentaron a una temperatura de 150°C durante 2 horas. De este modo, los materiales fueron vaciados al recipiente metálico en el siguiente orden: primero, el cemento asfáltico y las fibras; segundo, el árido grueso; tercero, el árido fino y finalmente, el filler. Los materiales fueron mezclados durante un tiempo aproximado de 3.5 minutos, conservando una temperatura de mezclado constante de 150°C en el interior del recipiente. Una vez mezclados los materiales y garantizando una buena distribución de las fibras, éstos fueron dispuestos en el interior

de un molde Marshall previamente calentado de aproximadamente 10cm de diámetro y 6cm de altura con el objetivo de compactar las mezclas mediante un martillo Marshall aplicando 75 golpes por cada cara de la muestra. Después de la compactación y posterior enfriamiento durante 24 horas a temperatura ambiente, las muestras Marshall fueron extraídas mecánicamente desde el interior del molde. Finalmente, para este estudio se fabricaron un total 60 muestras Marshall: 48 con fibras y 12 sin fibras.

2.3 Densidad aparente y contenido de huecos en mezcla

Con el fin de evaluar las propiedades físicas de las mezclas asfálticas con y sin adición de fibras, se han determinado la densidad aparente y el contenido de huecos de todas las muestras Marshall. La densidad aparente se ha calculado como la relación entre la masa en seco y el volumen real de cada muestra. Para ello, en cada muestra de ensayo se han medido la masa en seco y el volumen real incluyendo huecos, obtenido a partir de la masa sumergida en agua. De este modo, el contenido de huecos de cada muestra de ensayo se ha calculado en base al cálculo previo de la densidad aparente. Por lo tanto, como el porcentaje exacto de los materiales y su densidad son conocidos para cada tipo de mezcla, se ha calculado la densidad máxima teórica sin huecos en cada caso. De este modo, el contenido de huecos en mezcla (CH) para cada muestra de ensayo se ha calculado de acuerdo a la ecuación (1).

$$CH (\%) = \frac{\rho_{max} - \rho_a}{\rho_{max}} \quad (1)$$

Donde ρ_a es la densidad aparente de cada muestra, medida en g/cm^3 y ρ_{max} es la densidad máxima teórica sin huecos de cada muestra de ensayo, medida en g/cm^3 . Finalmente, la densidad aparente y el contenido de huecos de cada muestra han sido calculados como el valor promedio de 12 probetas por cada diseño de mezcla con fibras y 12 probetas para las mezclas sin fibras.

2.4 Determinación de la longitud y diámetro de las fibras

Para determinar la longitud de las fibras añadidas a las mezclas, se seleccionaron 120 fibras de lana de acero al azar del total de fibras disponibles para la fabricación de todas las muestras Marshall.

Después, se determinó la longitud de éstas mediante fotografías realizadas con un microscopio óptico empleando una magnificación de 30x y posteriormente se midió la longitud de cada una de las fibras con un programa de procesamiento de imagen. Para ello, el programa de imagen consideró que 148 pixeles eran equivalentes a una longitud de 1mm. Además, se desarrolló un análisis de probabilidad con el fin de evaluar la función de distribución que mejor se ajustaba a los resultados. Por otra parte, el diámetro promedio de las fibras fue calculado a partir de la medición de 10 fibras individuales usando un micrómetro digital calibrado, tomando para cada fibra tres medidas de repetición.

Tabla 1. Composición de la mezcla asfáltica reforzada con fibras

Tamaño (mm)	% de masa retenido	% acumulado de masa retenido	Masa (g)
12.5	16	16	176
10	13	29	143
5	24	53	264
2.5	16	69	176
0.63	17	86	187
0.315	4	90	44
0.16	3	93	33
0.08	2	95	19
<0.08	5	100	58
Cemento asfáltico CA-24	(% en masa/áridos)	5.3	58.3
Fibras de lana de acero (% en vol./CA)	Rango de longitud (mm)	Diámetro promedio (mm)	
2% fibras			8
4% fibras	2-8	0.157	16
6% fibras			24
8% fibras			32

2.5 Morfología de las fibras

El aspecto superficial y la morfología de las fibras individuales se ha estudiado usando un Microscopio Electrónico de Barrido (JEOL JSM-6610/LV) disponible en el Centro de Biomateriales y Nanotecnología (CBN) de la Universidad del Bío-Bío. En este estudio, las fibras fueron examinadas antes y después del mezclado y la compactación Marshall.

2.6 Medida del módulo de rigidez por tracción indirecta

En esta investigación, el módulo de rigidez fue determinado según la Norma Europea EN 12697-2:2006. Esta metodología consiste en hacer un ensayo de tracción indirecta en probetas cilíndricas, aplicando pulsos de carga senoidal y períodos de descarga, para llegar a una tensión horizontal establecida. Se aplican verticalmente diez pulsos de carga en dos diámetros ortogonales (ver Figura 1). Finalmente, el módulo de rigidez se obtiene aplicando la ecuación (2).

$$MR = \frac{F * (v + 0,27)}{(z * h)} \quad (2)$$

Donde MR es la medida del módulo de rigidez medido en MPa, F es la máxima carga vertical aplicada medida en N (ver Figura 2(a)), z es la amplitud de la deformación horizontal medida en mm (ver Figura 2(b)), h es el espesor promedio de la probeta medido en mm, y v es la relación de Poisson (0.36 según Norambuena-Contreras et al. (2010))

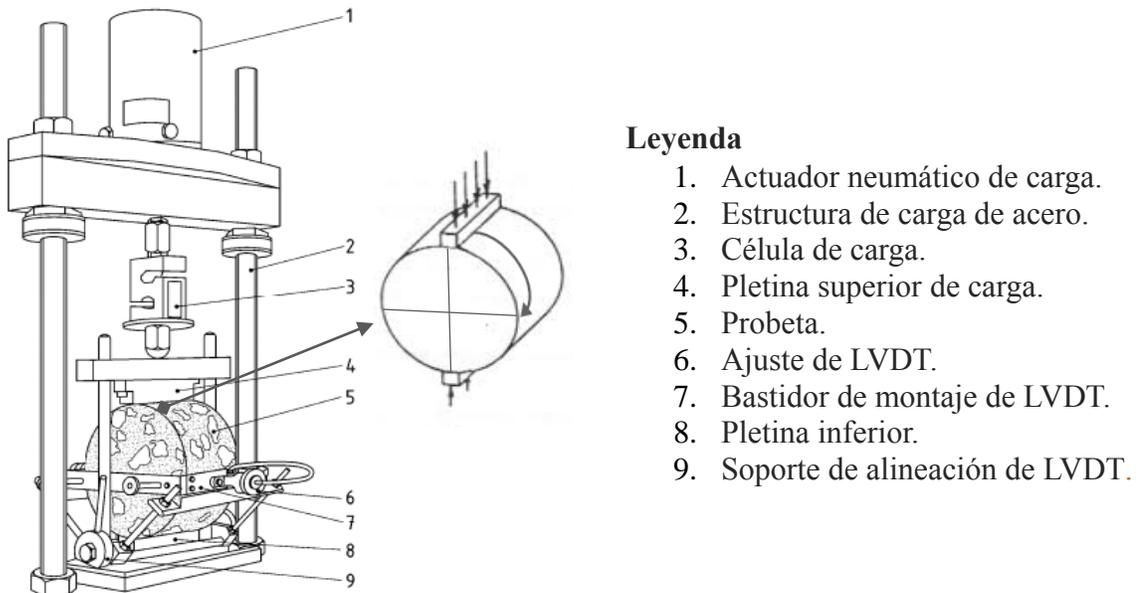
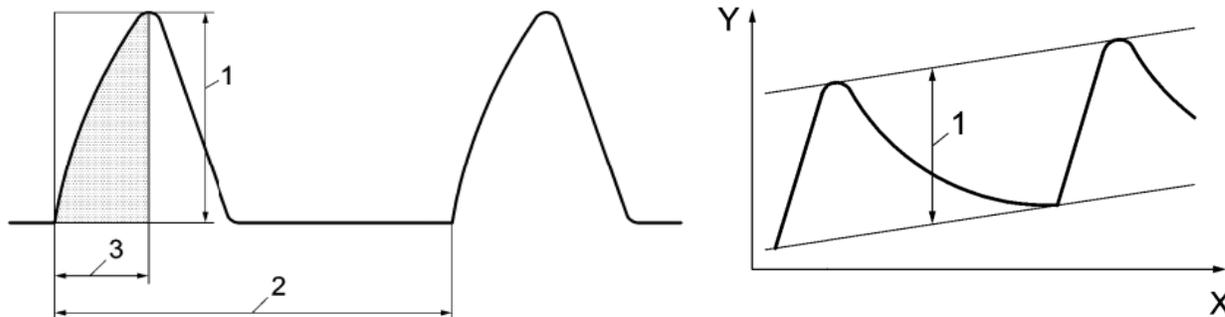


Figura 1. Equipo de ensayo de tracción indirecta.

Por último, con el fin de evaluar la influencia del contenido de fibras y la temperatura de ensayo en el módulo de rigidez de mezclas asfálticas, se han ensayado tres muestras Marshall para cada tipo de mezcla asfáltica (ver Tabla 1) a cuatro diferentes temperaturas: 0°C, 10°C, 20°C y 40 °C.

Finalmente, 60 muestras Marshall fueron ensayadas obteniendo 2 módulos de rigidez por cada muestra, por lo que en total se analizarán 120 valores de módulos de rigidez. Lo anterior es posible, debido a que el ensayo a tracción indirecta es del tipo no destructivo.



Leyenda

1. Carga máxima.
2. Período de repetición de los impulsos.
3. Período ascendente

(a)

Leyenda

- X Tiempo.
Y Deformación.
1 Amplitud de deformación

(b)

Figura 2. Curvas representativas de: (a) impulso de carga, mostrando el período ascendente y la carga máxima, y (b) amplitud de deformación.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Morfología de las fibras antes y después del mezclado y compactación Marshall

Las fibras metálicas deben tener una longitud y diámetro óptimos con el fin de garantizar una buena distribución e integración en la matriz de mezcla asfáltica. Autores como García et al. (2013) comprobaron que fibras cortas y gruesas experimentan una mejor distribución en el interior de la mezcla. Con esto en mente, en este estudio se ha desarrollado un análisis probabilístico considerando todos los resultados de longitud de fibras, con el objetivo de demostrar que la longitud de las fibras cortadas mecánicamente, siguen una ley de probabilidad. Para ello, todas las fibras con el mismo diámetro e independientemente de su longitud original, se han representado como una función de distribución de probabilidad tipo Weibull, ver Figura 3(a). Este resultado puede ser considerado un buen ajuste debido a que todos los datos, independiente de su longitud original se pueden alinear en una recta con pendiente 1:1. Este resultado es similar al publicado por García et

al. (2013), que analizó la longitud de fibras en materiales compuestos. En este análisis se ha empleado una función de distribución de probabilidad tipo Weibull como una función de daño del material, teniendo en cuenta que el corte de las fibras se produce debido a los repetidos esfuerzos de cizalla que ocurren durante cada ciclo mecánico de corte. Por otra parte, con el objetivo de conocer la probabilidad de ocurrencia de la variable analizada, se ha determinado el histograma de frecuencias para todos los resultados de longitud de fibras medidos usando un microscopio óptico, ver Figura 3(b). A partir de esta Figura, se puede demostrar que independientemente de la cantidad de fibras añadidas a la mezcla, hay un 70% de probabilidad de que las fibras sean largas, entre 4 y 6mm. Mientras que la probabilidad de adicionar fibras más cortas (menores a 4mm) y muy largas (mayores a 6mm) es mucho menor, 10% y 20% aproximadamente.

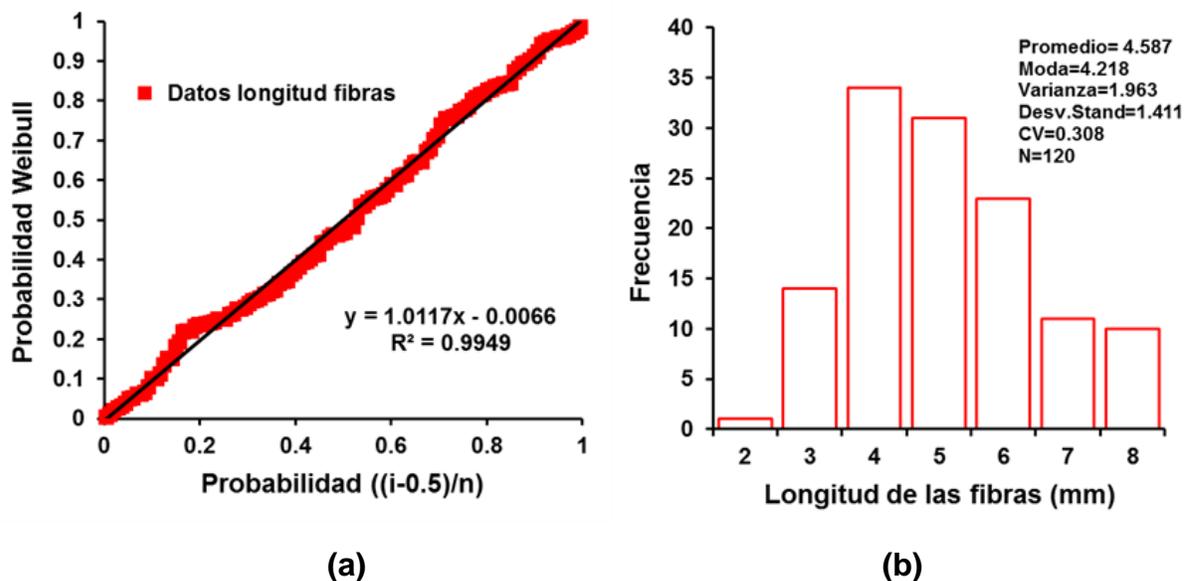


Figura 3. Resultados del análisis de probabilidad sobre la longitud de fibras: (a) gráfico de probabilidad-probabilidad Weibull, (b) histograma de frecuencias.

Como resultado, la longitud de las fibras de lana de acero fluctuó entre 2 y 8mm, siendo la longitud promedio de aproximadamente 4.5mm. Este valor puede ser considerado como una fibra de largo medio de acuerdo a los resultados obtenidos en un estudio previo (García et al. 2013) donde se usaron fibras de diferentes diámetros y dos longitudes (2.5 y 7mm). Por otro lado, el diámetro de las fibras calculado a partir de la medida de 10 fibras individuales usando un micrómetro digital calibrado, ha sido en promedio 0.157mm. Este valor puede considerarse como una fibra de tipo gruesa en relación a los resultados obtenidos en estudios previos, que utilizan fibras de lana de acero con diferentes diámetros, entre 0.029-0.155mm (García et al. 2013) y entre 0.10-0.12mm

(Gallego et al. 2013). Con el fin de confirmar este resultado, se realizó una caracterización morfológica de las fibras individuales usando un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM). Como ejemplo, en la Figura 4(a) se muestran el aspecto superficial, y la sección transversal de las fibras usadas en este estudio. En esta Figura, se puede observar que las fibras de lana de acero presentan algunos defectos en su longitud y sección transversal. La razón es que las fibras de lana de acero fueron cortadas de cables de acero de mayor diámetro (aproximadamente 2mm). Así, las cuchillas utilizadas para el corte de las fibras se sometieron a diferentes tipos de vibraciones, que crearon defectos en la superficie de la fibra, ver Figura 4(a). Además, la sección transversal de las fibras puede presentar distintos diámetros dependiendo de la vibración de corte, ver Figura 4(a). En este estudio, se ha considerado como valor representativo el mayor diámetro de las fibras, debido a que supone una mayor superficie de contacto con la matriz de cemento asfáltico-filler. Finalmente, también se ha comprobado que las fibras pueden ser dañadas por efecto de los procesos de mezclado y compactación Marshall. En la Figura 4(b), se observan fibras individuales dañadas por aplastamiento y corte. Esto puede deberse a que al tratarse de fibras gruesas (diámetro 0.157mm) y de longitud media (4.5mm), éstas poseen una mayor superficie específica de contacto, siendo más susceptibles al impacto de los áridos durante los procesos de mezclado y compactación usando el martillo Marshall.

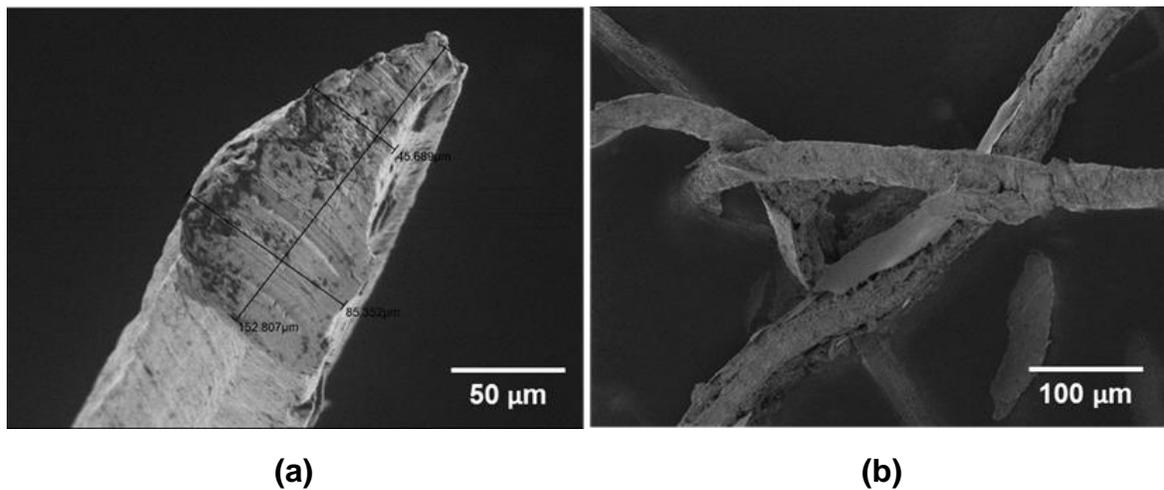


Figura 4. Imágenes SEM de la fibra de lana de acero antes y después del mezclado y compactación Marshall: (a) aspecto superficial de una fibra de lana de acero y sección transversal antes del mezclado, (b) fibras individuales dañadas por aplastamiento y corte.

3.2 Efectos de las fibras en las propiedades físicas de las muestras Marshall

En la Figura 5 se muestran los resultados de densidad aparente medidos en las muestras Marshall con y sin fibras, en función del contenido de huecos presentes en la mezcla. Se puede observar que la relación entre el contenido de huecos y la densidad aparente de las muestras es lineal, y que la densidad se reduce proporcionalmente con el incremento del contenido de huecos.

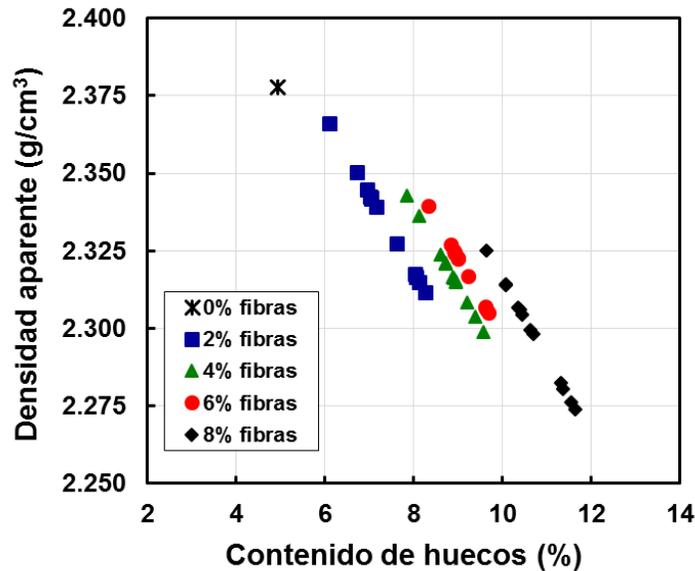


Figura 5. Resultados experimentales de densidad aparente de muestras Marshall en función del contenido de huecos.

Además, se puede observar que el valor máximo de densidad se obtuvo para la mezcla de referencia sin fibras cuya densidad aparente promedio es de 2.378g/cm^3 . Las muestras con un volumen de fibras de 2%, 4%, 6% y 8%, presentaron en promedio valores de densidad aparente más bajos: 2.335g/cm^3 , 2.318g/cm^3 , 2.319g/cm^3 , y 2.298g/cm^3 , respectivamente. Esta disminución de la densidad aparente con el incremento en el contenido de fibras en mezcla, se atribuye a cambios en la masa y volumen de las mezclas con fibras. De acuerdo con esto, la disminución de la densidad aparente para las mezclas con fibras, se atribuye principalmente a que la variación del volumen total de cada muestra es mayor a la variación de su masa neta, comparada con una mezcla asfáltica sin fibras. Además, se observa que las mezclas con una mayor cantidad de fibras presentan un mayor contenido de huecos. Por ejemplo, el menor contenido de huecos registrado fue para la mezcla de referencia sin fibras, cuyo valor promedio fue de 4.94%. Esto ocurre porque en las

muestras sin fibras, la superficie total es menor que en las mezclas con fibras. Sin embargo, se registró un aumento progresivo del contenido de huecos en mezclas con un 2%, 4%, 6% y 8% de fibras, donde se obtuvieron contenidos de huecos promedio de 7.34%, 8.82%, 9.14% y 10.68%, respectivamente. Se puede observar que en mezclas con un 8% de fibras se obtuvo el valor más alto de contenido de huecos, lo cual fue debido a que las mezclas con un mayor porcentaje de fibras tienen más probabilidades de tener fibras muy largas y por lo tanto un mayor incremento del volumen total en la mezcla debido a la formación de grupos de fibras o clústeres en su interior (ver Figura 3).

3.3 Influencia de las fibras en el módulo de rigidez de las muestras Marshall

En la Figura 6 se muestra la variación que existe entre todos los valores de módulo de rigidez obtenidos a través del ensayo a tracción indirecta sobre muestras Marshall en dirección longitudinal (A) y transversal (B), respectivamente.

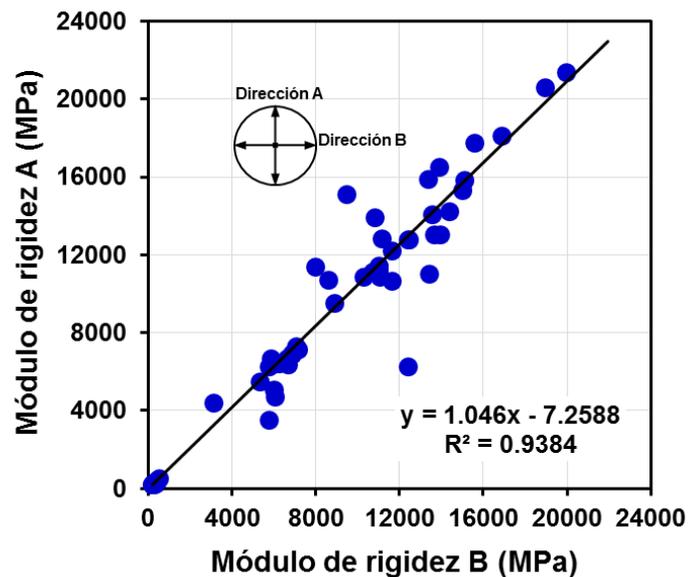


Figura 6. Variación de los valores de módulo de rigidez medidos en dirección longitudinal (A) y transversal (B) de muestras Marshall.

En general, se puede observar que los valores del módulo de rigidez en ambas direcciones se alinean en una recta de pendiente aproximada 1:1. De acuerdo con esto, se puede observar que independientemente del contenido de fibras y la temperatura de ensayo, los valores de módulo de

rigidez medidos en ambas direcciones (A y B), fueron similares para todas las muestras Marshall ensayadas. Por lo mismo, se puede considerar que las muestras Marshall con y sin fibras no tienen un comportamiento anisótropo; esto quiere decir que el módulo de rigidez en diferentes direcciones es similar. De este modo, para obtener el módulo de rigidez de cada muestra Marshall se puede calcular el promedio entre los módulos obtenidos durante el ensayo en las dos direcciones perpendiculares entre sí.

Por otra parte, en la Figura 7(a) se muestran los valores promedio de módulo de rigidez medidos en muestras Marshall con y sin fibras, en función de la temperatura de ensayo. Se puede observar que el módulo de rigidez se reduce con el incremento de la temperatura de ensayo, de 0°C a 40°C. En general, se puede decir que las muestras Marshall de referencia sin fibras (0% de fibras) presentaron valores mayores de módulos que los presentados por las mezclas con fibras, en muestras ensayadas a la misma temperatura. Sin embargo, cuando aumenta la temperatura de ensayo, esta diferencia de módulo de rigidez entre las mezclas asfálticas con y sin fibras se reduce (ver Figura 7(a)). Por ejemplo, mezclas asfálticas sin fibras y mezclas con un 4% de volumen de fibras a una temperatura de 0°C, muestran un módulo de rigidez promedio de 18540 y 12664 MPa, respectivamente; mientras que el módulo de rigidez promedio de las mismas mezclas asfálticas ensayadas a una temperatura de 20°C fue de 6788 MPa y 6278 MPa, respectivamente. La razón de este resultado es la pérdida de viscosidad que el betún sufre cuando la temperatura aumenta (de 0°C a 20°C), que se traduce en una disminución de la cohesión de los materiales que componen la mezcla asfáltica y la consecuente reducción del módulo de rigidez. Además, se puede observar que existe una diferencia notoria en los valores promedio del módulo de rigidez a distintas temperaturas. Por ejemplo, el mayor módulo de rigidez obtenido es para la mezcla de referencia sin fibras ensayada a 0°C cuyo valor promedio fue de 18540 MPa, y el menor módulo obtenido es para la mezcla con 6% de fibras ensayada a 40°C cuyo valor fue de 213 MPa. Ésta diferencia notoria se debe a la influencia de la temperatura en la mezcla asfáltica, específicamente en el mástico que está compuesto por cemento asfáltico, filler y fibras. Este comportamiento se debe principalmente a las características viscoelastoplásticas y a la susceptibilidad térmica de mezclas asfálticas (Valdés y Pérez, 2012). Es decir, a medida que aumenta la temperatura de la mezcla se reduce su viscosidad, aumentando la ductilidad. Por lo mismo, el mástico comienza a perder sus propiedades de resistencia a medida que aumenta la temperatura, debido a que se pierde la cohesión que aporta su viscosidad. Por el contrario, a bajas temperaturas el mástico se rigidiza y aporta

mayor resistencia, pero por otro lado fragiliza a la mezcla, llegando incluso a comportarse como una mezcla asfáltica de alto módulo alcanzando valores de módulo de rigidez superiores a 10000 MPa en muestras Marshall ensayadas a 0°C y 10°C (INV, 2007). Por otra parte, en la Figura 7(b) se muestran los resultados del módulo de rigidez medidos en las muestras Marshall con y sin fibras a distintas temperaturas, en función del contenido de huecos de la mezcla.

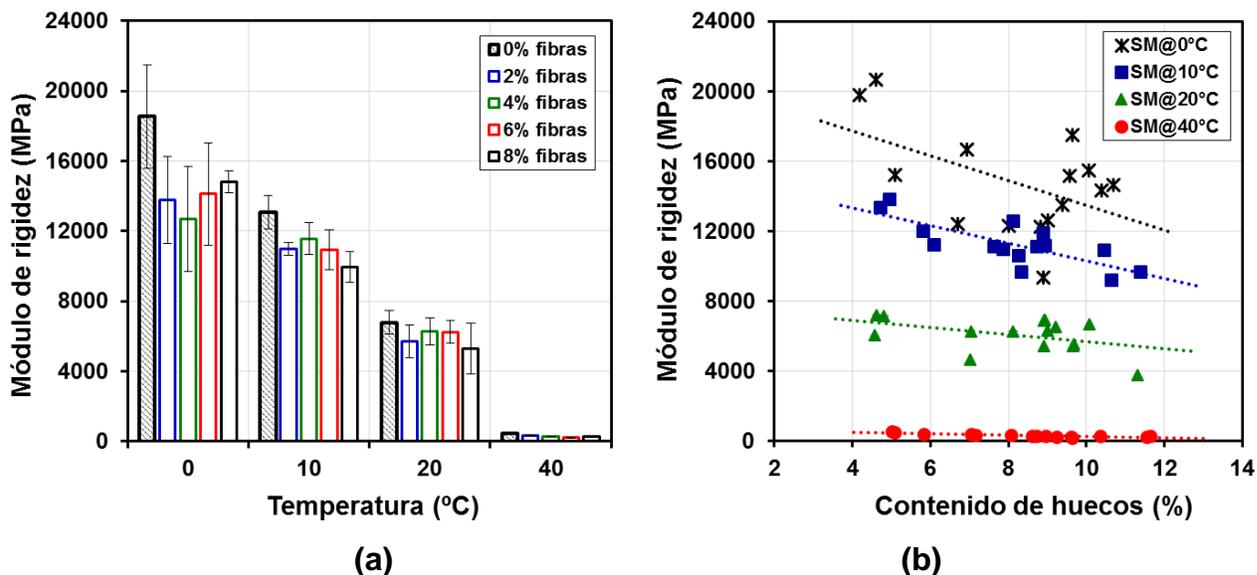


Figura 7. Resultados medios del módulo de rigidez en muestras Marshall en función: a) de la temperatura de ensayo y b) del contenido de huecos.

En esta Figura, se puede observar que independientemente del contenido de fibras, el módulo de rigidez se reduce ligeramente con el aumento del contenido de huecos, aunque el módulo se incrementa con la reducción de la temperatura debido al endurecimiento del cemento asfáltico (desde 40°C a 0°C), al igual que en la Figura 7(a). Sin embargo, dicha disminución en el módulo de rigidez respecto al contenido de huecos se ve reducido cuando la temperatura de ensayo aumenta. Por ejemplo, en muestras ensayadas a 40°C el mástico pierde viscosidad y deja de aportar resistencia, por lo que el contenido de huecos deja de ser relevante en las propiedades de rigidez de la mezcla a dicha temperatura. Por el contrario, en mezclas ensayadas a 0°C se observa que la disminución del valor del módulo de rigidez a dicha temperatura aumenta, debido a que la matriz asfáltica se rigidiza y aumenta la cohesión de los componentes de la mezcla. Por otro lado, las barras de error de la Figura 7(a) muestran la variabilidad en los resultados del módulo de rigidez de muestras Marshall. Es decir, si se toma una de las muestras estudiadas al azar, siempre existe al menos una muestra más, cuyo módulo de rigidez es prácticamente el mismo, independientemente

del porcentaje de fibras. Sin embargo, dichos efectos aún no quedan evidenciados. Debido a esto, y con el objetivo de evaluar la influencia del volumen de fibras en las muestras a distintas temperaturas, se ha calculado el ratio de variación del módulo de rigidez. Este ratio se define como el cociente entre el módulo de rigidez a una determinada temperatura de ensayo con un cierto volumen de fibras ($MR_{con\ fibras}$) y el módulo de rigidez a la misma temperatura de una mezcla sin fibras ($MR_{sin\ fibras}$). Este parámetro adimensional nos muestra la influencia de las fibras en el módulo de rigidez de las mezclas asfálticas. De este modo, el ratio queda definido por la ecuación (3).

$$Ratio = \frac{MR_{con\ fibras}}{MR_{sin\ fibras}} \quad (3)$$

Así, los valores de $Ratio > 1$ reflejan que el módulo de rigidez de mezclas con fibras es mayor que el módulo de mezclas sin fibras. En caso contrario, los valores de $Ratio < 1$ reflejan que el módulo de rigidez de mezclas con fibras es menor que el módulo de mezclas sin fibras. Por último, los valores de $Ratio = 1$ indican que el módulo de rigidez de mezclas con fibras es igual al módulo de mezclas sin fibras.

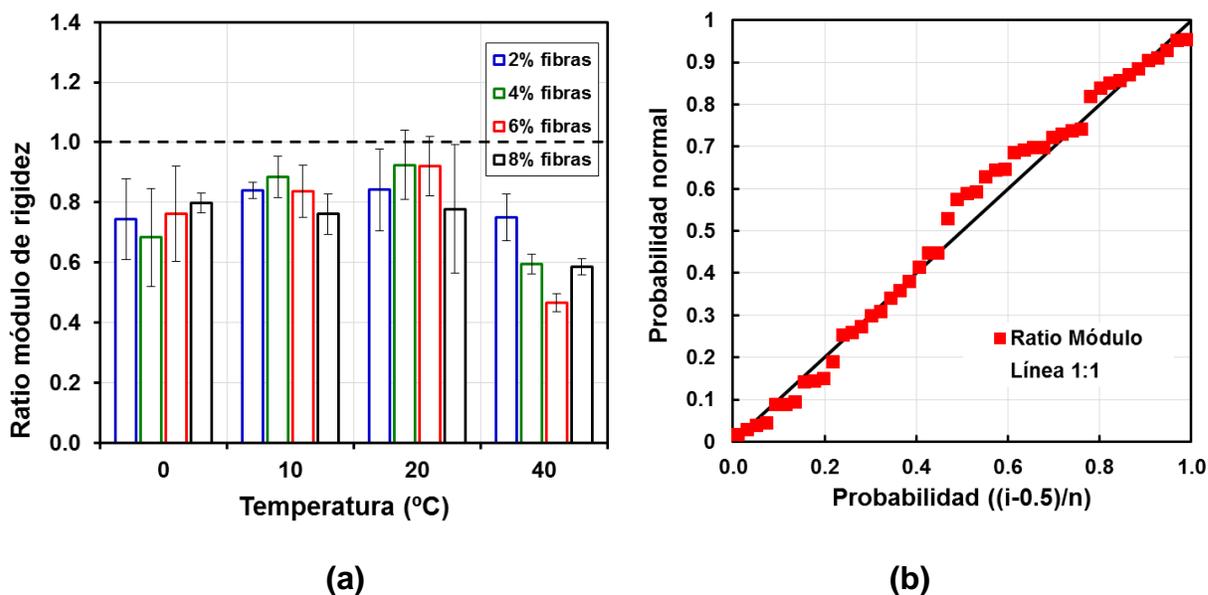


Figura 8. Valores de ratios de módulo de rigidez de muestras con fibras respecto a muestras sin fibras a) en función de la temperatura de ensayo b) gráfico probabilidad-probabilidad normal de los ratios.

En la Figura 8(a) se muestran los valores medios del ratio de módulo de rigidez de todas las muestras Marshall en función de la temperatura de ensayo. Como observación general, se puede ver que ningún valor promedio de ratio es mayor a 1, es decir, que ningún valor promedio de módulo de rigidez de mezclas con fibras supera al valor promedio de módulo de rigidez de mezclas sin fibras. Además, se puede observar que el mayor valor de ratio promedio fue de aproximadamente 0.92, para las muestras Marshall ensayadas a 20°C con 4% y 6% de fibras metálicas. En general, los mayores valores de ratios se presentaron a 20°C seguidos por los obtenidos en el caso de las muestras ensayadas a 10°C. Por otro lado, el menor valor de ratio promedio fue de 0.47, para las muestras ensayadas a 40°C con 6% de fibras metálicas. En general, los menores valores de ratios se mostraron a 40°C, seguidos por los obtenidos en el caso de las muestras ensayadas a 0°C. De acuerdo con esto, las mezclas con fibras presentaron un comportamiento muy similar con respecto a la mezcla de referencia a 20°C, incluso se puede observar que considerando las barras de error de los ratios a esa temperatura se llegan a valores muy cercanos a 1 (ver Figura 8(a)), esto quiere decir que las fibras a esa temperatura tienen escasa influencia en el módulo de rigidez. En el caso de las muestras ensayadas a 20°C, los valores de ratio son notoriamente cercanos a 1, pero con el objetivo de analizar en profundidad la influencia de las fibras en el módulo de rigidez a las demás temperaturas de ensayo se realizó un análisis estadístico mostrado en la Figura 8(b). En esta Figura, se ha representado el gráfico de probabilidad-probabilidad para todos los valores de ratios de módulos de rigidez obtenidos del ensayo a tracción indirecta, independientemente del porcentaje de fibras y de la temperatura, usando una función de distribución Normal. En esta Figura, se puede observar que todos los resultados se pueden alinear a una recta con pendiente 1:1. Esto significa que el porcentaje de fibras no afecta significativamente al módulo de rigidez de muestras Marshall, independientemente de la temperatura de ensayo. De este modo, la diferencia de los valores del módulo entre las muestras ensayadas con y sin fibras de lana de acero es debido a la dispersión de resultados. Por lo tanto, se concluye que ni el contenido de fibras, ni la temperatura de ensayo tienen una influencia significativa en el módulo de rigidez de las mezclas asfálticas. Sin embargo, como el objetivo final de esta investigación es la auto-reparación de mezclas asfálticas usando calentamiento por microondas, las mezclas asfálticas con diferentes contenidos de fibras pueden ser útiles para los objetivos de este proyecto.

4 CONCLUSIONES

Esta investigación se ha centrado en evaluar la influencia de las fibras de lana de acero en las propiedades físicas y mecánicas de una nueva mezcla asfáltica a 4 diferentes temperaturas. De este modo, en base al análisis de resultados realizado, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se ha concluido que las fibras de lana de acero se dañaron por el proceso de mezclado y compactación Marshall. Esto pudo deberse al impacto de los áridos durante el proceso de mezclado y compactación mecánica usando el martillo Marshall.
- Por otro lado, respecto a las propiedades físicas de las mezclas asfálticas, se ha concluido que la densidad aparente disminuye linealmente con el aumento de contenido de huecos. Además, se encontró que la densidad aparente promedio de la mezcla se reduce con el aumento del volumen de fibras metálicas. Esta disminución se atribuye principalmente a la variación en el volumen total de cada muestra.
- Respecto al contenido de huecos en las mezclas asfálticas, se observó que las mezclas con una mayor cantidad de fibras presentaron un mayor contenido de huecos. Este aumento se atribuye a que las mezclas con mayor volumen de fibras tienen más probabilidades de formar clústeres en su interior, y por lo tanto un incremento en el volumen total de la mezcla.
- Además, se comprobó que los valores de módulos de rigidez obtenidos en las muestras Marshall en dirección longitudinal y transversal, fueron similares para todas las muestras ensayadas. Por lo tanto, se concluye que las muestras Marshall con fibras no presentaron un comportamiento anisótropo de acuerdo a la variable mecánica medida.
- Por otro lado, se encontró que el módulo de rigidez se redujo con el incremento de la temperatura de ensayo. Esto pudo deberse a la pérdida de viscosidad que el cemento asfáltico sufre cuando la temperatura aumenta, lo que se traduce en una disminución de la cohesión de los materiales que componen la mezcla asfáltica.

- También se determinó que independientemente del contenido de fibras, el módulo de rigidez se redujo ligeramente con el aumento del contenido de huecos, lo cual pudo deberse a que el aumento del contenido de huecos disminuye la resistencia mecánica del material.

- Por otra parte, se comprobó que el contenido de fibras y la temperatura de ensayo no presentaron una influencia significativa en el módulo de rigidez de las mezclas asfálticas, y que la diferencia en valores de módulo entre las muestras ensayadas con y sin fibras de lana de acero fue debida a la dispersión en los resultados. Además, se encontró que ningún valor promedio de módulo de rigidez de mezclas con fibras superó al valor promedio de módulo de mezclas asfálticas de referencia.

- Finalmente, en este estudio no se ha encontrado un porcentaje óptimo de fibras que pueda incrementar el módulo de rigidez. Sin embargo, como el objetivo final de esta investigación es la auto-reparación de mezclas asfálticas usando calentamiento por microondas, mezclas asfálticas con diferentes contenidos de fibras pueden ser útiles para los objetivos de este proyecto.

5 REFERENCIAS

Airey G, Choi Y. (2002). State of the art report on moisture sensitivity test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, 3(4):355-372.

Airey G. (2003). State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, 4(3):165-176.

Bennert T. (2012). Advanced Characterization Testing of Fiber Reinforced Hot Mix Asphalt. Rutgers University, Piscataway, New Jersey.

Delgadillo R, Wahr C, García G, González A. (2012). Asphalt Technology in Chile, Leading Research and Practice. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 81:775-795.

EN 12697-26:2012 (Annex C). Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stiffness. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

Fitzgerald R. (2000). Novel applications of carbon fiber for hot mix asphalt reinforcement and carbon- carbon pre-forms. MSc Thesis. Michigan Technological University, USA.

Gallego, J, del Val Miguel A, Contreras V, Paez A. (2013). Heating asphalt concrete with microwaves to promote self-healing. *Construction and Building Materials*, 42:1-4.

García A, Norambuena-Contreras J, Pacheco-Bueno M, Partl MN. (2015). Single and multiple healing of porous and dense asphalt concrete. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26:425-433.

García A, Norambuena-Contreras J, Partl MN, Schuetz P. (2013). Uniformity and mechanical properties of dense asphalt concrete with steel wool fibers. *Construction and Building Materials*, 43:107-117

Instituto Nacional de Vías. (2007). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 450-07. Bogotá, Colombia.

Khattak M, Kyatham V. (2008). Viscoelastic behavior of hydrated lime-modified asphalt matrix and hot-mix asphalt under moisture damage conditions. *Transportation Research Record*, 2057:64-74.

Liu Q. (2012). Induction healing of porous asphalt concrete. Ph.D. Thesis. TU Delft, the Netherlands.

Mahrez A, Karim M, Katman H. (2003). Prospect of using glass fiber reinforced bituminous mixes. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5:794-807.

McDaniel RS. (2015). NCHRP Synthesis 475: Fiber additives in asphalt mixtures. Report to American Association of State Highway and Transportation Officials. *Transportation Research Board*, Washington DC, USA.

MOP. (2014). Memoria Anual de la Dirección de Vialidad: Red Vial Nacional Dimensionamiento y Características. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.

Norambuena J. (2013). Hydraulic and mechanical behaviour of materials used in road pavement construction. Ph.D Thesis. University of Cantabria, Spain.

Norambuena-Contreras J, Arbat G, García Nieto P, Castro-Fresno D. (2012). Nonlinear numerical simulation of rainwater infiltration through road embankments by FEM. *Applied Mathematics and Computation*, 219:1843-1852.

Norambuena-Contreras J, Castro-Fresno D, Vega-Zamanillo A, Celaya M, Lombillo-Vozmediano I. (2010). Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test. *NDT&E Int*, 43(7):629-634.

Norambuena-Contreras J, González-Torre I, Sánchez M, Dowling R. (2015). Development of a new asphalt mixture with self-healing properties, In: press. 18th Ibero-Latin American Asphalt Congress, CILA-XVIII2015, Bariloche, Argentina.

Sun Y, Liu Q, Wu S, Shang F. (2014). Microwave heating of Steel slag asphalt mixture. *Key Engineering Materials*, 599:193-197.

Thenoux G, González A, Dowling R. (2007). Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile. *Resources, Conservation and Recycling*, 49:325-339.

Valdés G, Pérez F. (2012). Mecanismos de Fisuración en Pavimentos Bituminosos. Académica Española, Barcelona.

Wu S, Mo L, Shui Z, Chen Z. (2005). Investigation of the conductivity of asphalt concrete with conductive fillers. *Carbon*, 43(7):1358-1363.

Ye Q, Wu S, Ling N. (2009). Investigation of the Dynamic and Fatigue Properties of Fiber-Modified Asphalt Mixtures. *International Journal of Fatigue*, 31:1598-1602