

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. GONZALO VALDÉS VIDAL

(Universidad de La Frontera)

**MEDIDA DE LA RESISTENCIA AL
AGRIETAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
REFORZADAS CON FIBRAS USANDO EL
ENSAYO FÉNIX**

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

CAMILA SANHUEZA SOTO

Concepción, Marzo de 2016

DEDICATORIA

A mis queridos padres...

AGRADECIMIENTOS

Agradezco ampliamente a mi profesor guía Dr. José Norambuena por su buena disposición y por su gran ayuda, no sólo para el desarrollo de esta memoria de título, sino por sus enseñanzas que me acompañarán a lo largo de mi vida. Además destacar su calidad como persona, agradezco su preocupación y entrega. Agradezco también a la profesora Irene González-Torre por su colaboración y afabilidad, presentes durante todo este proceso.

De igual forma agradecer a mi profesor co-director Dr. Gonzálo Valdés por la entrega de conocimientos e incondicional colaboración al disponer de todos los medios necesarios para la realización de los ensayos mecánicos en el Laboratorio de Asfaltos de la Universidad de La Frontera (Temuco). Además, destacar a Don Daniel Oliva por su gran ayuda en la ejecución de los ensayos y su buen humor.

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 N°11140103 del que forma parte este estudio.

Agradezco a Dios y a mi familia. A mis padres por estos 24 años de enseñanzas, apoyo incondicional y cariño. A mi padre por despertar en mí el gusto por la ingeniería, por sus sólidos consejos tanto en mi formación valórica como profesional. A mi madre por su inagotable e infinita entrega y por acompañarme en buenos y malos momentos con una palabra de apoyo y su amor de madre. También destacar a mis hermanos Cristhofer y Rolando por su indudable disposición y ayuda, que me han acompañado durante estos años de estudio y a lo largo de mi vida.

También agradezco a Álvaro por su apoyo, cariño, disposición y consejos. Sin duda durante el camino recorrido durante este año ha sido un pilar fundamental, en el desarrollo de esta memoria de título y en mi vida.

Finalmente agradecer inmensamente a la familia Aguilera Bournás por ser mi familia, por recibirme como una hija en su casa y acogerme durante todos estos años. Por su gran preocupación y cariño incondicional, por lo que me sentiré eternamente agradecida. En especial quiero destacar a mi amiga María Ignacia, por ser amiga, hermana y por estos lindos años de amistad.

MEDIDA DE LA RESISTENCIA AL AGRIETAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS REFORZADAS CON FIBRAS USANDO EL ENSAYO FÉNIX

Camila Sanhueza Soto
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
camsanhu@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 la resistencia al agrietamiento 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 directa Fénix, evaluando la influencia de las fibras en la resistencia al agrietamiento de muestras tipo Fénix pre-acondicionadas a cuatro diferentes temperaturas: -10°C, 0°C, 10°C y 20°C. Finalmente, los principales resultados y análisis de este estudio se presentan en este documento.

Palabras claves: mezcla asfáltica; fibras metálicas; propiedades físicas y mecánicas; ensayo Fénix; resistencia al agrietamiento.

Conteo de palabras: 5714 + 10 Figuras/Tablas*250 + 1 Figura/Tabla* 500 = 8714 Palabras Totales.

MEASURE OF CRACK RESISTANCE OF ASPHALT MIXTURE REINFORCED WITH FIBERS THROUGH FENIX TEST

Camila Sanhueza Soto
Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío
camsanhu@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 cracking resistance of fiber-reinforced asphalt mixtures. With this purpose, five different semi-dense 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, Fenix direct tensile test was used to evaluate the influence of fibers on the cracking resistance of Fenix samples pre-conditioned at four different temperatures: -10°C , 0°C , 10°C and 20°C . Finally, main results and their analysis are presented in this document.

Keywords: asphalt mixture; metallic fibers; physical and mechanical properties; Fenix test; cracking resistance.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	HIPÓTESIS	2
1.3	OBJETIVOS	2
	<i>1.3.1. Objetivos generales.....</i>	<i>2</i>
	<i>1.3.2. Objetivos específicos.....</i>	<i>3</i>
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 LONGITUD Y DIÁMETRO DE LAS FIBRAS	5
2.5	MORFOLOGÍA DE LAS FIBRAS	6
2.6	MEDIDA DE LA RESISTENCIA AL AGRIETAMIENTO USANDO ENSAYO FÉNIX.....	7
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
3.1	MORFOLOGÍA DE LAS FIBRAS ANTES Y DESPUÉS DEL MEZCLADO Y COMPACTACIÓN MARSHALL	9
3.2	EFFECTOS DE LAS FIBRAS EN LA DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUECOS.....	12
3.3	RESISTENCIA AL AGRIETAMIENTO EN MUESTRAS CON FIBRAS.....	13
4	CONCLUSIONES	18
5	REFERENCIAS.....	21

ÍNDICE DE TABLAS

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

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ensayo Fénix: (a) Esquema, (b) curva fuerza-desplazamiento	7
Figura 2. Muestras Fénix.	9
Figura 3. Resultados del análisis de probabilidad sobre la longitud de las fibras: (a) gráfico de probabilidad-probabilidad Weibull, (b) histograma de frecuencias.	11
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. .	12
Figura 5. Resultados experimentales de densidad aparente en probetas Marshall en función del contenido de huecos en mezcla.....	13
Figura 6. Resultados experimentales de fuerza máxima en función al contenido de huecos.	14
Figura 7. Resultados: (a) Fmax promedio y (b) índice de rigidez a la tracción medio en relación a la temperatura.....	15
Figura 8. Resultados de índice de tenacidad medio en relación a la temperatura de ensayo.....	16
Figura 9. Valores promedio de Ratio de muestras Fénix con fibras en función de la temperatura de ensayo.....	17
Figura 10. Gráfico probabilidad-probabilidad de fuerza máxima de tracción.....	18

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 (Norambuena-Contreras, 2013). 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 (fibras de origen vegetal, sintético y mineral) en el diseño de nuevas mezclas asfálticas (McDaniel, 2015). Referente a las fibras minerales, las fibras metálicas son conocidas por aumentar las características de resistencia, fatiga y ductilidad en materiales compuestos (Fitzgerald, 2000). Además, algunas 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 de 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 (Norambuena-Contreras et al. 2015). Adicionalmente, las fibras pueden contribuir a prevenir la formación y propagación de grietas (McDaniel, 2015). Específicamente, como las fibras tienen una alta resistencia a la tracción en relación a las mezclas asfálticas, éstas 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 un pavimento (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 la resistencia al agrietamiento 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 del ensayo de tracción directa Fénix, se ha evaluado la influencia de las fibras en la resistencia al agrietamiento de muestras tipo Fénix pre-acondicionadas a cuatro diferentes temperaturas.

1.2 Hipótesis

- La mezcla asfáltica reforzada con fibras de lana de acero puede presentar ventajas en la resistencia mecánica al agrietamiento frente a una mezcla asfáltica sin fibras.
- El ensayo Fénix puede ser un ensayo mecánico útil para la comparación entre las mezclas con distinto contenido de fibras.

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

- Evaluar la influencia de las fibras de lana de acero en la resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas reforzadas con fibras.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades físicas de la mezcla con 5 diferentes contenidos de fibras.
- Medir la resistencia mecánica al agrietamiento de las mezclas a 4 distintas temperaturas.
- Realizar un análisis comparativo entre las variables físicas y mecánicas medidas.
- Definir un porcentaje óptimo de fibras para mejorar la resistencia al agrietamiento bajo distintas temperaturas.

1.4 Declaración de autor

Finalmente, parte de esta Tesis corresponde a una traducción al idioma Español del artículo científico:

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.

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/cm^3), árido fino o arena (entre los tamices 0.08-5mm y densidad 2.721g/cm^3), y filler (tamiz $<0.08\text{mm}$ y densidad 2.813g/cm^3). 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/cm^3 . 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/cm^3 . 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 cambiando 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, siempre 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, estos 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 30 probetas Marshall: 24 con fibras y 6 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 probetas 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 por cada tipo de mezcla, se ha calculado la densidad máxima teórica sin huecos para cada tipo de mezcla. 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 6 probetas por cada diseño de mezcla con fibras y 6 probetas para las mezclas sin fibras.

2.4 Determinación de longitud y diámetro de las fibras

Para determinar la longitud de las fibras añadidas a las mezclas, inicialmente 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 píxeles 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 de la resistencia al agrietamiento usando ensayo Fénix

La resistencia a la fisuración fue analizada por medio del ensayo Fénix, que corresponde a un ensayo no tradicional desarrollado en el Laboratorio de Caminos la Universidad Politécnica de Cataluña. Este ensayo simula el principal mecanismo de fisuración que las mezclas asfálticas desarrollan en las estructuras de pavimentos, el Modo I de fractura (Valdés y Pérez, 2012). Este procedimiento consiste en someter media probeta cilíndrica a esfuerzos de tracción directa hasta provocar la propagación de una fisura inducida previamente. Las probetas Fénix son fijadas a dos placas de acero, y, previamente al ensayo, son acondicionadas a las temperaturas establecidas. Las placas son fijadas mediante rotulas de libre rotación a los pistones de la prensa de ensayo, los cuales se desplazan en sentido vertical a una velocidad constante de 1mm/min. De forma paralela se van registrando los valores de fuerza y desplazamiento hasta que la carga haya disminuido al valor de 0,1kN, momento en el cual se da por finalizado el ensayo. Con los datos adquiridos se construye una curva fuerza-desplazamiento, que permite obtener los parámetros mecánicos que caracterizan la resistencia a fisuración de las mezclas asfálticas, tal cual se observa en la Figura 1.

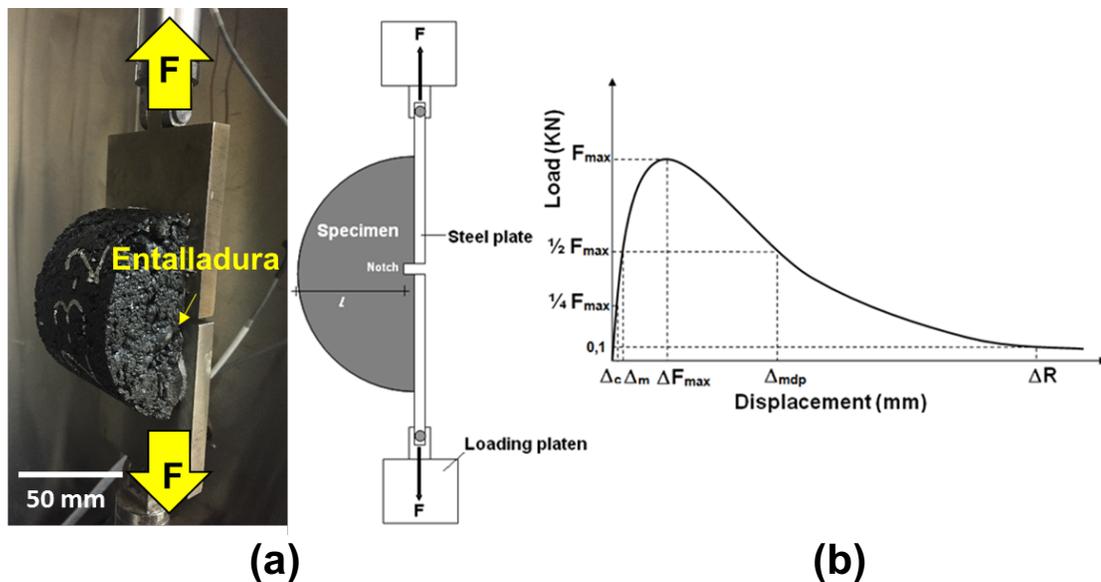


Figura 1. Ensayo Fénix: (a) esquema, y (b) curva fuerza-desplazamiento

Los principales parámetros obtenidos del ensayo Fénix y analizados en este estudio corresponden a:

- **Carga máxima de tracción (F_{max}).** Corresponde al mayor valor alcanzado por la probeta ante los esfuerzos de tracción a los cuales es sometido.

- **Índice de rigidez a tracción (IRT).** Este parámetro establece un indicador del grado de rigidez de la mezcla asfáltica.

$$IRT = \frac{1/2 F_{max} - 1/4 F_{max}}{\Delta m - \Delta c} \quad (2)$$

Donde

IRT : Índice de rigidez a tracción (kN/mm)

F_{max} : Carga máxima (kN)

Δm : Desplazamiento antes de la carga máxima a 1/2 F_{max} (mm).

Δc : Desplazamiento antes de la carga máxima a 1/4 F_{max} (mm).

- **Energía disipada por unidad de superficie (G_D).** Es el trabajo realizado en el proceso de fisuración dividido en el área de fractura. Representa la fuerza de adhesión de los materiales que componen la mezcla asfáltica.

$$G_D = \frac{\int_0^{\Delta R} F(x) dx}{S} \quad (3)$$

Donde

G_D : Energía disipada en el proceso de fisuración (J/m²)

F : Carga (kN)

x : Desplazamiento (mm)

ΔR : Desplazamiento de rotura (mm)

S : Área de fisuración (m²)

- **Índice de Tenacidad (IT).** Corresponde a la tenacidad de las mezclas asfálticas, es decir, la capacidad de mantener los componentes unidos una vez que ya se ha alcanzado la carga máxima, o bien, ha comenzado el proceso de fisuración.

$$IT = \frac{\int_0^{\Delta R} F(x) dx - \int_0^{\Delta F_{max}} F(x) dx}{S} \cdot (\Delta_{mdp} - \Delta_{F_{max}}) \quad (4)$$

Donde

I_T : Índice de tenacidad ($J \text{ mm/m}^2$).

F : Carga (kN)

$\Delta_{F_{\max}}$: Desplazamiento a F_{\max} (mm).

Δ_{mdp} : Desplazamiento post carga máxima a $\frac{1}{2} F_{\max}$ (mm).

S : Área de fisuración (m^2)

Para evaluar la propiedad de resistencia a la fisuración se fabricaron y ensayaron 3 muestras por cada volumen de contenido de fibras de lana de acero, ver Figura 2. Éstas se evaluaron a 4 temperaturas de ensayo: -10°C , 0°C , 10°C y 20°C .



Figura 2. Muestras para ensayo Fénix.

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 ajustado a una función de distribución de probabilidad tipo Weibull, ver Figura 3. Este resultado puede ser considerado un buen ajuste debido a que todos los datos, independientemente 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 analizaron la longitud de fibras en materiales compuestos. En este análisis se ha empleado la 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. A partir de esta Figura, se puede demostrar que independiente 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.

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 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).

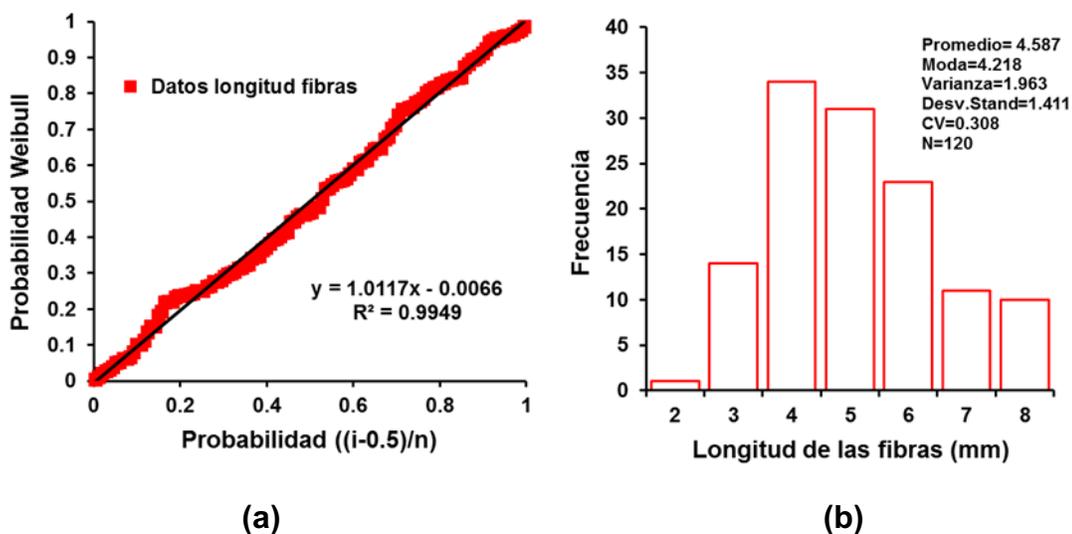


Figura 3. Resultados del análisis de probabilidad sobre la longitud de las fibras: (a) gráfico de probabilidad-probabilidad Weibull, (b) histograma de frecuencias.

Con el fin de confirmar este resultado, se ha realizado 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 susceptible al impacto de los áridos durante los procesos de mezclado y compactación usando el martillo Marshall.

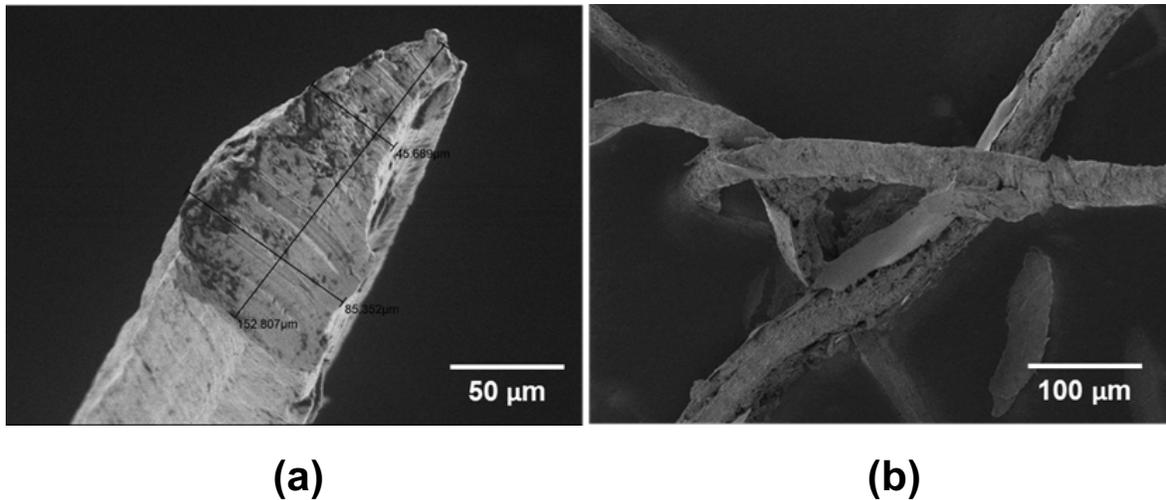


Figura 4. Imágenes SEM de la fibra de lana de acero antes y después del mezclado y compactación Marshall: (a) aspecto superficial de una fibra de lana de acero y sección transversal antes del mezclado, (b) fibras individuales dañadas por aplastamiento y corte.

3.2 Efectos de las fibras en la densidad y contenido de huecos

En la Figura 5 se muestran los resultados experimentales de densidad aparente en probetas Marshall con y sin fibras, en función del contenido de huecos en la mezcla. En esta Figura se puede observar que la relación entre la densidad aparente y el contenido de huecos es lineal y que la densidad aparente se reduce proporcionalmente al aumentar el contenido de huecos. El valor máximo promedio registrado de densidad aparente fue $2,350\text{gr}/\text{cm}^3$ de la mezcla con un 0% de contenido de fibras. Las mezclas con un volumen de fibras de 2%, 4%, 6% y 8% registraron valores de densidad aparente promedio más bajos en comparación con la densidad máxima: de $2.329\text{gr}/\text{cm}^3$, $2.329\text{gr}/\text{cm}^3$, $2.304\text{gr}/\text{cm}^3$ y $2.287\text{gr}/\text{cm}^3$, respectivamente. Esto se debe a la variación de masa y volumen que tiene la mezcla al incorporarle fibras de lana de acero. Sin embargo, la variación de la densidad aparente para las mezclas con fibras, se atribuye principalmente a la variación del volumen total de cada muestra más que a la variación de su masa neta, comparado con una mezcla asfáltica sin fibras. Además, en la Figura 5 se observa que el contenido de huecos va aumentando a medida que se incrementa el contenido de fibras en la mezcla. El menor contenido de huecos se registró para la mezcla con un volumen de fibras de un 0%. Esto se debe a que en la superficie específica total es menor en comparación a las mezclas con fibras. De este modo, las mezclas con 2%, 4%, 6% tuvieron un porcentaje de huecos mayor a la mezcla de referencia y valores cercanos entre ellos: 7.55%, 8.41%, 9.71% respectivamente. Sin embargo la mezcla con un 8% de fibras registró un contenido de huecos de un 11.13%, porcentaje superior a las demás mezclas evaluadas.

Esto puede deberse a la dificultad para compactar que genera un mayor contenido de fibras y a que se pueden formar grupos de fibras (clústers) en el interior de la mezcla debido a una mala distribución de las fibras.

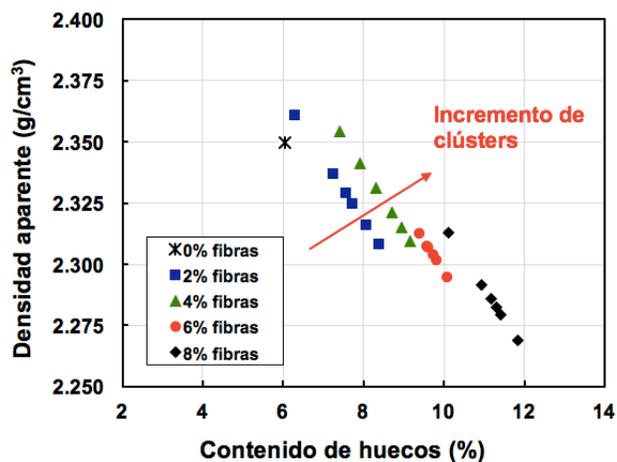


Figura 5. Densidad aparente en probetas Marshall en función del contenido de huecos en mezcla.

3.3 Resistencia al agrietamiento en muestras con fibras

En la Figura 6 se muestran los resultados experimentales de la fuerza máxima resistida por las mezclas en el ensayo Fénix en relación al contenido de huecos, para las diferentes temperaturas de ensayo. En esta Figura se observa que los valores de fuerza máxima a tracción disminuyen a medida que aumenta la temperatura y el contenido de huecos. Por otro lado, en la Figura 7 (a y b) se muestran los resultados promedios de fuerza máxima e índice de rigidez a la tracción de las muestras Fénix con y sin fibras en relación con la temperatura de ensayo, respectivamente. En estas Figuras se observa que la temperatura influye en la carga máxima y en la rigidez de las muestras analizadas. Se obtienen valores altos de fuerza máxima y de índice de rigidez a la tracción para bajas temperaturas, y estos se reducen a medida que va aumentando la temperatura. Esto se debe a que el cemento asfáltico pierde viscosidad cuando la temperatura aumenta, lo que resulta en la disminución de la cohesión y resistencia de la mezcla asfáltica. Por ejemplo, a temperaturas bajas (-10°C y 0°C) la mezcla sin fibras registró valores altos de fuerza máxima con 2.706kN y 2.827kN, respectivamente.

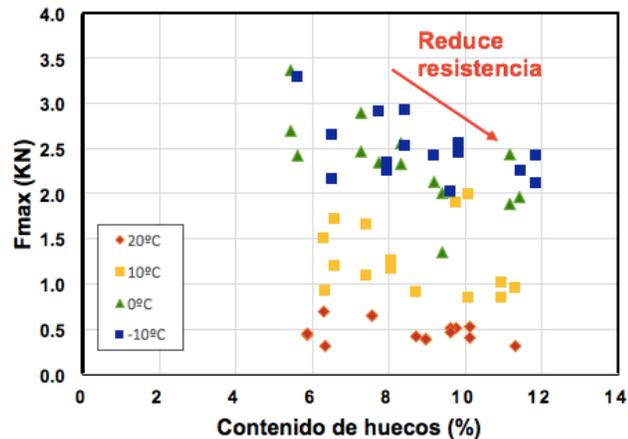


Figura 6. Fuerza máxima en función al contenido de huecos.

Por otro lado, para la temperatura de 10°C el máximo valor de fuerza lo registró la mezcla con 6% de contenido de fibras con 1.519kN. En cambio a 20°C la resistencia máxima a tracción alcanzada fue de 0.666kN en la muestra con 2% de volumen de fibras. Como se observa en la Figura 7(a), para las temperaturas -10°C y 0°C las fibras disminuyen la resistencia a la tracción de las muestras. Por otro lado para las temperaturas de 10°C y 20°C las fibras incrementan la resistencia a la tracción. Esto se debe a que a temperaturas bajas la matriz asfáltica se comporta como un sólido rígido con comportamiento frágil (valores altos de F_{max} y IRT), por lo que las fibras no aportan resistencia a la tracción, ya que se rompen junto con el mastico, disipando poca energía en el proceso de fisuración. Por otro lado una mezcla sin fibras, que se comporta como un material compuesto, donde el agrietamiento comienza por el cemento asfáltico y una vez este se rompe, la fibra opone resistencia a la fisuración. Para mejorar la comprensión de este comportamiento, los resultados de índice de tenacidad (IT) y energía disipada (GD) se presentan en la Figura 8 (a y b), respectivamente. En las figuras se observa que la temperatura influye en el índice de tenacidad. Tal como se muestra en la Figura 7(b), a medida que disminuye la temperatura, la rigidez del material se incrementa. Esta tendencia también se ve reflejada en la Figura 8(a), donde a temperaturas bajas (-10°C y 0°C) un material rígido tiene un comportamiento frágil, por lo que la mezcla asfáltica tiene poca capacidad de mantener sus componentes unidos posterior a la carga máxima, solicitando una cantidad alta cantidad de energía para lograr agrietarse (ver Figura 8(b)). Esto se debe a que su rotura ocurre en forma súbita. Por otro lado, para temperaturas altas (10°C y 20°C) las mezclas asfálticas tienen una mayor capacidad de mantener sus componentes unidos (ver Figura 8(a)), y los efectos de rotura ocurren lentamente. Esto se debe a la mayor capacidad de admitir deformación que presenta la mezcla.

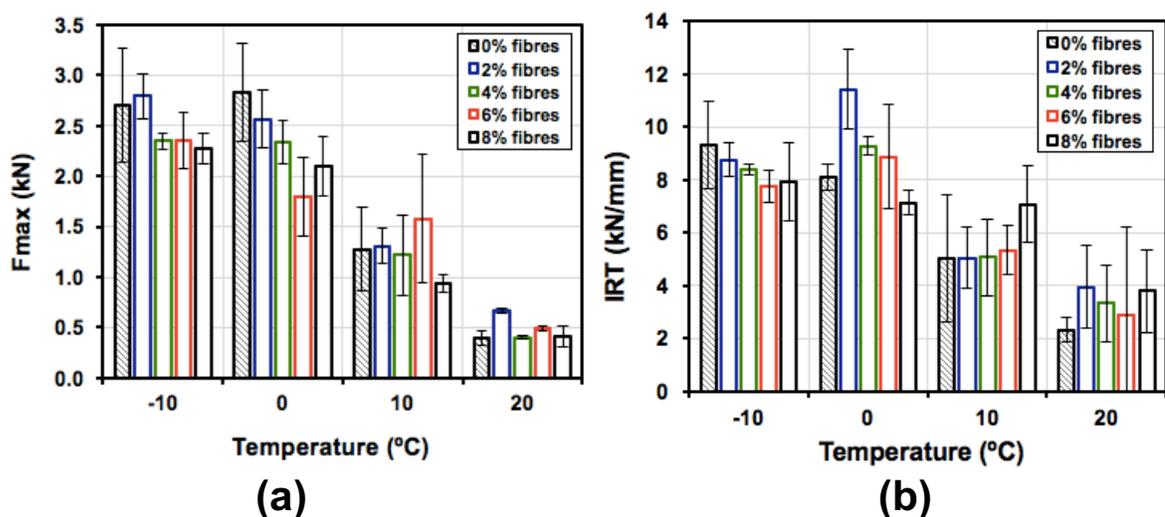


Figura 7. Resultados: (a) Fmax promedio y (b) índice de rigidez a la tracción (IRT) promedio en función de la temperatura de ensayo.

Por ejemplo, a -10°C , la muestra con 8% de volumen de fibras registró el valor mas alto de índice de tenacidad, con 113.94Jmm/m^2 , seguido por 4%, 2%, y 6%, con valores de 27.57Jmm/m^2 , 24.63Jmm/m^2 y 15.15Jmm/m^2 , respectivamente. El menor valor registrado fue el de la muestra de referencia con 9.39Jmm/m^2 . Por lo que se observa que para esta temperatura la fibra mejora la capacidad de las muestras de mantener sus componentes unidos.

Por otro lado, a 20°C el mayor índice de tenacidad lo registró la muestra con 8% de contenido de fibras con un valor de 112.1Jmm/m^2 , seguido por las muestras de 6%, 4% y 2% con valores de 66.99Jmm/m^2 , 41.82Jmm/m^2 y 6.85Jmm/m^2 , respectivamente. Si bien el índice de tenacidad fue aumentando a medida que se incrementaba el contenido de fibras en las muestras, la muestra de referencia registró un valor intermedio 55.83Jmm/m^2 , por lo que se deduce que solo un 6% y un 8% mejoran el índice de tenacidad en la mezcla para esta temperatura. Por otra parte, las barras de error de la Figura 8 muestran la variabilidad de los resultados del índice de tenacidad por temperatura de ensayo. Ésta es amplia, por lo que se deduce que el uso de fibras no aumenta el índice de tenacidad en una mezcla asfáltica.

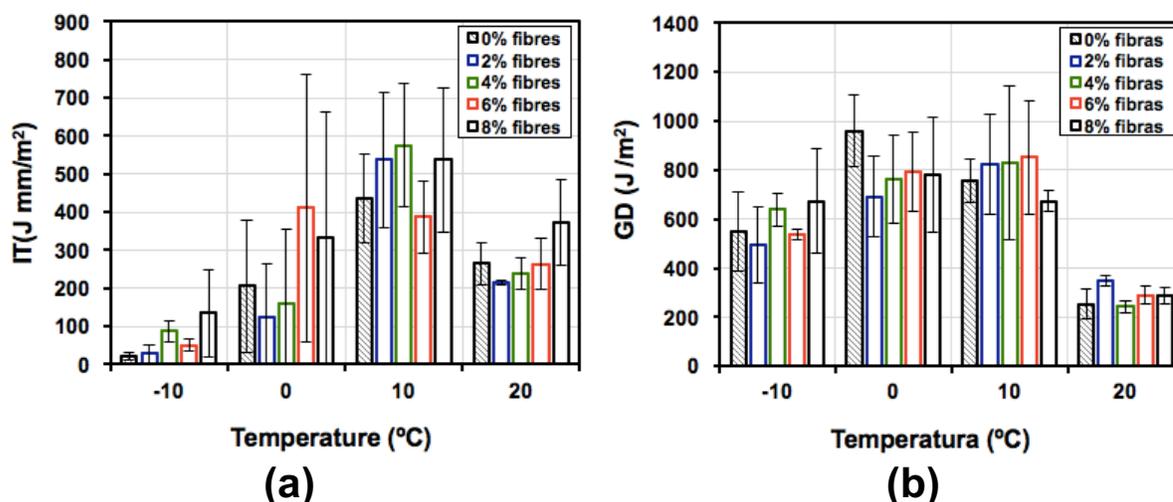


Figura 8. Resultados: (a) índice de tenacidad (IT) promedio y (b) energía disipada (GD) media en función de la temperatura de ensayo.

Por otro lado, las barras de error de la Figura 7(a) muestran gran variabilidad en los resultados de la carga máxima. Es decir, si se toma una de las muestras estudiadas al azar por temperatura de ensayo, siempre existe al menos una muestra más, cuya carga máxima a tracción es prácticamente la misma, independientemente del volumen de fibras. Esto sugiere que el contenido de fibras y temperatura de ensayo en las muestras no es significativo. 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. Este se define como el cociente entre la carga máxima de la muestra de referencia y la carga máxima de las muestras con distinto contenido de fibras. De este modo, el Ratio se calcula de acuerdo a la ecuación (5):

$$Ratio = \frac{F_{max.T_i ref.}}{F_{max.T_i}} \quad (5)$$

Donde $F_{max.T_i ref.}$ es la carga máxima promedio de la muestra de referencia y $F_{max.T_i}$ es la carga máxima de cada muestra analizada. El Ratio toma como referencia la carga máxima a tracción promedio de las muestras con 0% volumen de fibras y la compara con la carga máxima a tracción de cada muestra con distinto volumen de contenido de fibras, teniendo en cuenta que ambas hayan sido ensayadas a la misma temperatura. Así, los valores de Ratio < 1 reflejan que la muestra que contiene fibras tiene una carga máxima mayor a la muestra de referencia. En caso contrario, los valores de Ratio > 1 reflejan que la muestra de referencia tiene una carga máxima mayor a la

muestra que contiene fibras. Por último, los valores de Ratio = 1 indican que los valores de carga máxima para la muestra con 0% contenido de fibras y la que contiene fibras son iguales.

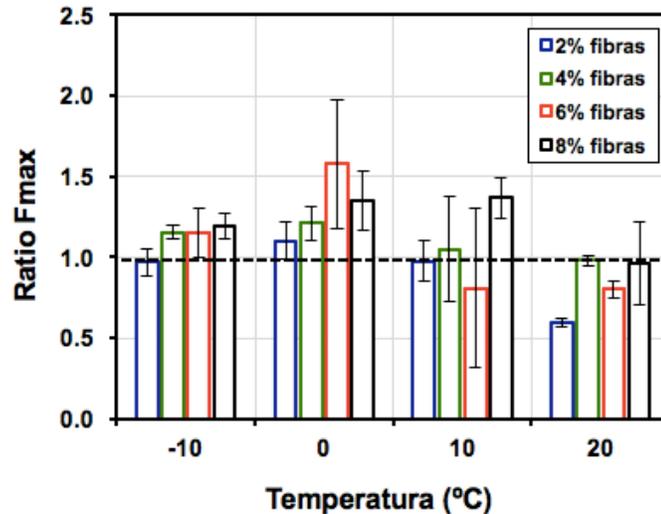


Figura 9. Valores promedio de Ratio de muestras Fénix con fibras en función de la temperatura de ensayo.

De acuerdo a lo anterior, en la Figura 9 se muestran los valores promedio del Ratio de la carga máxima de todas las muestras en relación con la temperatura de ensayo. Como se observa en esta figura, para las temperaturas de -10°C y 0°C los valores de Ratio son mayores a 1, lo que evidencia que la muestra de referencia es más resistente a la tracción en comparación a las que contienen fibras. Particularmente a -10°C la muestra Fénix con 2% de contenido de volumen de fibras tiene un Ratio de 0.97, es decir presenta una resistencia a la tracción mayor en comparación con la muestra de referencia. Como se observa en la Figura 9, a 0°C el Ratio de todas las muestras es mayor 1, por lo que todas las muestras con fibras presentaron menor resistencia a la tracción que la muestra de referencia. Si bien se observaba en la Figura 7(b) que las fibras aumentaron la rigidez de las muestras, éstas no aportan resistencia a esta temperatura. De este modo, para la temperatura de 10°C se presentan resultados variados, puesto que las muestras con 2% y 6% de fibras logran una resistencia superior a la muestra de referencia con Ratios de 0.98 y 0.81 respectivamente. En cambio las muestras de 4% y 8% de volumen de fibras presentaron un Ratio de 1.05 y 1.37 respectivamente. Finalmente, a 20°C todos los valores de ratio son menores a 1, por lo que se evidencia que a esta temperatura las fibras sí aportan resistencia. Por último, las barras de error

muestran que existe gran variabilidad en los resultados, por lo que se evidencia que las fibras no tienen un aporte significativo en la resistencia a la tracción de las mezclas asfálticas. Para probar que la variabilidad de los resultados se debe a dispersiones estadísticas, en la Figura 10 se ha representado el gráfico probabilidad-probabilidad usando una función de distribución Normal. En esta Figura fueron representados todos los resultados de las muestras del ensayo a tracción directa Fénix, independientes de la temperatura de ensayo y el contenido de fibras. Se observa que los resultados se pueden alinear en una línea recta con pendiente 1:1.

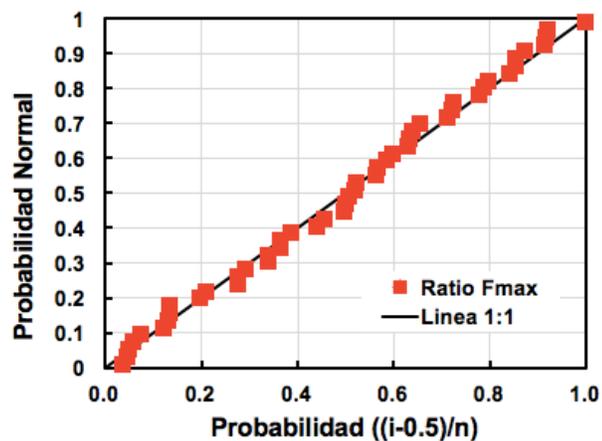


Figura 10. Gráfico probabilidad-probabilidad Normal para fuerza máxima de tracción.

Esto afirma que el porcentaje de fibras no afecta significativamente a la resistencia a la tracción de las muestras Fénix, independientemente de la temperatura. La diferencia entre los resultados de Fmax de mezclas con y sin fibras de lana de acero se atribuyen a variaciones estadísticas. Por lo que ni el contenido de fibras ni la temperatura tienen una influencia significativa en la resistencia mecánica de las mezclas asfálticas. La variación en los resultados puede ser atribuido al hecho que el modo de falla de las fibras en los ensayos realizados a temperaturas superiores a 10°C fue mayormente por pull-out, debido a la menor adherencia entre las fibras y el cemento asfáltico, por la superficie lisa de las fibras, como se ve en la Figura 4(a).

4 CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha evaluado la influencia de las fibras de lana de acero en la resistencia al agrietamiento de una nueva mezcla asfáltica reforzada con fibras. Para ello, se han empleado cinco diseños diferentes de mezcla asfáltica semi-densa, utilizando la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico, pero con cinco cantidades diferentes de fibras, y se han ensayado a distintas

temperaturas. De este modo, en base al análisis de los resultados, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Respecto a las propiedades físicas de las mezclas asfálticas, se encontró que las mezclas con fibras presentaron un mayor contenido de huecos cuanto mayor era su contenido de fibras. Además, la densidad aparente se redujo linealmente con el aumento del contenido de huecos. Esta disminución se debió mayormente a la variación del volumen total de cada muestra.
- En lo referente a las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas reforzadas con fibras, se encontró que los valores más altos de índice de rigidez a la tracción y fuerza máxima fueron obtenidos en ensayos a bajas temperaturas (-10°C y 0°C). Sin embargo, estos valores disminuyeron al aumentar la temperatura. Esto se debe a que el mástico en las mezclas asfálticas pierde viscosidad cuando la temperatura aumenta, disminuyendo la cohesión de la mezcla y su resistencia.
- Por otro lado, se comprobó que el contenido de fibras influyó en las propiedades mecánicas de tracción en mezclas asfálticas a altas temperaturas. Esto se debió a que la mezcla se comporta como un material compuesto, incrementando la resistencia a la tracción. Sin embargo, las mezclas a bajas temperaturas presentaron un comportamiento de sólido rígido con comportamiento frágil, por lo que las fibras no aportan resistencia.
- Referente a la energía, se encontró que mezclas asfálticas con y sin fibras ensayadas a bajas temperaturas, requerían una alta cantidad de energía durante el proceso de agrietamiento. Estas mezclas registraron una baja capacidad de mantener sus componentes unidos posterior a la carga máxima. Esto se debe a que el agrietamiento ocurre en forma súbita. Por el contrario, las mezclas asfálticas ensayadas a temperaturas mayores a 10°C , presentaron altos valores de índice de tenacidad, debido a su mayor capacidad de deformación.
- Además, se determinó que el contenido de fibras y la temperatura de ensayo no tenían una influencia significativa en la resistencia mecánica de las mezclas asfálticas. Las diferencias en los resultados de fuerza máxima se atribuyeron al tipo de falla registrado por cada

material. Se encontró que para temperaturas mayores a 10°C la falla fue de tipo pull-out. Esto puede deberse a que las fibras tienen una superficie lisa que proporciona baja adherencia a la matriz de asfalto.

- Finalmente, considerando el comportamiento mecánico presentado por las mezclas con fibras, este estudio propone un contenido óptimo de un 2% de fibras. 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.

5 REFERENCIAS

- Airey G, Choi Y. State of the art report on moisture sensitivity test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Road Materials and Pavement Design* 2002; 3(4):355-372.
- Airey G. State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Road Materials and Pavement Design* 2003; 4(3):165-176.
- Bennert T. *Advanced Characterization Testing of Fiber Reinforced Hot Mix Asphalt*. Rutgers University, Piscataway, N.J; 2012.
- Delgadillo R, Wahr C, García G, González A. Asphalt Technology in Chile, Leading Research and Practice. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 2012; 81:775-795.
- Fitzgerald R. Novel applications of carbon fiber for hot mix asphalt reinforcement and carbon-carbon pre-forms. MSc Thesis. Michigan Technological University, USA 2000.
- Gallego, J, del Val Miguel A, Contreras V, Paez A. Heating asphalt concrete with microwaves to promote self-healing. *Construction and Building Materials* 2013;42:1-4.
- García A, Norambuena-Contreras J, Pacheco-Bueno M, Partl MN. Single and multiple healing of porous and dense asphalt concrete. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 2015; 26:425-433.
- García A, Norambuena-Contreras J, Partl MN, Schuetz P. Uniformity and mechanical properties of dense asphalt concrete with steel wool fibers. *Construction and Building Materials* 2013; 43:107-117
- Khattak M, Kyatham V. Viscoelastic behavior of hydrated lime-modified asphalt matrix and hot-mix asphalt under moisture damage conditions. *Transportation Research Record* 2008; 2057:64-74.
- Liu Q. Induction healing of porous asphalt concrete. Ph.D. Thesis. TU Delft, The Netherlands 2012.
- Mahrez A, Karim M, Katman H. Prospect of using glass fiber reinforced bituminous mixes. *Journal*

of the Eastern Asia Society for Transportation Studies 2003; 5:794-807.

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

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

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

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

Norambuena-Contreras J, González-Torre I, Sánchez M, Dowling R. Desarrollo de una nueva mezcla asfáltica con propiedades de auto-reparación. In: 18th Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, CILA-XVIII2015, Bariloche, Argentina. 2015.

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

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

Valdés G, Pérez F. Mecanismos de Fisuración en Pavimentos Bituminos. Académica Española, Barcelona; 2012.

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

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