

UNIVERSIDAD DEL BÍO- BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

PROFESOR PATROCINANTE:

DR. JOSÉ NORAMBUENA CONTRERAS

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE
CALENTAMIENTO Y AUTO-REPARACIÓN DE
UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON FIBRAS**

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

GUILLERMO ANTONIO LAGOS MUÑOZ

Concepción, Octubre de 2015

DEDICATORIA

A mi madre

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. José Norambuena, por su entrega en este proyecto tanto material como personal, siempre velando por el bienestar personal y aprendizaje académico de quienes fuimos partícipes. También, agradezco a José Careaga su entereza, tenacidad y paciencia, sobre todo paciencia, fabricando las innumerables muestras necesarias para nuestros proyectos de título. Así también, agradezco a la Mg. Irene González, quién fue de gran ayuda en laboratorio, destacando su amabilidad y energía a la hora de trabajar o sólo conversar.

Por otra parte, quisiera agradecer la ayuda proporcionada por Rafael Dowling y Miguel Sánchez de la empresa Bitumix CVV, permitiendo el uso de las instalaciones e indumentaria, y por sobretodo agradecer a Armando Arados y a Carlos Lillo, por sus gestiones y cooperación en los ensayos.

También deseo agradecer la ayuda prestada por el Centro de Investigación de Polímeros Avanzados CIPA (CONICYT Regional, GORE BIO BIO R08C1002) y el Centro de Biomateriales y Nanotecnología (CBN), ambos centros afiliados a la Universidad del Bío-Bío.

Además, agradezco 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.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a mi madre, por su apoyo en todo momento, anteponiendo mi bienestar por sobre el suyo propio, logrando que me convirtiera en, el primer profesional de la familia. No hay palabras de admiración que expresen mi agradecimiento.

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE CALENTAMIENTO Y AUTO-REPARACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON FIBRAS

Guillermo Lagos Muñoz
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
gualagos@alumnos.ubiobio.cl

Dr. José Norambuena Contreras
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
Centro de Investigación de Polímeros Avanzados (CIPA)
jnorambuena@ubiobio.cl

RESUMEN

En este estudio se han utilizado fibras de lana de acero para el desarrollo de una nueva mezcla asfáltica reforzada con propiedades de auto-reparación de sus grietas usando el calentamiento por microondas. Estas fibras han sido usadas en el desarrollo de nuevos pavimentos para mejorar su comportamiento mecánico y propiedades de auto-reparación, sanando sus grietas a través de procesos de calentamiento como la inducción electromagnética o la radiación por microondas. Es así como la adición de fibras de lana de acero y su posterior calentamiento puede influir en cierto modo en el comportamiento físico y mecánico de la nueva mezcla asfáltica. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la influencia de las fibras de lana de acero en la auto-reparación de una mezcla asfáltica mediante calentamiento por radiación microondas. Así, se estudiaron cinco diseños diferentes de mezcla asfáltica semi-densa, empleando una granulometría y un contenido de cemento asfáltico definidos, y con cinco porcentajes diferentes de contenido de fibras. De este modo, se evaluó la influencia de las fibras mediante la realización de ensayos a flexión de muestras agrietadas y reparadas por calentamiento de microondas. Finalmente, se pudo concluir que el uso de radiación microondas aceleró el proceso de calentamiento, aumentando la temperatura en las mezclas asfálticas con un mayor contenido de fibras, sin embargo la temperatura no se distribuyó de manera uniforme dentro de la muestra, debido a una mala distribución de las fibras y/o a la formación de clusters. Por otra parte, se concluyó que las mezclas asfálticas reforzadas presentaron propiedades de auto-reparación, siendo mayores en mezclas con menor contenido de fibras, y disminuyendo a medida que aumentaba el número de ciclos de reparación a una misma tasa, independientemente del contenido de fibras. Sin embargo, esta auto-reparación no incrementó la resistencia mecánica en mezclas con un contenido mayor a un 2% de fibras, mientras que por el contrario, a medida que aumentó este contenido disminuyó la resistencia máxima a la flexión.

Palabras claves: Fibras metálicas; Contenido de huecos, Microondas; Auto-reparación.

5760 + 11 Figuras/Tablas*250 + 2 Figura/Tabla* 500 = 9510 Palabras Totales.

STUDY OF HEATING AND SELF-HEALING PROPERTIES OF AN ASPHALT MIXTURE WITH FIBERS

Guillermo Lagos Muñoz

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

José Norambuena Contreras, Ph.D

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío
Centro de Investigación de Polímeros Avanzados (CIPA)
jnorambuena@ubiobio.cl

ABSTRACT

In this study, steel wool fibers have been used to develop a new reinforced asphalt mixture with self-healing properties by using microwave heating. These fibers have been used in the development of new pavements with the aim of improving their mechanical behavior and self-healing properties, by healing their cracks through heating processes such as electromagnetic induction or microwave radiation. Therefore, the addition of steel wool fibers and their subsequent heating may have an influence on the physical and mechanical behavior of the new asphalt mixture. The main objective of this research was to evaluate the influence of steel wool fibers on self-healing properties of an asphalt mixture by using microwave radiation heating. Thus, five different semi-dense asphalt mixtures were studied with the same aggregates gradation and asphalt cement content, but with five different percentages of fibers content. As a result, influence of fibers was evaluated by using flexural tests on cracked and repaired by microwave heating samples. Finally, it was concluded that microwave radiation accelerated the heating process, increasing the temperature on asphalt mixtures with higher content of fibers; however the temperature was not uniformly distributed within the sample due to poor distribution of fibers and/or to the formation of clusters. Moreover, it was concluded that reinforced asphalt mixtures presented self-healing properties, which were higher on mixtures with lower fiber contents and that decreased with the increase of the number of repair cycles at the same rate, regardless of fiber content. However, this self-healing did not increase mechanical strength of mixtures with fibers content over 2%, while in contrast, an increment of this content produced a reduction on the maximum bending strength.

Keywords: Metallic fibers; Air Voids content, Microwave; Self-healing.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	ANTECEDENTES.....	1
1.2	HIPÓTESIS.....	3
1.3	OBJETIVOS.....	3
1.3.1	<i>Objetivos generales</i>	3
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	3
1.4	DECLARACIÓN DE AUTOR.....	4
2	MATERIALES Y MÉTODOS.....	5
2.1	MATERIALES.....	5
2.2	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS MARSHALL.....	5
2.3	DENSIDAD APARENTE Y CONTENIDO DE HUECOS EN LA MEZCLA.....	6
2.4	MORFOLOGÍA DE LAS FIBRAS DE LANA DE ACERO.....	7
2.5	CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL CEMENTO ASFÁLTICO.....	7
2.6	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....	8
2.7	CALENTAMIENTO POR RADIACIÓN MICROONDAS.....	9
2.8	MEDIDA DE A AUTO-REPARACIÓN POR MICROONDAS.....	9
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
3.1	MORFOLOGÍA DE LAS FIBRAS ANTES Y DESPUÉS DEL MEZCLADO Y COMPACTACIÓN MARSHALL.....	11
3.2	PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LAS MUESTRAS MARSHALL CON Y SIN FIBRAS.....	13
3.3	PROPIEDADES DE CALENTAMIENTO POR MICROONDAS DE LAS MEZCLAS CON FIBRAS.....	15
3.4	INFLUENCIA DEL VOLUMEN DE FIBRAS EN LA AUTO-REPARACIÓN DE LAS MEZCLAS.....	18
4	CONCLUSIONES.....	21
5	REFERENCIAS.....	22

INDICE DE TABLAS

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

Tabla 2. Velocidad promedio de calentamiento de las mezclas con y sin fibras. 17

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Auto-reparación de una mezcla asfáltica agrietada usando radiación electromagnética . 2

Figura 2. (a) Ensayo de resistencia a la flexión, y (b) Curva fuerza-desplazamiento antes y después de la recuperación por calentamiento con microondas (ej. mezcla con 4% de fibras). 8

Figura 3. Ensayos de calentamiento por microondas a una frecuencia de trabajo de 2.45 GHz: (a) ensayo de calentamiento en una muestra con 8% de fibras, y (b) esquema del ensayo de calentamiento en microondas para la auto-reparación de mezclas asfálticas con fibras. 10

Figura 4. Resultados del análisis de probabilidad sobre la longitud de fibras: (a) gráfico de probabilidad-probabilidad Weibull, y (b) histograma de frecuencias. 12

Figura 5. 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. 14

Figura 6. Densidad aparente en función del contenido de huecos en mezcla. 15

Figura 7. Resultados del calentamiento por microondas de mezclas con fibras: (a) temperatura máxima en superficie de las mezclas en función del tiempo de calentamiento, y (b) ejemplo de una imagen termográfica para una mezcla con un 6% de volumen de fibras. 17

Figura 8. Caracterización termogravimétrica de cemento asfáltico CA-24. 17

Figura 9. Nivel de reparación en función del número de ciclos con microondas. 19

Figura 10. Referencia de la fuerza máxima a la flexión a una temperatura de -20°C en función del contenido de huecos en mezcla. 20

Figura 11. Gráfico probabilidad-probabilidad Weibull de reparación entre ciclos. 20

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Una mezcla asfáltica es un material compuesto de áridos y cemento asfáltico, y es uno de los materiales más utilizados para la construcción de pavimentos de carreteras en el mundo. Como referencia, más del 80% de la red vial pavimentada en Chile ha sido construida usando mezcla asfáltica como material principal (MOP, 2012). Sin embargo, las condiciones ambientales combinadas con las cargas de tráfico contribuyen al deterioro prematuro de este material, reduciendo su resistencia mecánica y durabilidad en el tiempo (Delgadillo et al., 2012). De este modo, con el objetivo de conservar los pavimentos asfálticos durante su vida de servicio, éstos deben ser periódicamente reparados, lo que supone un coste adicional para los diferentes gobiernos de cada país (Thenoux et al., 2007). Por lo tanto, con el objetivo de mejorar el comportamiento mecánico de los pavimentos asfálticos prolongando su rehabilitación, se pueden incorporar fibras metálicas en el diseño de nuevas mezclas asfálticas. Las fibras metálicas en materiales compuestos son conocidas por aumentar las características de resistencia y fatiga, así como su ductilidad (Fitzgerald, 2000). Además, las fibras metálicas también pueden ser usadas para el desarrollo de nuevos pavimentos asfálticos con fines energéticos (Wu et al., 2005) y de auto-reparación de sus grietas usando el calentamiento por inducción electromagnética (Liu, 2012 y García et al., 2015).

Es sabido que los pavimentos asfálticos presentan propiedades de auto-reparación cuando son sometidos a altas temperaturas en época de verano (Liu, 2012), lo que significa que cuando una grieta aparece en la carretera, ésta se puede cerrar de forma autónoma. Esto sucede porque la viscosidad del cemento asfáltico está relacionada con la temperatura. Así, cuando la temperatura del cemento asfáltico alcanza un determinado valor umbral (30-70°C), que es diferente para cada tipo de cemento asfáltico, éste fluirá capilarmente a través de cualquier posible microgrieta presente en el pavimento (García, 2011). Por lo tanto, las fibras metálicas pueden ser usadas para aumentar las velocidades de calentamiento de las mezclas asfálticas, teniendo en cuenta que estas fibras metálicas pueden absorber mayor energía térmica que otros componentes de la mezcla, como son los áridos y el cemento asfáltico. De esta manera, la auto-reparación de las mezclas asfálticas usando el calentamiento electromagnético, consiste en añadir a la nueva mezcla fibras metálicas conductoras de electricidad y magnéticamente susceptibles a un campo eléctrico, como son las fibras de lana de acero (García et al., 2013a). Así, con la ayuda de un dispositivo de radiación electromagnética, por ejemplo un horno microondas (Gallego et al., 2013), es posible calentar las

mezclas con fibras metálicas y localmente a través de la difusión volumétrica del calor en las fibras, derretir el cemento asfáltico y reparar las grietas abiertas en el pavimento, ver esquema en la Figura 1.

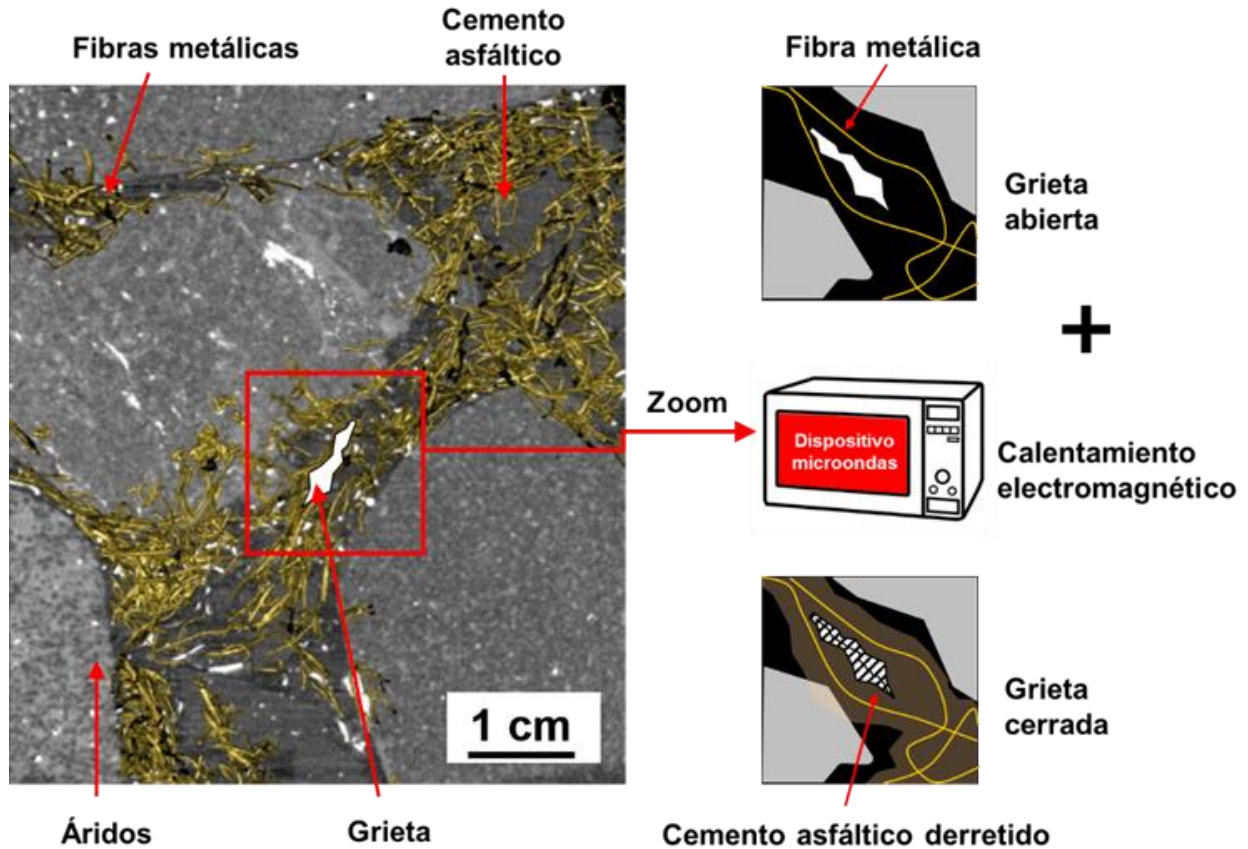


Figura 1. Auto-reparación de una mezcla asfáltica agrietada usando radiación electromagnética

La radiación microondas es una técnica de calentamiento no-destruccionista recientemente evaluada por Gallego et al., para promover la auto-reparación de mezclas asfálticas con fibras (Gallego et al., 2013). De esta manera, el calentamiento por microondas puede ser aplicado con éxito en pavimentos asfálticos agrietados, al igual que otros sistemas de calentamiento más costosos como la inducción electromagnética (Liu, 2012 y Garcia et al., 2015). Sin embargo, la adición de fibras de lana de acero y su posterior calentamiento por microondas pueden influir en el comportamiento físico y mecánico de la nueva mezcla asfáltica, aunque no está claro cómo funciona esta influencia. Por estas razones, en esta investigación se ha evaluado la influencia de las fibras de lana de acero en las propiedades físicas y mecánicas de una nueva mezcla asfáltica reforzada con fibras. Con este objetivo, se estudiaron cinco diferentes diseños de mezcla asfáltica semi-densa, empleando la

misma granulometría y contenido de cemento asfáltico en mezcla, pero con cinco diferentes porcentajes de fibras.

1.2 Hipótesis

- Es posible desarrollar una nueva mezcla asfáltica con propiedades de auto-reparación de sus grietas, añadiendo a la matriz del material fibras de lana de acero.
- Esta nueva mezcla asfáltica presentará ventajas en sus propiedades mecánicas y físicas frente a una mezcla asfáltica no-reforzada con fibras de lana de acero.
- En las nuevas mezclas asfálticas reforzadas con fibras de lana de acero, es posible medir las propiedades físicas mediante ensayos experimentales destructivos y no-destructivos.
- Una vez que el diseño óptimo de la nueva mezcla asfáltica reforzada con fibras de lana de acero esté definido, es posible llevar a cabo el calentamiento y reparación de las grietas mediante el uso de un dispositivo de microondas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos generales

- Evaluar la influencia de las fibras de lana de acero en las propiedades de calentamiento y auto-recuperación de una nueva mezcla asfáltica reforzada con fibras.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades físicas de los componentes de la mezcla asfáltica reforzada con fibras.
- Medir las propiedades físicas de la mezcla asfáltica con diferentes contenidos de fibras de lana de acero.
- Caracterizar el comportamiento térmico de la mezcla asfáltica con diferentes contenidos de fibras por calentamiento en microondas.
- Medir el ratio de auto-reparación de mezclas asfálticas con diferentes contenidos de fibras usando calentamiento por microondas y ensayos mecánicos a flexión en tres puntos.
- Realizar un análisis comparativo entre las variables medidas de las probetas con diferentes porcentajes de fibra.

1.4 Declaración de autor

Finalmente, parte de este proyecto de título ha sido extraído de la publicación:

Norambuena-Contreras J, González-Torre I, Sánchez M, Dowling R. (2015). “*Desarrollo de una nueva mezcla asfáltica con propiedades de auto-reparación*”, que será presentado en el XVIII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, CILA 2015.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

En esta investigación se ha utilizado una mezcla asfáltica semi-densa tipo IV-A-12, considerando ésta como la mayormente usada para la construcción de pavimentos asfálticos en Chile (Delgadillo et al., 2012). La granulometría de la mezcla se muestra en la Tabla 1, diseño que se ajusta a las líneas de huso de las bandas granulométricas. Los áridos, de procedencia fluvial, del sector de Confluencia, fueron clasificados en tres fracciones: árido grueso gravilla (entre los tamices 2.5-12.5mm y densidad 2.779g/cm^3), árido fino arena (entre los tamices 0.63-0.08mm 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, punto de ablandamiento de 51°C y densidad de 1.039g/cm^3 . Además, se adicionaron fibras de lana de acero cortadas mecánicamente a la mezcla asfáltica. El material usado en 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 diferentes porcentajes de fibras en mezcla: 0%, 2%, 4%, 6% y 8%, por volumen total del cemento asfáltico, ver Tabla 1. En total se prepararon 5 diferentes tipos de mezclas asfálticas: 1 mezcla asfáltica sin fibras (mezcla de referencia) y 4 mezclas asfálticas con diferentes porcentajes 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 en horno a una temperatura de 150°C durante 24h, mientras el cemento asfáltico y las fibras metálicas a una temperatura de 150°C durante 2h. De este modo, los materiales fueron sumados 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 3.5min, siempre conservando una temperatura de mezclado constante de 150°C en el interior del recipiente. Una vez mezclados los materiales, garantizando una buena distribución de las fibras, fueron dispuestos en el interior de un molde

Marshall de aproximadamente 10cm de diámetro y 6cm de altura (previamente calentado), con el objetivo de compactar las muestras mediante un martillo Marshall aplicando 75 golpes por cada cara de la muestra. Después de la compactación y posterior enfriamiento a temperatura ambiente, las muestras tipo Marshall fueron extraídas mecánicamente desde el interior del molde. Finalmente, se fabricaron 4 muestras por cada tipo de mezcla asfáltica, dando un total de 20 muestras Marshall

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 CA24	(% 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			16
6% fibras	2-8	0.157	24
8% fibras			32

2.3 Densidad aparente y contenido de huecos en la 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 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 como:

$$CH (\%) = \frac{\rho_{m\acute{a}x} - \rho_a}{\rho_{m\acute{a}x}} \quad (1)$$

Donde ρ_a es la densidad aparente de cada muestra, medida en g/cm^3 y $\rho_{m\acute{a}x}$ 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 20 probetas por cada porcentaje de fibras.

2.4 Morfología de las fibras de lana de acero

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 Investigación de Polímeros Avanzados (CIPA) de la Universidad del Bío-Bío. En este estudio, las fibras fueron examinadas antes y después de su mezcla y compactación mecánica. Además, la longitud de 120 fibras de lana de acero se determinó mediante fotografías realizadas con un microscopio óptico a una magnificación de 30x y mediante la posterior medición de la longitud de fibras individuales con un programa de procesamiento de imagen. Para ello, el programa de imagen consideraba 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 ajusta 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.

2.5 Caracterización térmica del cemento asfáltico

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento térmico del cemento asfáltico, se ha realizado un ensayo termogravimétrico (TGA). Este ensayo consistió en analizar la pérdida de masa del material a medida que aumenta su temperatura, de forma que se pueda comprobar si las temperaturas de mezclado y ensayo pueden afectar a las propiedades del cemento asfáltico. El ensayo ha sido realizado en un equipo de análisis TGA Q50 V20 Build 36, disponible en el Centro de Investigación de Polímeros Avanzados (CIPA) de la Universidad del Bío-Bío. Los ensayos se

realizaron en atmósfera de nitrógeno, a una velocidad de calentamiento de $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$, y en un rango de temperaturas entre 0 y 600°C , sobre una muestra de cemento asfáltico con una masa de 7.89 mg.

2.6 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión de las mezclas asfálticas con y sin adición de fibras fue medida sobre muestras semi-circulares extraídas de las muestras cilíndricas tipo Marshall, ver Figura 2(a). De este modo, 4 muestras semi-circulares fueron cortadas de una muestra Marshall de 10cm de diámetro y 6cm de altura. Además, con el objetivo de controlar el punto de inicio del agrietamiento, una entalla de aproximadamente 4mm de espesor y 10mm de altura fue realizada en la parte central de las muestras, y en la misma dirección de aplicación del actuador de carga. Por otra parte, con el objetivo de generar una rotura de tipo frágil en las muestras de mezcla asfáltica semi-circulares, todas las muestras fueron acondicionadas a una temperatura controlada de -20°C durante 24h previas al ensayo. Los ensayos a flexión consistieron en colocar una muestra semi-circular a una temperatura de -20°C sobre dos soportes cilíndricos distanciados 80mm , que fue posteriormente cargada axialmente en su parte media superior a través de un actuador de carga, ver Figura 2(a). El equipamiento usado para los ensayos fue una máquina estática universal de ensayos Zwick/Roell con una célula de carga de 20kN y control por computador, disponible en el Centro de Biomateriales y Nanotecnología (CBN) de la Universidad del Bío-Bío. Finalmente, todos los ensayos se realizaron a una velocidad de 5 mm/min.

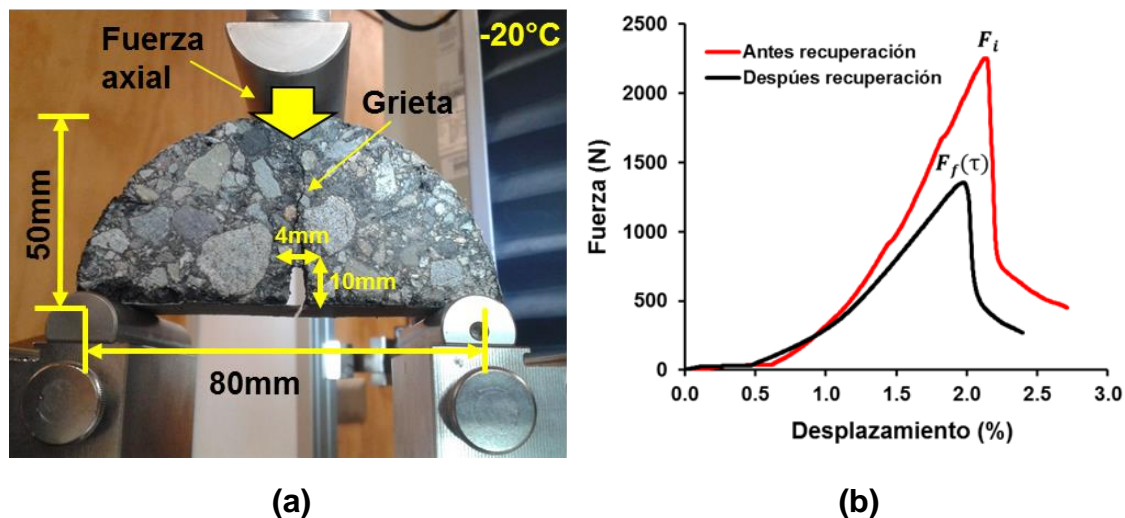


Figura 2. (a) Ensayo de resistencia a la flexión, y (b) Curva fuerza-desplazamiento antes y después de la recuperación por calentamiento con microondas (ej. mezcla con 4% de fibras).

2.7 Calentamiento por radiación microondas

Con el objetivo de comprobar que las mezclas asfálticas con y sin adición de fibras pueden ser calentadas usando la radiación por microondas, 2 muestras tipo Marshall fueron cortadas en dos mitades en una de sus caras y posteriormente calentadas en un horno microondas a 6 diferentes tiempos de calentamiento (20s, 40s, 60s, 80s, 100s, y 120s), comenzado el ensayo desde una temperatura inicial aproximada de 20°C, ver Figura 3(a). El cambio de temperatura superficial experimentado por las muestras, a los diferentes tiempos de calentamiento, fue medido a través de imágenes termográficas realizadas usando una cámara infrarroja de 640x480 pixeles, siendo estas medidas contrastadas con un termómetro infrarrojo. Finalmente, para los ensayos de calentamiento se utilizó un horno microondas con una potencia de 1150W a 230V y 50Hz de suministro, capaz de producir microondas de hasta 700W con una frecuencia de trabajo de 2.45 GHz, equivalente a una longitud de onda de aproximadamente 120mm (Gallego et al., 2013).

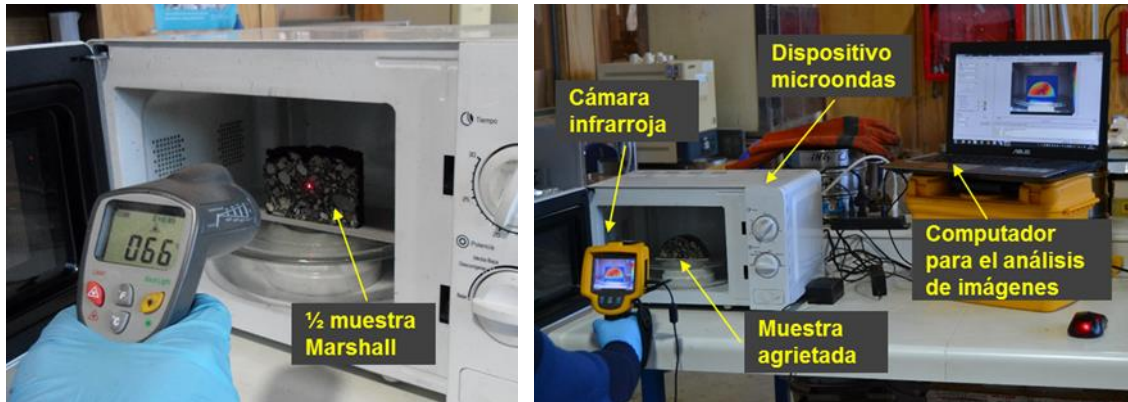
2.8 Medida de a auto-reparación por microondas

La medida de la auto-reparación de las mezclas asfálticas con fibras usando calentamiento por microondas, ha sido realizada de acuerdo a la siguiente metodología: primero, todas las muestras fueron enumeradas de acuerdo a su contenido de fibras, luego, cada muestra fue ensayada a la flexión a una temperatura de -20°C de acuerdo a la metodología de la sección 2.7 (ver Figura 2(a)). Después de esto, cada muestra agrietada fue acondicionada durante 2h a una temperatura controlada de 20°C, para posteriormente ser calentada en un microondas por un tiempo de 40s (ver esquema en Figura 3(b)). Así, una vez las muestras alcanzaron una temperatura de 20°C, éstas nuevamente fueron ensayadas a la flexión a una temperatura de -20°C, habiéndose completado un ciclo de reparación (CR) por calentamiento en microondas. Así, el nivel de reparación alcanzado por cada muestra de mezcla asfáltica, $T_{AR}(\tau)$, queda definido como la relación entre la fuerza máxima de la muestra inicial ensayada a la flexión, F_i , y la fuerza máxima de la muestra ensayada a la flexión después del proceso de calentamiento, $F_f(\tau)$, ver Figura 2(b).

$$T_{AR}(\tau) = \frac{F_f(\tau)}{F_i} \quad (2)$$

Donde τ corresponde a un parámetro que cuantifica la cantidad de energía térmica introducida en la muestra durante el tiempo t de calentamiento, en este estudio fue de 40s (García et al., 2015).

Finalmente, un total de diez ciclos de reparación por calentamiento fueron realizados en cada muestra de ensayo.



(a)

(b)

Figura 3. Ensayos de calentamiento por microondas a una frecuencia de trabajo de 2.45 GHz: (a) ensayo de calentamiento en una muestra con 8% de fibras, y (b) esquema del ensayo de calentamiento en microondas para la auto-reparación de mezclas asfálticas con fibras.

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. García et al. en su trabajo de 2013^a. comprobó que fibras cortas y gruesas experimentan una mejor distribución de las fibras 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 sigue 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 4(a). Este resultado puede ser considerado un buen ajuste debido al hecho de que todos datos, independientemente de su longitud original se pueden alinear en una recta con pendiente 1:1. Este resultado es similar al publicado por otros autores que analizan la longitud de fibras en materiales compuestos (García et al., 2013a). Una función de distribución de probabilidad tipo Weibull se ha empleado en este análisis 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 en microscopio óptico, ver Figura 4(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 largas (mayores a 6mm) es mucho menor, 10 y 20% aproximadamente.

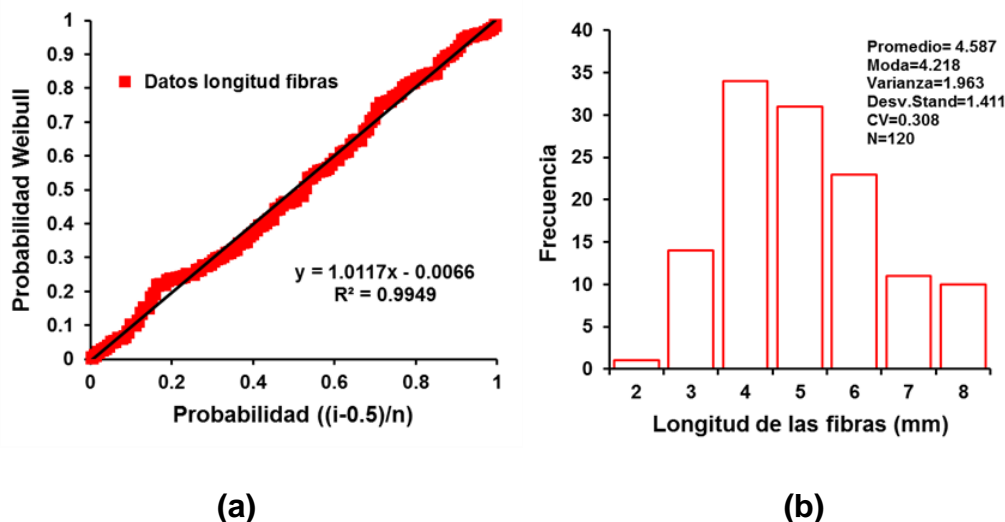


Figura 4. Resultados del análisis de probabilidad sobre la longitud de fibras: (a) gráfico de probabilidad-probabilidad Weibull, y (b) histograma de frecuencias.

Como resultado, la longitud de las fibras de lana de acero fluctúa 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 usando fibras de diferentes diámetros y dos longitudes (2.5 y 7mm) (García et al., 2013a). 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 en (García et al., 2013a) y 0.10-0.12mm en (Gallegos et al., 2013). 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 5(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 5(a). Además, la sección transversal de las fibras puede presentar distintos diámetros dependiendo de la vibración de corte, ver Figura 5(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 verse dañadas efecto de los procesos de mezclado y compactación Marshall. En la Figura 5(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.

3.2 Propiedades físicas y mecánicas de las muestras Marshall con y sin fibras.

En la Figura 6 se muestran los resultados de la densidad aparente medidos en las muestras Marshall con y sin fibras, en función del contenido de huecos en la mezcla. En esta Figura, 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. Además, en la Figura 6, se puede observar que el valor más alto de densidad aparente obtenido fue para la mezcla de referencia sin fibras (densidad promedio de 2.352g/cm^3), mientras que un mayor porcentaje de volumen de fibras como 2%, 4%, 6% y 8%, presentaron valores de densidad aparente promedio más bajos: 2.320g/cm^3 , 2.322g/cm^3 , 2.323g/cm^3 , y 2.303g/cm^3 , respectivamente. Esta disminución de la densidad aparente con el contenido de fibras en mezcla, se atribuye a un incremento de la masa y volumen por cada porcentaje de fibras (2%, 4%, 6% y 8%). 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.

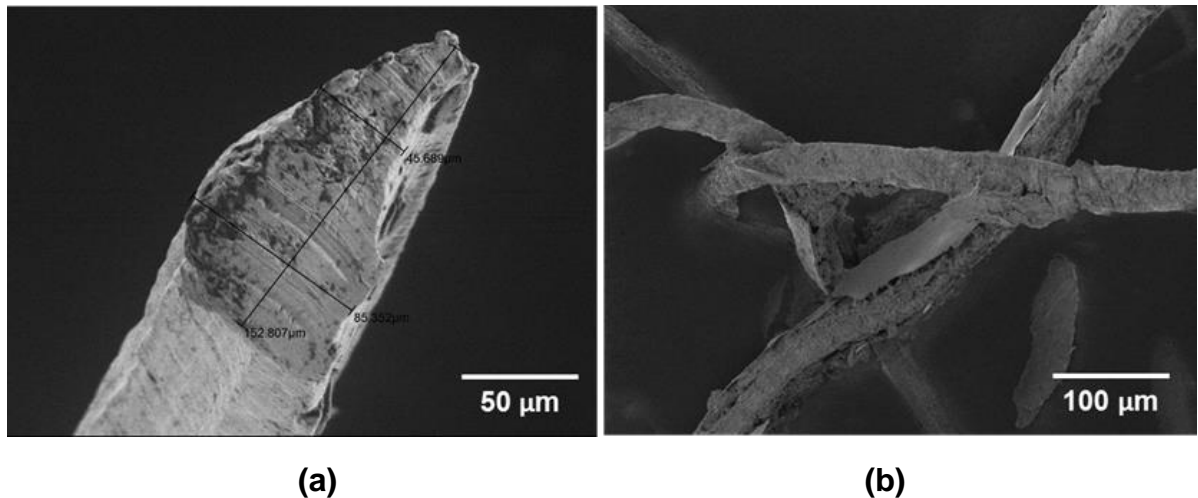


Figura 5. Imágenes SEM de la fibra de lana de acero antes y después del mezclado y compactación Marshall: (a) aspecto superficial de una fibra de lana de acero y sección transversal antes del mezclado, (b) fibras individuales dañadas por aplastamiento y corte.

Además, en la Figura 6 se observa que las mezclas con mayor porcentaje de fibras presentan un mayor contenido de huecos en la mezcla con una mayor dispersión de los datos. De acuerdo a esto, puede observarse que el menor contenido de huecos se obtuvo para la mezcla de referencia sin fibras (contenido de huecos promedio de 5.98%). Esto ocurre debido a que en las muestras sin fibras, la superficie específica total es menor que en las mezclas con fibras. El segundo punto a destacar en la Figura 6, es la similitud de los resultados del contenido de huecos en el caso de las mezclas con un 2%, 4% y 6% de fibras, donde se obtuvieron contenidos de huecos promedio de 7.92%, 8.67% y 8.96%, respectivamente. Sin embargo, en el caso de las mezclas con un 8% de fibras se obtuvo un mayor contenido de huecos (10.49% de huecos promedio). Esto ocurre debido a que, como se puede observar en la Figura 4(b), mezclas con un mayor porcentaje de fibras tienen más probabilidades de tener fibras largas (mayores a 6mm) y por lo tanto un mayor incremento del volumen total en la mezcla debido a la formación de grupos de fibras o clúster en su interior, los cuales debido a su estructura pueden comportarse como puntos débiles del material.

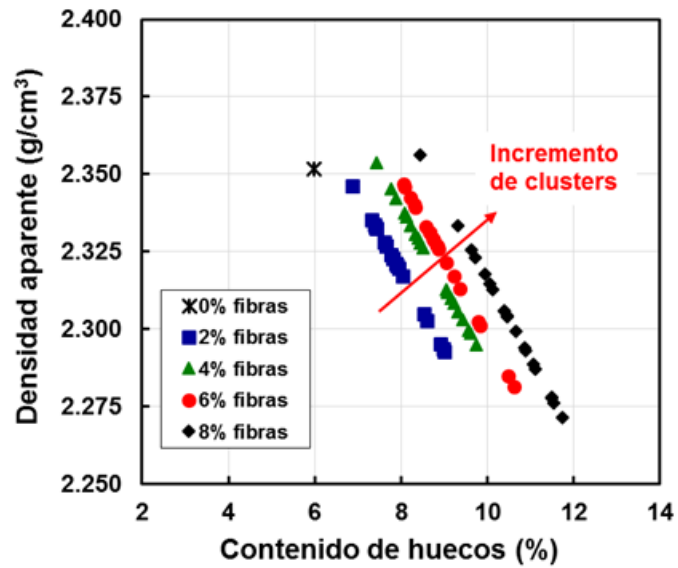


Figura 6. Densidad aparente en función del contenido de huecos en mezcla.

3.3 Propiedades de calentamiento por microondas de las mezclas con fibras

Como se ha descrito en la sección 2.7, diferentes muestras de mezcla asfáltica tipo Marshall, han sido calentadas en un horno microondas a 6 diferentes tiempos de calentamiento, con el objetivo de determinar el incremento de la temperatura de las mezclas expuestas a la radiación por microondas. De este modo, en la Figura 7(a) se muestra la máxima temperatura promedio registrada para las mezclas, después de 40s expuestas al calentamiento por microondas. En esta Figura, se puede observar que la temperatura en superficie de las mezclas incrementa linealmente con el tiempo de calentamiento en microondas, y que esta temperatura es mayor para las mezclas con un mayor volumen de fibras. De este modo, las mezclas con un 8% de volumen de fibras registraron una mayor temperatura que las mezclas con un 2%, 4% y 6% de volumen de fibras, y comparadas para un mismo tiempo de calentamiento. Sin embargo, la distribución de esta temperatura a través de las muestras analizadas no fue homogénea para todas las muestras con fibras, registrándose un gradiente de temperatura a lo largo del espesor de la muestra, ver ejemplo en Figura 7(b). Como se muestra en esta Figura, la temperatura decrece levemente desde la superficie (57.5°C) a la parte baja de la muestra (47.9°C), siendo este comportamiento fuertemente dependiente de la densidad y distribución de las fibras en el interior de la mezcla ensayada. De este modo, mezclas con un mayor volumen de fibras presentarán una mayor velocidad de calentamiento. Estas velocidades de calentamiento pueden ser calculadas como la pendiente de la regresión lineal de los datos de temperatura presentados en la Figura 7(a). Así, se presentan las velocidades promedio de

calentamientos en la Tabla 2, calculados para las mezclas con 2%, 4%, 6% y 8% de volumen de fibras, comparados con la mezcla de referencia sin fibras. Así, se puede observar que en mezclas con un contenido de fibras de 4% o superior, el incremento de velocidad que se produjo al aumentar el porcentaje de fibras fue menor que el producido con menores porcentajes. Esto se debió a que para mayores contenidos de fibras, éstas presentan un comportamiento similar dentro de las probetas, ya que se encuentran dispersas en un mayor volumen disminuyendo así los sectores sin fibras (con menores temperaturas), y presentando por tanto valores de temperatura promedio similares dentro de la mezcla.

De la Tabla 2, se concluye que las fibras de lana de acero ayudan a incrementar la temperatura de las mezclas con fines de la auto-reparación usando calentamiento por microondas. Finalmente, un tiempo de calentamiento por microondas de 40s en una mezcla semi-densa con fibras, registra valores similares de temperatura a los alcanzados durante un tiempo 60s usando el calentamiento por inducción electromagnética a una frecuencia de 100kHz (García et al., 2013b). Se ha escogido el tiempo de calentamiento por radiación de microondas de 40s, para la realización de la reparación en las probetas semi-circulares para las diferentes mezclas, debido a que en promedio, las temperaturas alcanzan el punto de ablandamiento del cemento asfáltico CA-24.

Además, es necesario conocer si para el tiempo de calentamiento definido para el proceso de auto-reparación, existe una pérdida de masa que afecte las propiedades del material. Por ello, se realizó el ensayo TGA del cual se concluyó que existe una pérdida de masa considerable a partir de los 200°C, con una pérdida total de masa del 85.67% a los 600° (ver Figura 8). Adicionalmente, el punto de inflexión de la curva que representa la derivada de la masa ocurre a los 454.65°C el cual se interpreta como la temperatura a la que se produce la mayor velocidad de pérdida de masa. Con estos antecedentes, se puede concluir que el cemento asfáltico no tiene una pérdida de masa considerable ni durante el proceso de mezclado, ni tampoco en los ensayos de calentamiento por microondas, ya que en éstos se alcanzan temperaturas entre 20° y 150°C.

En resumen, el calentamiento por microondas reduce el tiempo de calentamiento de una mezcla semi-densa con fibras, en comparación con la inducción electromagnética.

Tabla 2. Velocidad promedio de calentamiento de las mezclas con y sin fibras.

Volumen de fibras (%)	Temperatura superficial a los 40s (°C)	Velocidad promedio de calentamiento en microondas (°C/s)	Coefficiente de determinación del ajuste lineal (R ²)
2	44	0.64	0.9963
4	52	0.84	0.9967
6	57	0.88	0.9946
8	65	0.90	0.9889
Ref. 0%	32	0.51	0.9820

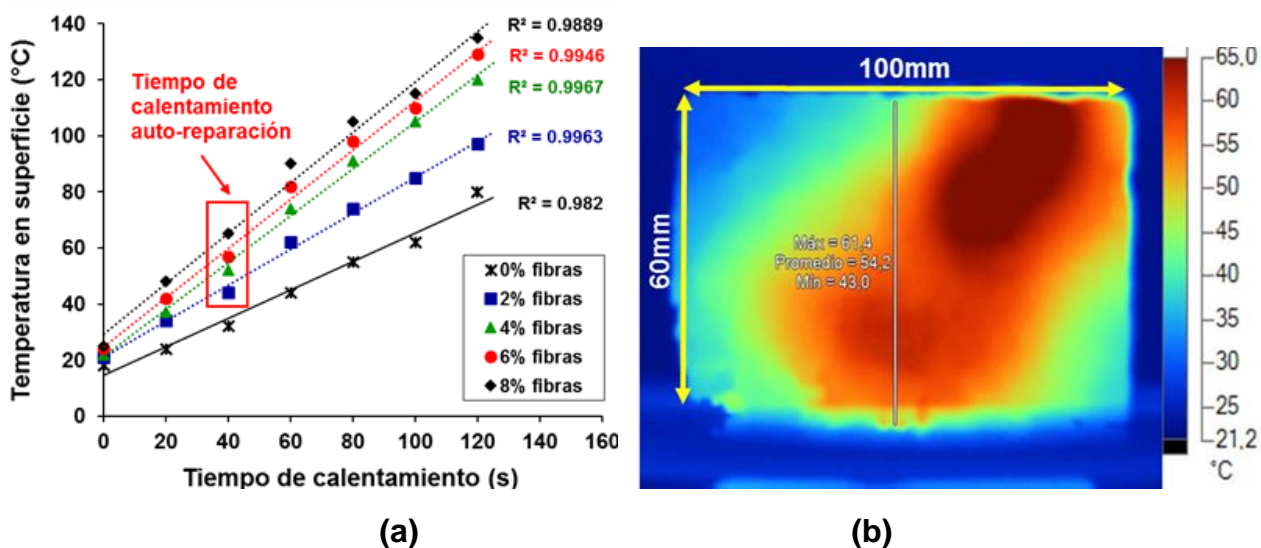


Figura 7. Resultados del calentamiento por microondas de mezclas con fibras: (a) temperatura máxima en superficie de las mezclas en función del tiempo de calentamiento, y (b) ejemplo de una imagen termográfica para una mezcla con un 6% de volumen de fibras.

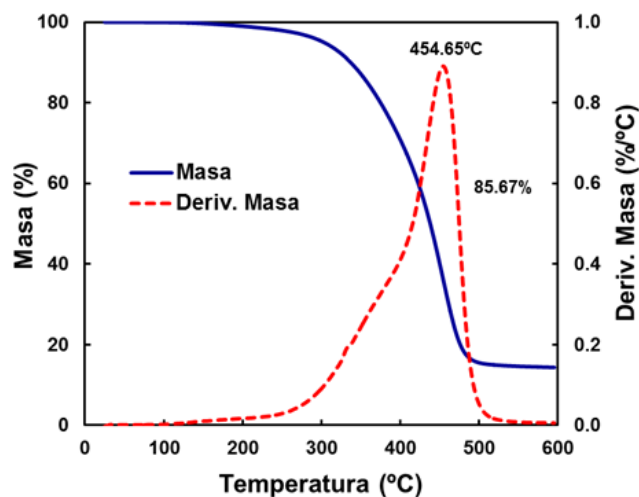


Figura 8. Caracterización termogravimétrica de cemento asfáltico CA-24.

3.4 Influencia del volumen de fibras en la auto-reparación de las mezclas

La Figura 9 muestra los resultados del nivel de reparación registrado por las mezclas con fibras en función del número de ciclos de reparación usando el calentamiento por microondas. En esta Figura, se puede observar que el calentamiento por microondas ayuda a la recuperación de la resistencia mecánica de las mezclas agrietadas con fibras, y que este nivel de recuperación disminuye con el incremento del número de ciclos. También, se puede apreciar que las mezclas con un menor contenido de fibras (2% y 4%) presentaron un nivel de reparación promedio mayor al 90% en el primer ciclo de reparación, y no menor a un 60% y 50% respectivamente al finalizar los diez ciclos de sanado. Por su parte, las mezclas con un mayor contenido fibras (6% y 8%) presentaron un nivel de reparación promedio menor a un 90% en el primer ciclo y menor a un 50% al finalizar los 10 ciclos de sanado. Este comportamiento se atribuye a la densidad de fibras en la mezcla, la cual incrementa la velocidad de calentamiento de las mezclas y la fluidez del cemento asfáltico a través de aquellas grietas abiertas. Sin embargo, un mayor volumen de fibras en la mezcla no implica un aumento de la resistencia a la flexión de las mezclas (ver Figura 10), ya que al aumentar el contenido de fibras en la mezcla existe una mayor probabilidad de formación de clusters, los cuales al estar agrupados en puntos específicos de la probeta no presentan la misma resistencia que partes de la mezcla bien distribuidas. Una excepción a esto es la mezcla asfáltica con un 2% de contenido de fibras, la cual aumentó su resistencia en un 2% respecto de la mezcla sin adición de fibras. Este aumento no es significativo y sin embargo, se puede concluir que esta mezcla no sufre una pérdida de su resistencia mecánica. Por lo anterior, se deduce que un mayor nivel de recuperación no está asociado a una mayor resistencia mecánica, sino a la distribución de las fibras dentro de la mezcla. Por otra parte, analizando las barras de error de cada ciclo de reparación en la Figura 9, se observa que siguen un cierto patrón de disminución en la reparación a medida que aumentan los ciclos de reparación, independiente del contenido de fibras de cada mezcla. Para demostrar esta interpretación y con el objetivo de poder comparar el comportamiento de estos parámetros mediante el uso de un ajuste de probabilidad, se calculó la tasa de reducción entre ciclos. Ésta se define como el cociente entre la tasa de auto-reparación de la mezcla de cada ciclo y la tasa máxima de auto-reparación de la mezcla del mismo ciclo, calculada para cada uno de los diez ciclos de auto-reparación.

$$T_{RC} = \frac{T_{AR}}{T_{AR \text{ máx}}} \quad (3)$$

Como se puede observar en la Figura 11, estos datos se ajustan a una recta de pendiente 1:1, lo que implica que se ajustan a una distribución de probabilidad Weibull, que fue utilizada ya que se asocia a daños en los materiales. Esto demuestra que independientemente del contenido de fibras en la mezcla asfáltica, éstas tienen una misma tasa de disminución de la reparación.

En resumen, a efectos de desarrollar una nueva mezcla asfáltica con propiedades de auto-reparación usando calentamiento por microondas, se recomienda incorporar un 2% de volumen de fibras, con el objetivo de obtener una mezcla con un nivel de reparación mayor al 80% para los tres primeros ciclos de reparación y una resistencia mecánica similar a una mezcla de referencia sin fibras.

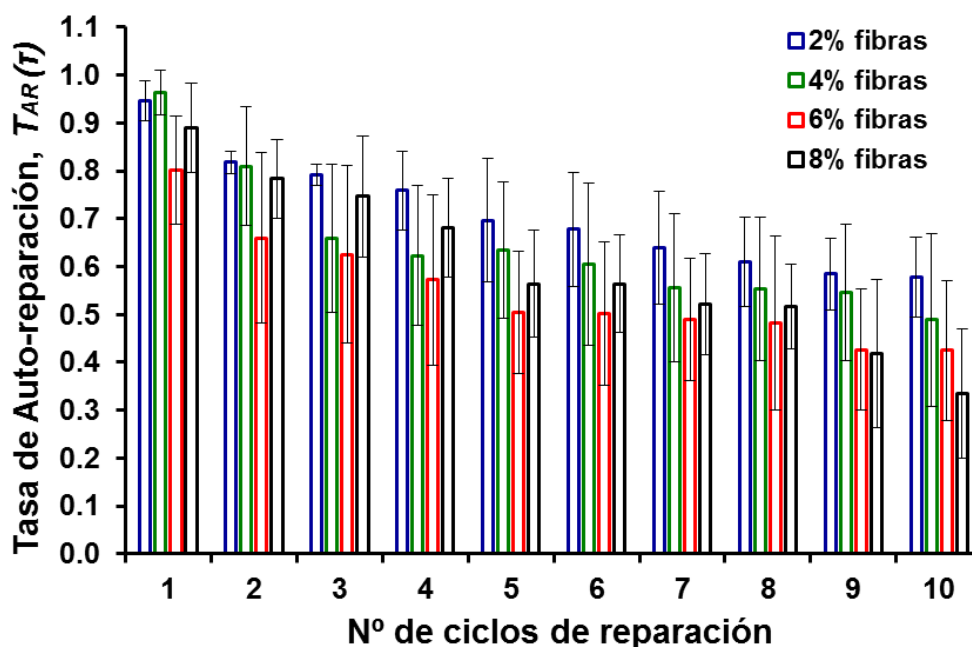


Figura 9. Nivel de reparación en función del número de ciclos con microondas.

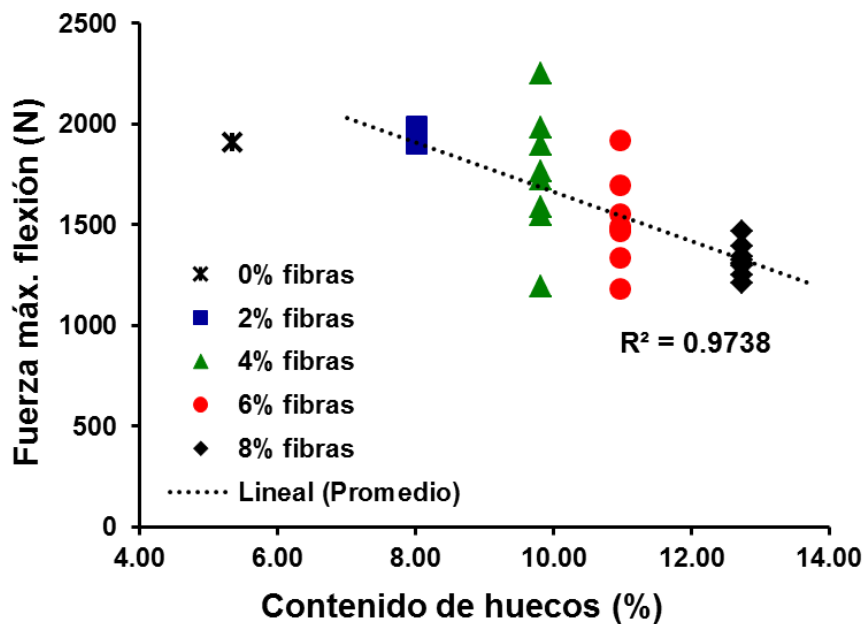


Figura 10. Referencia de la fuerza máxima a la flexión a una temperatura de -20°C en función del contenido de huecos en mezcla.

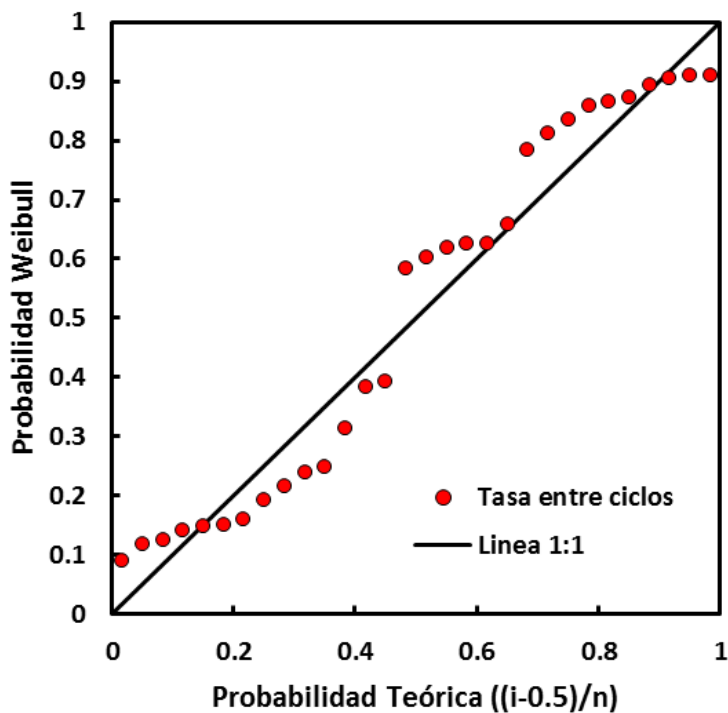


Figura 11. Gráfico probabilidad-probabilidad Weibull de reparación entre ciclos.

4 CONCLUSIONES

- En este estudio, se ha comprobado que el cemento asfáltico CA-24 no sufre pérdidas de masa considerables a las temperaturas de mezclado y ensayo, lo cual hace que no varíen sus propiedades.
- También, se ha comprobado que las fibras de lana de acero pueden verse dañadas por efecto de los procesos de mezclado y compactación Marshall. Esto puede deberse a que al tratarse de fibras gruesas y de longitud media, éstas son más susceptibles al impacto de los áridos durante los procesos de mezclado y compactación mecánica usando el martillo Marshall.
- Además, se ha comprobado que la densidad aparente de las mezclas con fibras se reduce proporcionalmente con el incremento del contenido de huecos. Esta disminución se atribuye principalmente a la variación del volumen total de cada muestra más que a la variación de su masa neta.
- Por otra parte, se pudo observar que la temperatura de las mezclas incrementa linealmente con el tiempo de calentamiento en microondas, y que las mezclas con un mayor volumen de fibras presentan una mayor velocidad de calentamiento. De este modo, las fibras de lana de acero ayudan a incrementar la temperatura de las mezclas con fines de la auto-reparación usando calentamiento por radiación microondas.
- Adicionalmente, se ha comprobado que el calentamiento por radiación microondas ayuda a la reparación mecánica de las mezclas agrietadas con fibras, y que este nivel de reparación disminuye con el incremento del número de ciclos independientemente del contenido de fibras en la mezcla.
- Por otra parte, se ha demostrado que adicionar un 2% de fibras a una mezcla asfáltica no produce pérdidas de su resistencia mecánica y sí supone una mayor tasa de auto-reparación. Sin embargo, ocurre lo contrario en el caso de mezclas con mayor contenido de fibras, debido principalmente a la distribución de las mismas dentro de la mezcla asfáltica.
- Finalmente, en base a los resultados obtenidos se recomienda continuar ésta investigación referente al proceso de reparación usando el calentamiento por microondas ampliando el estudio, con el objetivo de que en un futuro puedan construirse nuevos pavimentos con una mayor resistencia mecánica y mayor vida útil, impactando directamente la construcción de pavimentos asfálticos en Chile.

5 REFERENCIAS

- 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.
- Fitzgerald, R.L. (2000). Novel applications of carbon fiber for hot mix asphalt reinforcement and carbon-carbon pre-forms. MSc Thesis, Michigan Technological University, USA.
- García, A. (2011). Self-Healing of open cracks in asphalt mastic. *FUEL*, 93, 264-272.
- García, A., Norambuena-Contreras, J., Partl, M.N., Schuetz, P. (2013). Uniformity and mechanical properties of dense asphalt concrete with steel wool fibers. *Construction and Building Materials*, 43, 107-117.
- García, A., Norambuena-Contreras, J., Partl, M.N. (2013). Experimental evaluation of dense asphalt concrete properties for induction heating purposes. *Construction and Building Materials*, 46, 48-54.
- García, A., Pacheco-Bueno, M., Norambuena-Contreras, J., Partl, M.N. (2013) Induction healing of dense asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 1-7.
- García, A., Norambuena-Contreras, J., Partl, M.N. (2014). A parametric study on the influence of steel wool fibers in dense asphalt concrete. *Materials and Structures*, 47(9), 1559-1571.
- García, A., Norambuena-Contreras, J., Pacheco-Bueno, M., Partl, M.N. (2015) Single and multiple healing of porous and dense asphalt concrete. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26, 425-433.
- 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.
- Liu, Q. (2012). Induction healing of porous asphalt concrete. Ph.D. Thesis. TU Delft, the Netherlands.
- MOP. (2012). Memoria Anual de la Dirección de Vialidad: Red Vial Nacional Dimensionamiento y Características. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.
- 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.
- Wu, S.P., Mo, L.T., Shui, Z.H., Chen, Z. (2005). Investigation of the conductivity of asphalt concrete with conductive fillers. *Carbon*, 43(7), 1358-1363.