

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

PROFESOR PATROCINANTE:

DR. JOSÉ NORAMBUENA CONTRERAS

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
MECÁNICO Y DE AUTO-REPARACIÓN DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS REFORZADAS CON
FIBRAS METÁLICAS**

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

MANUEL RIFFO OÑATE

Concepción, Diciembre de 2016

DEDICATORIA

A mi familia y amigos...

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi profesor guía Dr. José Norambuena por su entrega, buena disposición y gran apoyo tanto en el ámbito académico como personal. Destacando los valores y consejos que me transmitió a lo largo de todo este proceso, los cuales servirán a mi formación tanto humana como profesional. Además, agradecer por sobre todas las cosas, la confianza depositada en mi para ser parte de este Proyecto.

De igual forma, agradecer a la profesora Irene González-Torre por su disposición, amabilidad y cooperación durante todo el trabajo experimental, en el cual fue una compañera y una gran persona de la cual pude aprender mucho. Así también, agradezco a José Luis Concha por sus recomendaciones, y su gran ayuda en todos los momentos que fue necesario.

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 del cual forma parte esta investigación.

También, agradezco a Isabella por su apoyo y cariño incondicional a lo largo de todo este proceso, acompañándome en todas las etapas implicadas a esta investigación. Su compañía y su ayuda durante este año han hecho que este camino sea mucho más fácil de recorrer.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a mi familia, y por sobre todo a mis padres, quienes han velado siempre por mi bienestar, no sólo durante esta memoria de título, sino durante toda mi vida. Sin duda representan gran parte de este logro y no existen palabras suficientes para expresar mi agradecimiento y admiración hacia ellos.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DE AUTO-REPARACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS REFORZADAS CON FIBRAS METÁLICAS

Manuel Riffo Oñate

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
maariffo@alumnos.ubiobio.cl

Dr. José Norambuena Contreras

LabMAT, 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 tiene como objetivo el desarrollo de una nueva mezcla asfáltica reforzada con fibras metálicas con propiedades de auto-reparación usando calentamiento por microondas. Esta investigación tiene como principal objetivo evaluar la influencia de las fibras metálicas en la resistencia mecánica y propiedades de auto-reparación de las nuevas mezclas asfálticas reforzadas. Con este objetivo, se evaluaron cuatro diferentes diseños de mezclas asfálticas, empleando la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico en la mezcla, pero con cuatro diferentes porcentajes de fibras (2%, 4%, 6% y 8%). Se han evaluado las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas a través del ensayo de tracción indirecta en probetas pre-acondicionadas en tres diferentes estados: seco, saturado en agua y envejecido. Por otro lado, las propiedades de auto-reparación de las mezclas asfálticas se han estudiado mediante el ensayo de flexión en 3 puntos antes y después del sanado por calentamiento con radiación microondas a 4 diferentes tiempos: 10s, 20s, 30s, y 40s. Los resultados principales de esta investigación mostraron que independientemente del estado de pre-acondicionamiento, las fibras metálicas no tienen una influencia significativa en la resistencia a la tracción indirecta de las mezclas asfálticas. Además, se observó que el contenido de fibras tampoco tiene una influencia significativa en los niveles de reparación de las probetas, sino que el tiempo de calentamiento es la variable más influyente en la auto-reparación de las mezclas asfálticas usando calentamiento por microondas. Finalmente, se determinó que el tiempo óptimo de sanado es 40s, aunque este puede cambiar a 30s dependiendo del contenido de fibras.

Palabras clave: Mezcla asfáltica; Fibras metálicas; Influencia de las fibras; Resistencia mecánica; Auto-reparación; Calentamiento microondas.

Conteo de palabras: 8494+21 Figuras/Tablas*250+1 Figura/Tabla* 500=14244 Palabras Totales.

EVALUATION OF MECHANICAL AND SELF-HEALING BEHAVIOR OF ASPHALT MIXTURES REINFORCED WITH METALLIC FIBERS

Manuel Riffo Oñate

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío

maariffo@alumnos.ubiobio.cl

José Norambuena Contreras, Ph.D

LabMAT, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío

jnorambuena@ubiobio.cl

ABSTRACT

This Thesis is part of a research Project focused on the development of a new asphalt mixture reinforced with metallic fibres with self-healing properties via microwave heating. The main objective of this research was to evaluate the influence of the metallic fibres on the mechanical strength and the self-healing properties of the new reinforced asphalt mixtures. With this purpose, four different asphalt mixtures were evaluated, with the same aggregates gradation and bitumen content but adding four different percentages of fibres (2%, 4%, 6% and 8%). The mechanical properties of the asphalt mixtures were evaluated through the Indirect Tensile Strength Test on specimens pre-conditioned under three environmental states: dry, water-saturated and ageing. Moreover, the self-healing properties of the asphalt mixtures were studied through the 3 Point Bending Test, before and after healing the specimens by microwave radiation at four different heating times: 10s, 20s, 30s and 40s. The main results of this research showed that the metallic fibres did not have a significant influence on the Indirect Tensile Strength of the asphalt mixtures, regardless of the environmental state. In addition, it was observed that the amount of fibres also has not significant influence on the specimens healing levels, but it is heating time the most influential variable on the self-healing of asphalt mixtures using microwave heating. Finally, it was determined that 40s is the optimum heating time, although it can change to 30s depending on the amount of fibres.

Keywords: Asphalt mixture; Metallic fibres; Fibres influence; Mechanical strength; Self-healing; Microwave heating.

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.....	4
2.1	MATERIALES.....	4
2.2	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO.....	4
2.3	DENSIDAD APARENTE Y CONTENIDO DE HUECOS.....	5
2.4	DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD Y DIÁMETRO DE LAS FIBRAS.....	6
2.5	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA.....	6
2.6	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....	7
2.7	CALENTAMIENTO POR RADIACIÓN MICROONDAS.....	8
2.8	MEDIDA DE LA AUTO-REPARACIÓN USANDO CALENTAMIENTO POR MICROONDAS.....	9
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	10
3.1	INFLUENCIA DE LAS FIBRAS EN LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	10
3.2	INFLUENCIA DE LAS FIBRAS EN LAS PROPIEDADES DE CALENTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	15
3.3	INFLUENCIA DE LAS FIBRAS EN LAS PROPIEDADES DE AUTO-REPARACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	17
4	CONCLUSIONES.....	24
5	REFERENCIAS.....	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición de la mezcla asfáltica reforzada con fibras.	6
Tabla 2. Resultados promedio y desviaciones estándar de la densidad aparente y los contenidos de huecos medidos en las mezclas Marshall.	12
Tabla 3. Ratios promedio de variación del valor de ITS en función del estado ambiental y del contenido de fibras en las mezclas asfálticas.....	14
Tabla 4. Resultados del ensayo de calentamiento-enfriamiento de las mezclas asfálticas.....	15

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. (a) Fibras metálicas utilizadas, (b) Histograma de frecuencia de longitudes de fibras....	7
Figura 2. Ensayo de flexión en 3 puntos sobre probetas de mezcla asfáltica semi-circulares: (a) disposición del ensayo, y (b) probeta de ensayo de flexión en 3P.	8
Figura 3. (a) Configuración del ensayo de calentamiento usando microondas, y (b) esquema de la toma de datos de temperaturas superficiales en video termográfico.	9
Figura 4. Resultados de la Resistencia a Tracción Indirecta (ITS) en función del estado ambiental, para la mezcla asfáltica con distintos contenidos de fibras.	11
Figura 5. Gráfico de probabilidad-probabilidad Normal para los datos de Ratio ITS.	13
Figura 6. Valores de Resistencia a Tracción Indirecta en función del contenido de vacíos.	14
Figura 7. Imágenes termográficas de la mezcla asfáltica para un tiempo de calentamiento de 40s y distintos contenidos de fibras.	16
Figura 8. Nivel de reparación de las mezclas asfálticas en función del número de ciclos de sanado y contenido de fibras, calentadas a: (a) 10s, (b) 20s, (c) 30s, y (d) 40s.....	18
Figura 9. Fuerza inicial resistida a flexión en función del contenido de huecos.....	19
Figura 10. Grafico probabilidad-probabilidad Weibull para los valores de tasa de reducción entre ciclos.....	21
Figura 11. Nivel de reparación de las probetas con 4% de fibras, para los distintos tiempos de calentamiento.....	22
Figura 12. Valores promedio de los Ratio del nivel de sanado con respecto al nivel de sanado con 40s ($HLR_{r/40s}$), para los diferentes tiempos de calentamiento y contenidos de fibras.	23

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Una mezcla asfáltica es un material compuesto de áridos y cemento asfáltico. El cemento asfáltico es un hidrocarburo derivado del petróleo que se utiliza para unir los áridos (Read & Whiteoak, 2013). Las mezclas asfálticas son uno de los materiales más usados en la construcción de pavimentos a nivel mundial, sin embargo, su resistencia mecánica y su durabilidad se ve afectada debido a su permanente exposición a las condiciones climáticas y a las cargas de tráfico (Delgadillo et al., 2012). Los factores principales que afectan la durabilidad de los pavimentos asfálticos son: el envejecimiento, el cual se manifiesta como un incremento en la rigidez del cemento asfáltico (Airey, 2003); los daños por agua, los cuales generalmente se manifiestan como una pérdida de cohesión en la mezcla y/o una pérdida de adhesión en la interfaz de cemento asfáltico y áridos (Airey & Choi, 2002); y, el agrietamiento térmico, el cual se manifiesta con la contracción que sufre el pavimento a baja temperatura cuando la tensión térmica inducida es mayor que la resistencia a la tracción del cemento asfáltico a esa temperatura (Zubeck & Vinson, 1996). Con la finalidad de mejorar el comportamiento mecánico de los pavimentos flexibles ante estos factores, se pueden incorporar diferentes tipos de fibras (fibras de celulosa y minerales (Hassan et al., 2005), fibras de polipropileno y poliéster (Wu et al., 2008), y diversos polímeros, lana de acero, y otras fibras procedentes de residuos (Putman & Amirghanian, 2004)) a la matriz de la mezcla asfáltica (Abtahi et al., 2010). Concretamente las fibras metálicas tienen una alta resistencia a la tracción comparada con las mezclas asfálticas, por lo que al ser incorporadas a la matriz de la mezcla asfáltica pueden mejorar la resistencia a la tracción y la fuerza de cohesión de éstas (Abtahi et al., 2010). Además, estas fibras pueden contribuir a prevenir la formación y propagación de grietas (Maurer Dean & Gerald, 1989). Por otro lado, las fibras metálicas en mezclas asfálticas son conocidas por mejorar sus características de resistencia, fatiga y ductilidad (Fitzgerald, 2000). Por lo tanto, las mezclas asfálticas reforzadas con fibras pueden tener una buena resistencia al envejecimiento, a los daños por agua, y resistencia al agrietamiento (McDaniel, 2015). Por otra parte, las fibras metálicas pueden ser adicionadas a la mezcla con el objetivo de incrementar la conductividad térmica y eléctrica (Liu, 2012). De este modo, las fibras metálicas se han utilizado en el desarrollo de nuevos pavimentos flexibles con fines energéticos (Wu et al., 2015) y de auto-reparación de sus grietas usando procesos de calentamiento por inducción electromagnética (Liu, 2012; García et al., 2015; García, 2011; García et al., 2013; Norambuena-Contreras & García,

2013) o radiación microondas (Norambuena-Contreras & García, 2013; Sun et al., 2014; Norambuena-Contreras & Concha, 2016; Gallego et al., 2013). Es bien sabido que los pavimentos asfálticos presentan propiedades de auto-reparación cuando alcanzan altas temperaturas durante la temporada de verano, lo que significa que las grietas en el pavimento pueden cerrarse por sí solas (Liu, 2012). Esto es debido a que la viscosidad del cemento asfáltico está relacionada con la temperatura. En consecuencia, cuando el cemento asfáltico alcanza cierto umbral de temperatura (que puede variar entre 30-70°C), éste comienza a fluir a través de cualquier posible micro-grieta abierta en el pavimento, por capilaridad (Norambuena-Contreras & García, 2013). Actualmente, existen diferentes tecnologías que pueden acelerar el proceso de reparación de las mezclas asfálticas. Una de ellas es el calentamiento por inducción electromagnética (Norambuena-Contreras & García, 2013). Este método consiste en incorporar materiales ferrosos (como fibras metálicas) en la mezcla asfáltica y exponerla a un campo electromagnético alterno de frecuencia del orden de Kilohertz (García et. al., 2012) mediante un dispositivo de calentamiento por inducción. Este proceso induce una corriente eléctrica en las partículas ferrosas que aumentan su temperatura por el principio de Joule, así la energía térmica se difunde en la mezcla asfáltica, aumentando la temperatura del cemento asfáltico (García et al., 2011). Por otro lado, otro método es el calentamiento por radiación microondas, donde las mezclas asfálticas son expuestas a campos electromagnéticos alternos de frecuencia del orden de Megahertz (Gallego et al., 2013). Este proceso se lleva a cabo con la ayuda de un dispositivo de radiación electromagnética como un horno microondas. El calentamiento por microondas afecta al cemento asfáltico en la mezcla. Esto provoca que las moléculas polares cambien su orientación como resultado del campo electromagnético, lo que resulta en la fricción interna y en un aumento de la temperatura del material (Norambuena-Contreras & García, 2013). Además, si se incorporan materiales ferrosos (como fibras metálicas) a la mezcla, éstos pueden reflejar la radiación microondas y acelerar el proceso de aumento de temperatura (Collin, 2000). De esta manera, las fibras metálicas pueden ser usadas para incrementar las tasas de calentamiento de las mezclas asfálticas considerando que pueden absorber más energía térmica que los otros componentes de la mezcla (áridos y cemento asfáltico) (Norambuena-Contreras & Concha, 2016). Por todo lo anterior, la adición de fibras puede tener influencia en las propiedades mecánicas y de auto-reparación de la nueva mezcla asfáltica, aunque aún no está claro de qué forma se produce. Por lo tanto, esta investigación tiene como principal objetivo evaluar la influencia de las fibras metálicas en el comportamiento mecánico y de auto-reparación de una nueva mezcla asfáltica. Con este objetivo, se han estudiado en laboratorio

cuatro diferentes diseños de mezclas asfálticas, empleando la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico en la mezcla, pero con cuatro diferentes porcentajes de fibras (2%, 4%, 6% y 8%). Por un lado, se han evaluado las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas a través del ensayo de tracción indirecta en probetas pre-acondicionadas en tres diferentes estados: seco, saturado en agua y envejecido. Por otro lado, las propiedades de auto-reparación de las mezclas asfálticas se han estudiado mediante el ensayo de flexión en 3 puntos antes y después del sanado por calentamiento con radiación microondas a 4 diferentes tiempos de calentamiento: 10s, 20s, 30s, y 40s. Este proceso se repitió de forma cíclica diez veces en cada muestra de ensayo.

1.2 Hipótesis

- La adición de fibras metálicas en las mezclas asfálticas puede mejorar su comportamiento mecánico frente a una mezcla asfáltica de referencia sin fibras.
- La adición de fibras metálicas en las mezclas asfálticas puede mejorar sus propiedades de auto-reparación.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivos generales*

- Evaluar la influencia del contenido de fibras metálicas en la resistencia mecánica y propiedades de auto-reparación de las mezclas asfálticas.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Medir las propiedades morfológicas de las fibras metálicas usando microscopía óptica.
- Determinar la densidad y porosidad de las mezclas con y sin adición de fibras metálicas.
- Evaluar la influencia del contenido de fibras en la resistencia mecánica a tracción indirecta de mezclas asfálticas con y sin adición de fibras pre-acondicionadas en tres diferentes estados: seco, saturado en agua y envejecido.
- Medir las propiedades de calentamiento de las mezclas con y sin adición de fibras a cuatro diferentes tiempos de calentamiento (10s, 20s, 30s y 40s) usando radiación microondas.
- Medir las propiedades de auto-reparación de las mezclas asfálticas con fibras a cuatro diferentes tiempos de calentamiento por microondas: 10s, 20s, 30s, y 40s.
- Realizar un análisis comparativo entre las variables medidas.

1.4 Declaración de autor

Parte de la redacción de esta Tesis ha sido extraída de la publicación: Norambuena-Contreras J, Riffo M, Gonzalez-Torre I. Influence of the microwave heating time on the self-healing properties of asphalt mixtures. *Artículo en preparación para ser enviado al Special Issue "Self-Healing Asphalt", de la revista Applied Sciences. Enero 2017.*

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

En esta investigación se ha utilizado una mezcla asfáltica semi-densa tipo IV-A-12, por ser ésta 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. Los áridos, de procedencia fluvial, fueron clasificados en tres fracciones: árido grueso o gravilla (entre los tamices 5 y 12.5mm y densidad 2.779g/cm³), árido fino o arena (entre los tamices 0.08 y 5mm y densidad 2.721g/cm³), y filler (tamiz<0.08mm y densidad 2.814g/cm³). El cemento asfáltico usado fue un CA24 con una densidad de 1.039g/cm³. Además, se añadieron a la mezcla asfáltica fibras metálicas cortadas mecánicamente. El material usado para las fibras fue acero de bajo contenido en carbono, con una densidad de 7.180g/cm³. Estas fibras tienen un diámetro promedio de 0.157mm con una relación de aspecto promedio de 30 y una longitud inicial en el rango de 2 a 8mm, lo que significa que tanto fibras cortas como largas fueron sumadas a la matriz de mezcla asfáltica. Finalmente, se usaron 5 porcentajes diferentes de fibras en las mezclas: 0%, 2%, 4%, 6% y 8%, por volumen total del cemento asfáltico, ver Tabla 1. Por tanto, 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 la mezcla, pero cambiando las cantidades de fibras incorporadas a la mezcla.

2.2 Preparación de las muestras de ensayo

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. Previamente 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. Para el mezclado, los materiales fueron vertidos al recipiente metálico en el siguiente orden: primero, el

cemento asfáltico y las fibras; segundo, el árido grueso; tercero, el árido fino y finalmente, el filler. Los materiales fueron mezclados durante un tiempo aproximado de 3.5 minutos, conservando una temperatura de mezclado constante de 150°C en el interior del recipiente. Una vez mezclados los materiales y garantizando una buena distribución de las fibras, las mezclas se dispusieron en el interior de un molde Marshall previamente calentado (10cm de diámetro y 6cm de altura) y fueron compactadas 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. De esta forma, se fabricaron un total 70 muestras Marshall para este estudio (56 con fibras y 14 sin fibras), en donde 45 fueron utilizadas para los ensayos de tracción indirecta, y las 25 restantes fueron serradas en 4 probetas semi-circulares, obteniendo un total de 100 probetas semi-circulares de 10cm de diámetro y 5cm de altura. Finalmente, 20 probetas semi-circulares fueron utilizadas para los ensayos de calentamiento y las 80 restantes se destinaron a los ciclos de rotura-sanado.

2.3 Densidad aparente y contenido de huecos

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 incluyendo huecos obtenido a partir de la masa sumergida en agua, de cada muestra. De este modo, el contenido de huecos de cada muestra de ensayo se ha calculado en base al cálculo previo de la densidad aparente. Por lo tanto, como el porcentaje exacto de los materiales y su densidad son conocidos para cada tipo de mezcla, se ha calculado la densidad máxima teórica sin huecos para cada tipo de mezcla. De este modo, el contenido de huecos en la mezcla (CH) para cada muestra de ensayo se ha calculado como:

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

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 calculadas como el valor promedio de 14 probetas por cada diseño de mezcla con fibras y 14 probetas para las mezclas sin fibras.

2.4 Determinación de la longitud y diámetro de las fibras

Para determinar la longitud de las fibras añadidas a las mezclas, se seleccionaron 120 fibras metálicas al azar del total disponible para la fabricación de todas las muestras Marshall. La longitud promedio de las fibras metálicas individuales se calculó tomando fotografías utilizando un microscopio óptico con un aumento de 35x, y midiendo la longitud de fibras individuales con un programa de procesamiento de imágenes (ImageJ®, ver Figura 1(a)). Para ello, el programa de imagen consideró que 148 píxeles eran equivalentes a una longitud de 1mm. Por otra parte, el diámetro promedio de las fibras se calculó a partir de 10 fibras individuales usando un micrómetro digital calibrado (Ver la Tabla 1).

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

Sieve size (mm)	Aggregate mass % retained	Cumulative aggregate mass % retained	Mass (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
Bitumen CA-24	(% of mass/ aggregates)	5.3	58.3
Steel wool fibres (% of vol./Bitumen)	Length range (mm)	Average diameter (mm)	
2% fibres			8
4% fibres			16
6% fibres	2-8	0.157	24
8% fibres			32

2.5 Resistencia a la tracción indirecta

La resistencia a la tracción indirecta (Indirect Tensile Strength, ITS) fue determinada según la norma Europea EN 12697-23:2003. Esta metodología consiste en obtener la fuerza máxima resistida por una probeta cilíndrica (tipo Marshall) sometida a una carga de compresión diametral hasta su rotura, a la temperatura de ensayo (5°C) y la velocidad de desplazamiento (50 mm/min) especificadas. El valor de la ITS se ha obtenido con la siguiente fórmula:

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (2)$$

Donde, ITS es la resistencia a la tracción indirecta en GPa, P es la carga máxima en kN, D es el diámetro de la probeta en mm, y H es la altura de la probeta en mm. Finalmente, con el fin de evaluar la influencia de las condiciones ambientales sobre el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas con y sin fibras, 3 probetas por cada diseño de mezcla asfáltica (0%, 2%, 4%, 6% y 8% de contenido de fibras) fueron sometidas a 3 diferentes estados de acondicionamiento previamente a ser ensayadas: 1) Estado seco (las probetas se acondicionaron a una temperatura de 20°C durante 24 horas), 2) Estado saturado en agua (las probetas se saturaron en agua en un baño termostático a una temperatura de 40°C durante 120 horas), y 3) Estado envejecido (las probetas se acondicionaron en un horno a una temperatura de 85°C durante 240 horas).

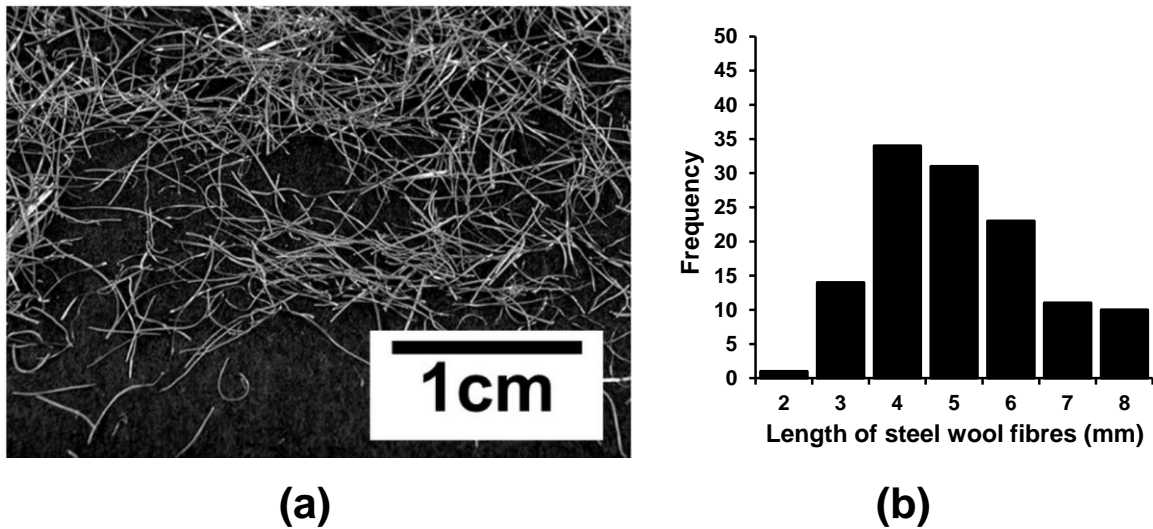


Figura 1. (a) Fibras metálicas utilizadas, (b) Histograma de frecuencia de longitudes de fibras.

2.6 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión en las mezclas asfálticas fue medida mediante el ensayo de flexión en 3 puntos. Este ensayo fue realizado sobre muestras semi-circulares extraídas de las probetas cilíndricas tipo Marshall, ver Figura 2. Además, con la finalidad de controlar el punto de inicio del agrietamiento, una entalladura de 4 mm de anchura y de 10 mm de altura fue realizada en la zona central inferior de las muestras, y en la misma dirección del actuador de carga (ver Figura 2(b)). Por otra parte, con el propósito de generar una falla de tipo frágil en las muestras de mezcla asfáltica

semi-circulares, todas las muestras fueron acondicionadas a una temperatura de -20°C durante las 24 horas previas al ensayo. Los ensayos a flexión consistieron en colocar la muestra semi-circular a -20°C sobre dos soportes cilíndricos distanciados 80mm, y posteriormente cargarla axialmente en su parte media superior a través de un actuador de carga, ver Figura 2(b). El equipamiento usado para los ensayos fue una máquina estática universal de ensayos marca CONTROLS con una célula de carga de 50kN y control por computador (Ver Figura 2(a)). Finalmente, todos los ensayos se realizaron a una velocidad de 5 mm/min.

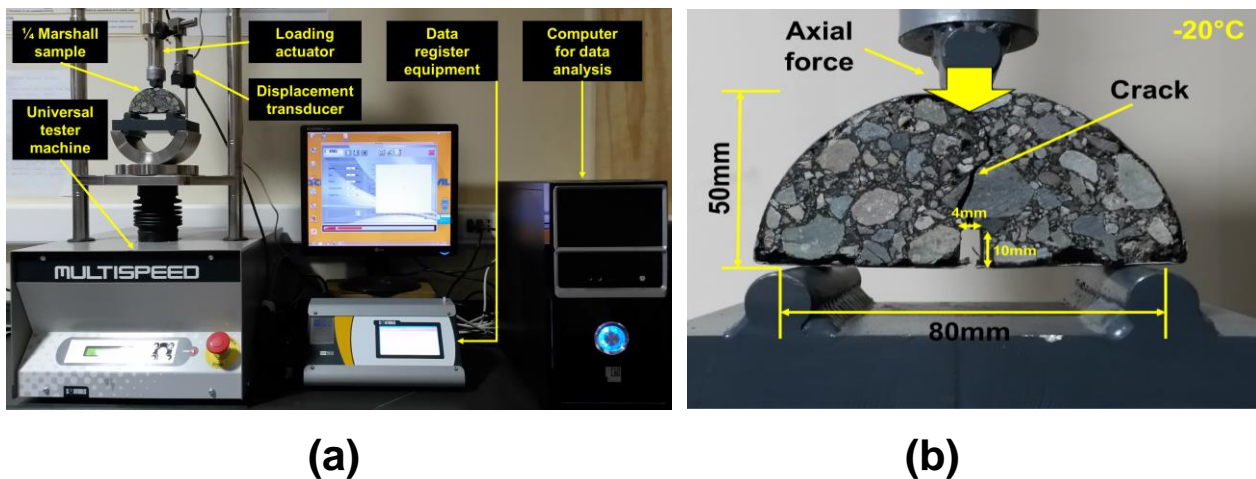


Figura 2. Ensayo de flexión en 3 puntos sobre probetas de mezcla asfáltica semi-circulares: (a) disposición del ensayo, y (b) probeta de ensayo de flexión en 3P.

2.7 Calentamiento por radiación microondas

Para la realización de este ensayo se ha utilizado una probeta semi-circular por cada diseño de mezcla asfáltica (0%, 2%, 4%, 6% y 8% de contenido de fibras) y tiempo de calentamiento (10s, 20s, 30s, y 40s). Un total de 20 probetas fueron calentadas en un horno microondas comenzando el ensayo a una temperatura inicial aproximada de 20°C , ver Figura 3(a). Todos los ensayos de calentamiento fueron realizados con un horno microondas de 700W con una frecuencia de trabajo de 2,45 GHz, lo que corresponde a una longitud de onda de 120 mm (Gallego et al., 2011). La variación de la temperatura en la superficie de las muestras se ha medido usando una cámara termográfica PCI PI160 conectada a un computador. Por cada ensayo se ha obtenido un registro en video de la temperatura superficial de la probeta en tiempo real mediante el software PI Connect. El registro del video comenzó justo al instante en que terminó el calentamiento (una vez abierta la tapa del microondas, ver Figura 3(a)), y su duración fue variable, dependiendo del tiempo de

enfriamiento de cada muestra hasta llegar a la temperatura inicial de 20°C. Adicionalmente, para la captación de los datos se midió la temperatura superficial en 7 puntos discretos de las probetas para cada instante de tiempo. De esta forma, la temperatura superficial máxima se calculó como el promedio de todos los puntos medidos al instante en que se registraron las mayores temperaturas en las muestras, ver Figura 3(b).

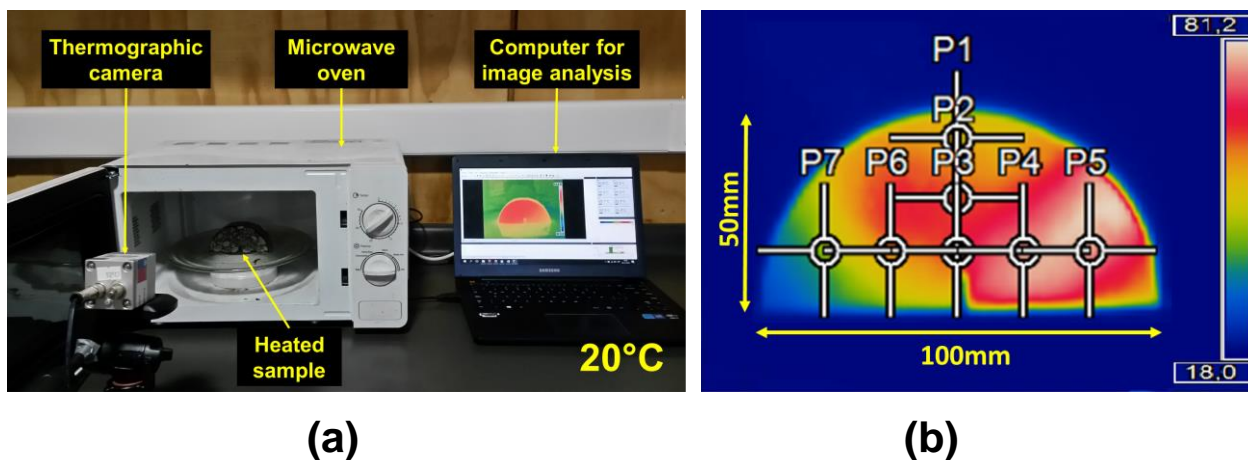


Figura 3. (a) Configuración del ensayo de calentamiento usando microondas, y (b) esquema de la toma de datos de temperaturas superficiales en video termográfico.

2.8 Medida de la auto-reparación usando calentamiento por microondas

La evaluación de la auto-reparación de las muestras asfálticas con fibras usando calentamiento por microondas se ha llevado a cabo según la siguiente metodología: en primer lugar, cada muestra se ensayó bajo el procedimiento del ensayo de flexión en 3 puntos (explicado en la sección 2.6) a una temperatura de -20°C, hasta que se rompió en dos partes. Después de esto, las muestras rotas se acondicionaron durante 2 horas a una temperatura de 20°C hasta que la humedad superficial debida a la descongelación se ha secado por completo. Posteriormente, las dos partes de la muestra fueron unidas nuevamente y calentadas mediante radiación microondas a diferentes tiempos de calentamiento (10s, 20s, 30s y 40s). Una vez realizado el calentamiento, las muestras se dejaron enfriar a una temperatura de 20°C para luego ser acondicionadas a -20°C y sometidas de nuevo al procedimiento del ensayo a flexión 3 puntos, completando así un ciclo de rotura-sanado. De este modo, el nivel de reparación alcanzado para cada muestra (NR) se puede definir como la relación entre la fuerza máxima soportada por la muestra ensayada inicialmente (F_i) y la fuerza máxima soportada por la muestra tras el proceso de reparación (F_r).

$$NR = \frac{Fr}{Fi} \quad (3)$$

Finalmente, para cuantificar la eficiencia del proceso repetido de reparación, se realizaron 10 ciclos de rotura-sanado por cada muestra.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Influencia de las fibras en la resistencia a la tracción indirecta de las mezclas asfálticas

En la Figura 4 se muestran los valores promedio de la resistencia a la tracción indirecta (ITS) medidas en mezclas asfálticas con distintos contenidos de fibras, en función del estado de acondicionamiento al que fueron sometidas las probetas. Adicionalmente, las barras de error que representan las desviaciones estándar de los valores promedio también se presentan en la Figura. Esta gráfica evidencia la influencia del estado de acondicionamiento y del contenido de fibras en la ITS de las muestras. Se puede observar que la resistencia a tracción indirecta (ITS) registrada en las mezclas asfálticas se vio reducida en las muestras que fueron pre-acondicionadas en los estados saturado en agua y envejecido, en relación a las probetas que se ensayaron en estado seco. Además, se observa que las muestras envejecidas han registrado las menores resistencias a tracción indirecta, seguidas por las muestras saturadas en agua, y las secas, en ese orden, ver Figura 4. La reducción de los valores de ITS en las probetas envejecidas se atribuye al proceso de oxidación del cemento asfáltico (moléculas de hidrocarburo combinándose con moléculas de oxígeno), el cual ocurre con mayor facilidad a altas temperaturas (Airey, 2003).

Por otro lado, en el caso de las probetas saturadas, la reducción de los valores de ITS se atribuye al ingreso del agua en la matriz de mezcla asfáltica. Esto ocurre debido a que el ángulo de contacto entre el agua y el cemento asfáltico es relativamente pequeño, por lo que el agua puede penetrar con facilidad en la interfaz entre cemento asfáltico y áridos (Airey & Choi, 2002). Tanto los efectos tanto del agua, como los del proceso de oxidación en las probetas se traducen en una disminución de las propiedades adhesivas de las mezclas asfálticas y por consiguiente, un aumento en las propiedades cohesivas de las moléculas del cemento asfáltico (Airey, 2003; Airey & Choi, 2002). Producto de esto se genera una pérdida de áridos en la mezcla asfáltica (stripping), y un aumento en la viscosidad del cemento asfáltico (endurecimiento) (Norambuena-Contreras et al., 2016), lo que puede ocasionar una disminución en los valores de ITS para las muestras ensayadas bajo estos pre-tratamientos.

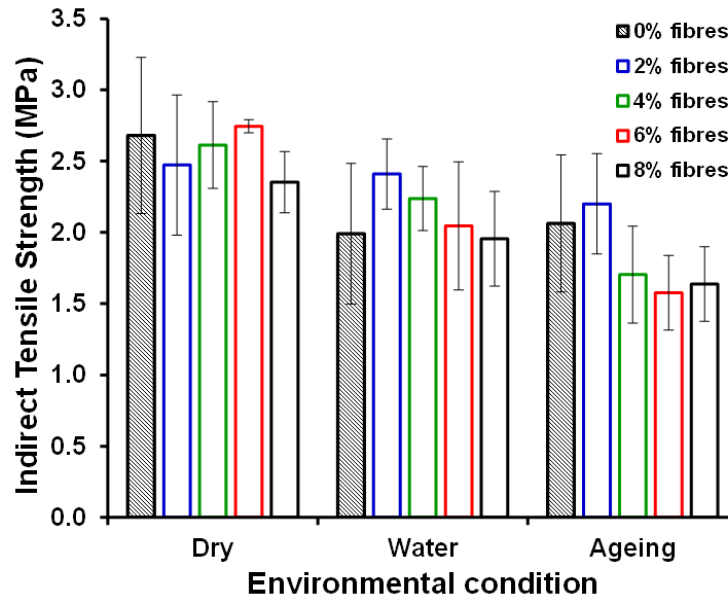


Figura 4. Resultados de la Resistencia a Tracción Indirecta (ITS) en función del estado ambiental, para la mezcla asfáltica con distintos contenidos de fibras.

Por otra parte, se ha analizado la influencia del contenido de fibras en las mezclas asfálticas. Como se observa en la Figura 4, las mezclas con un 6% de fibras presentaron los mayores valores de ITS en el estado seco. Sin embargo, no se observa una tendencia clara relacionada con el contenido de fibras dentro de las mezclas asfálticas y en general, todas las probetas registran valores de ITS similares para este estado. Además, en el caso de las probetas que fueron sometidas a otros pre-acondicionamientos (muestras saturadas y envejecidas), se puede observar que mezclas con un 2% de contenido de fibras mostraron mayores valores de ITS que las mezclas de referencia (muestras sin fibras).

Adicionalmente, la Figura 4 muestra como la ITS va disminuyendo a medida que aumenta el contenido de fibras en las muestras. De esta forma, las mezclas con un 2% de contenido de fibras registraron mayores valores de ITS que las mezclas con un 4%, 6%, y 8 % de contenido de fibras para estos pre-acondicionamientos. De esta forma, se puede deducir que las fibras metálicas pueden mejorar la resistencia a la tracción indirecta en las mezclas. Sin embargo, como el contenido de huecos en las mezclas incrementa con el contenido de fibras (ver Tabla 2), este incremento en los valores de la ITS se ve disminuido. Esto puede deberse a que probetas con mayores contenido de huecos son más susceptibles a verse afectadas por factores ambientales como el agua, el aire y las altas temperaturas.

Tabla 2. Resultados promedio y desviaciones estándar de la densidad aparente y los contenidos de huecos medidos en las mezclas Marshall.

Fibres content (%)	Bulk density (g/cm ³)	Air void content (%)
2	2.33±0.02	7.45±0.98
4	2.32±0.02	8.70±0.98
6	2.31±0.02	9.64±0.92
8	2.28±0.03	11.43±0.97
Ref. 0	2.33±0.02	6.70±0.85

Sin embargo, observando las desviaciones estándar de los resultados (representados por las barras de error, ver Figura 4) de los valores de las ITS independientemente del estado de acondicionamiento de las probetas, se puede observar que la variabilidad de los resultados de las mezclas asfálticas con y sin fibras fue similar. Lo que significa que si una de las muestras estudiadas para una condición ambiental en particular se escogiera al azar, la diferencia entre una mezcla asfáltica sin fibras y con un cierto contenido de fibras no sería significativa. Esto sugiere que dentro del rango de contenidos de fibras y estados de acondicionamiento explorados en este estudio, el contenido de fibras no parece tener una influencia significativa en el valor de ITS. Sin embargo, con el objetivo de analizar estadísticamente la influencia del contenido de fibras en el valor de ITS de las mezclas asfálticas, se ha calculado el Ratio ITS, el cual se ha definido con la siguiente ecuación:

$$\text{Ratio ITS} = \frac{ITS_{i\%,\text{treatment } j}}{ITS_{0\%,\text{treatment } j}} \quad (4)$$

Donde $ITS_{i\%,\text{treatment } j}$ es el valor de la resistencia a la tracción indirecta para un porcentaje $i\%$ de fibras y un estado ambiental j , y $ITS_{0\%,\text{treatment } j}$ es el valor de la resistencia a la tracción indirecta promedio para un 0% de fibras en el estado equivalente j .

De esta forma, en la Figura 5 se presenta el gráfico probabilidad-probabilidad Normal de estos valores. Los resultados han mostrado que los valores de Ratio ITS pueden alinearse en una línea recta con una pendiente de 1:1, es decir, los datos se ajustan a la distribución de probabilidad

Normal. Esto significa que las diferencias en los valores de ITS entre las muestras de ensayo con y sin fibras metálicas se deben a la dispersión de los datos (ver Figura 4), y que ni el contenido de fibras ni los estados ambientales de ensayo han influido de forma significativa en la resistencia a la tracción indirecta de las mezclas asfálticas.

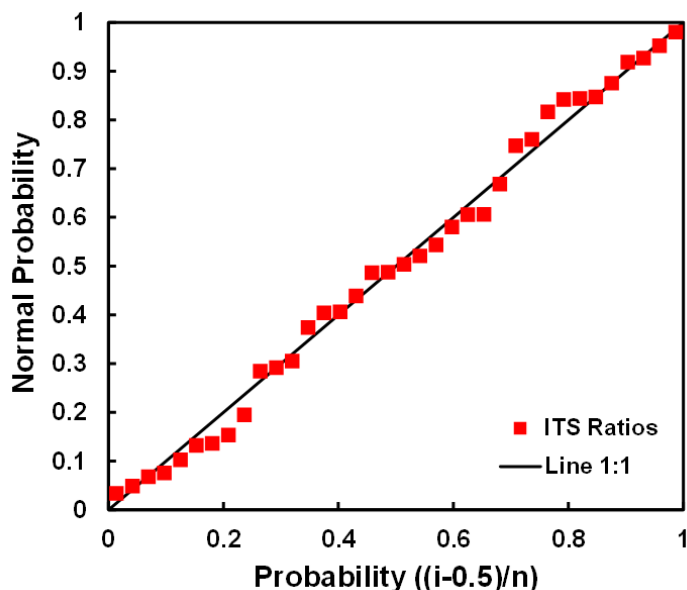


Figura 5. Gráfico de probabilidad-probabilidad Normal para los datos de Ratio ITS.

Por otra parte, con la finalidad de analizar cuál de los estados ambientales (saturado en agua y envejecido) ha sido el que ha tenido una mayor influencia en el valor de la ITS en las probetas con fibras, se ha calculado el Ratio $ITS_{env. condition}$, el cual se ha definido según la siguiente ecuación:

$$Ratio\ ITS_{env.\ condition} = \frac{ITS_{i\%,\ treatment\ j}}{ITS_{i\%,\ dry}} \quad (5)$$

Donde $ITS_{i\%,\ treatment\ j}$ es el valor de Resistencia a Tracción Indirecta para un porcentaje $i\%$ de fibras, y un estado ambiental j (saturado, envejecido). $ITS_{i\%,\ dry}$ es el valor de Resistencia a Tracción Indirecta promedio para el porcentaje equivalente de fibras, en el estado seco. En la Tabla 3, se presentan los resultados obtenidos para los valores de Ratio $ITS_{env. condition}$.

Tabla 3. Ratios promedio de variación del valor de ITS en función del estado ambiental y del contenido de fibras en las mezclas asfálticas.

Environmental condition	Fibres content (%)			
	2	4	6	8
Water	0.97	0.86	0.75	0.83
Ageing	0.89	0.65	0.57	0.70

Como se puede observar en la Tabla 3, tanto el estado envejecido como el saturado tienen una influencia negativa en el valor de ITS obtenido para las mezclas asfálticas con fibras, respecto al estado seco inicial. Asimismo, esta influencia negativa estuvo más marcada en las muestras sometidas al estado de envejecimiento, con un 6% y 4% de contenido de fibras respectivamente. Sin embargo, a la vista de la Figura 5 se concluyó que esta influencia no es estadísticamente significativa. Adicionalmente, en la Figura 5 se ha comprobado que todos los datos corresponden a la misma población ya que estos se ajustan a una distribución de probabilidad Normal. En base a esto, en la Figura 6 se han agrupado en un solo gráfico todos los datos de los valores obtenidos de las ITS, independientemente del contenido de fibras y de los pre-tratamientos de ensayo. Esta gráfica muestra los valores de resistencia a tracción indirecta en función del contenido de vacíos en las mezclas asfálticas. Finalmente, como se observa en la Figura se concluyó que la resistencia a la tracción indirecta disminuye con el incremento del contenido de huecos en las mezclas asfálticas.

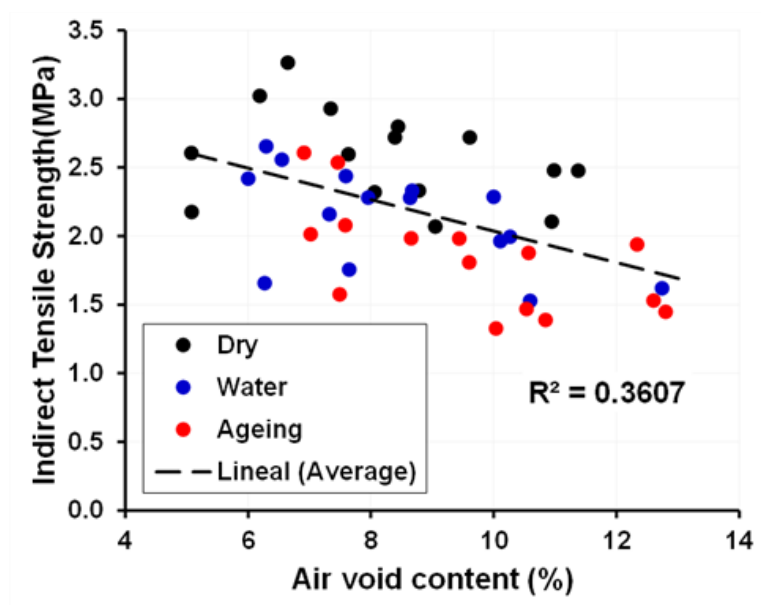


Figura 6. Valores de Resistencia a Tracción Indirecta en función del contenido de vacíos.

3.2 Influencia de las fibras en las propiedades de calentamiento de las mezclas asfálticas

En la Tabla 4 se muestran los resultados del ensayo de calentamiento-enfriamiento de las mezclas asfálticas. En esta tabla se presentan tres valores: la temperatura superficial máxima promedio alcanzada por la probeta ($T_{m\acute{a}x}$), la variación de temperatura superficial experimentada por la probeta durante su enfriamiento (ΔT_{tot}), y el tiempo de enfriamiento, considerando que la probeta se enfría cuando alcanza 20°C (CT).

Tabla 4. Resultados del ensayo de calentamiento-enfriamiento de las mezclas asfálticas.

Fibras content (% vol. bitumen)	Microwave heating time (s)											
	10			20			30			40		
	$T_{m\acute{a}x}$ (°C)	ΔT_{tot} (°C)	CT (min)	$T_{m\acute{a}x}$ (°C)	ΔT_{tot} (°C)	CT (min)	$T_{m\acute{a}x}$ (°C)	ΔT_{tot} (°C)	CT (min)	$T_{m\acute{a}x}$ (°C)	ΔT_{tot} (°C)	CT (min)
2	28.11	8.11	55	40.76	20.76	60	47.33	27.33	63	59.76	39.76	56
4	28.13	8.13	55	45.56	25.56	81	64.90	44.90	85	87.41	67.41	54
6	29.19	9.19	63	55.71	35.71	90	65.30	45.30	87	98.86	78.86	63
8	30.33	10.33	65	47.19	27.19	88	61.93	41.93	81	78.71	58.71	92
Ref. 0	27.91	7.91	48	40.08	20.08	22	45.26	25.26	52	50.46	30.46	44

Con lo que respecta al calentamiento, se puede observar que la temperatura en la superficie de las mezclas asfálticas ($T_{m\acute{a}x}$, ver Tabla 4) incrementa con el tiempo de calentamiento en microondas, y que esta temperatura es mayor para las mezclas con mayor contenido de fibras. De este modo, 40s ha sido el tiempo de calentamiento que ha registrado las temperaturas superficiales máximas, seguidos de 30s, 20s y 10s respectivamente. Adicionalmente, se observa que la mezcla con un 6% de contenido de fibras registró la mayor temperatura superficial, seguido de las mezclas con un de 4%, 8%, 2% y 0% de contenido de fibras (alcanzando temperaturas superficiales de 98.86°C, 87.41°C, 78.71°C, 59.76°C y 50.46°C, respectivamente) para un tiempo de calentamiento de 40s. Sin embargo, se observa que esta tendencia se puede ver reflejada de forma similar para los otros tiempos de calentamiento. Por otro lado, se puede observar que para tiempos de calentamientos bajos (10s y 20s), las mezclas asfálticas experimentan incrementos de temperatura similares (ΔT_{tot} , ver Tabla 4), para un mismo tiempo de calentamiento. Por ejemplo, muestras con un 0% y 8% de contenido de fibras registraron un incremento de su temperatura en 7.91°C y 10.33°C respectivamente, al ser calentadas durante 10s. Sin embargo, para tiempos de calentamientos altos (30s y 40s), mezclas asfálticas con distintos contenidos de fibras registran una gran variación en cuanto al incremento de temperatura alcanzado, para el mismo tiempo de calentamiento. Por ejemplo, muestras con un 2% y 6% de contenido de fibras registraron incrementos en sus

temperaturas de 39.76°C y 78.86°C respectivamente, al ser calentadas durante 40s. Esto se puede deber a que 10s y 20s son tiempos demasiado cortos como para que las fibras puedan incrementar su temperatura y distribuirla a través de la mezcla asfáltica, por lo cual, las probetas independiente de su contenido de fibras, registrarán incrementos de temperaturas similares para el mismo tiempo de calentamiento.

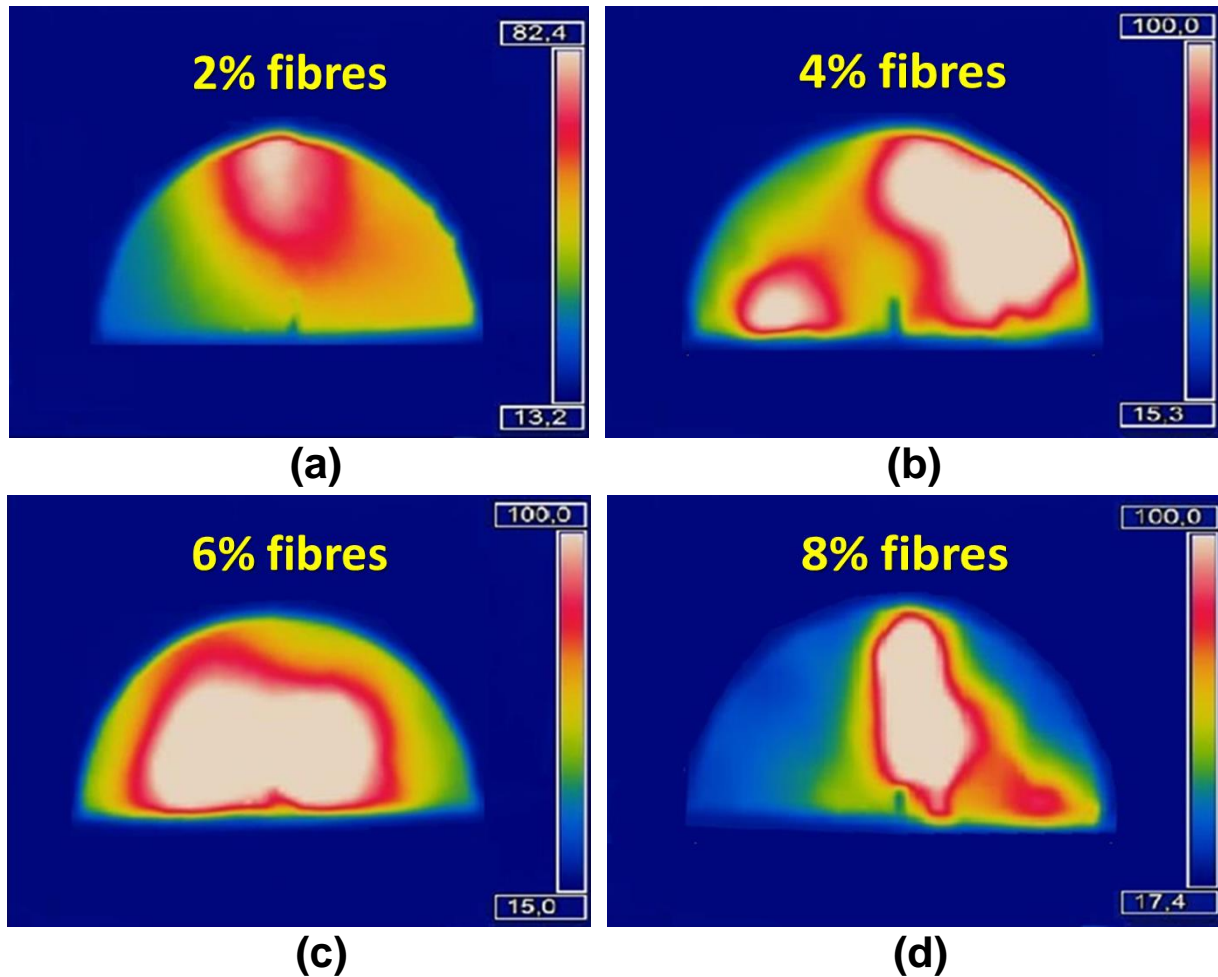


Figura 7. Imágenes termográficas de la mezcla asfáltica para un tiempo de calentamiento de 40s y distintos contenidos de fibras.

Por otra parte, de la Tabla 4 se puede concluir que en general las mezclas asfálticas con mayores contenidos de fibras alcanzaron las temperaturas superficiales más altas. No obstante, en el caso de probetas con un 8% de fibras, éstas no han sido las que han registrado los mayores valores de temperatura superficial. Esto se debe a una mala distribución de las fibras dentro de la mezcla asfáltica con ese contenido (8%), lo cual genera calentamientos localizados en ciertos sectores de las muestras donde exista presencia de cúmulos de fibras (clústeres), Ver Figura 7(d). Luego, el calentamiento localizado se distribuye desde los grupos de fibras hacia el resto de la probeta, como

se puede observar en la muestra con un 2% de contenido de fibras, ver Figura 7(a). De esta forma, las probetas con 6% (Ver Figura 7(c)), y 4% (Ver Figura 7(b)) de contenido de fibras han registrado los mayores valores de temperaturas superficiales (ver Tabla 4) para un tiempo de calentamiento de 40s, ya que presentan una mejor distribución de sus fibras en la matriz de la mezcla asfáltica. Adicionalmente, como se observó en la Tabla 2 (ver sección 3.1), el contenido de huecos en las probetas incrementó con el contenido de fibras. Con relación a lo mencionado, la distribución del calor en probetas con un alto contenido de vacíos no es óptima, ver Figura 7(d). Esto se debe a la disipación de calor que se genera en los huecos dentro de estas mezclas asfálticas.

En cuanto a lo que respecta al enfriamiento, se puede observar que en general los mayores tiempos de enfriamiento (CT, ver Tabla 4) se registraron para los tiempos de calentamiento de 20s y 30s. Por otro lado, los menores tiempos de enfriamiento en general se han registrado para tiempos de calentamiento de 10s y 40s. Adicionalmente, estos resultados tienen relación con las temperaturas alcanzadas por estas probetas. De este modo, las muestras sin fibras son las que menos se han calentado por lo que también han tardado menos en enfriarse, y en contraste, las muestras con un 8% de contenido de fibras, que han logrado altas temperaturas superficiales han sido las que han tardado más tiempo en enfriarse. Finalmente, de la Tabla 4 se puede deducir que, desde un punto de vista práctico, lo mejor es realizar calentamientos de 40s en probetas con 4% o 6% de contenido de fibras. Esto debido a que estas muestras registran los mayores incrementos de temperatura superficial, y por otra parte, tardan 54 minutos y 63 minutos respectivamente en enfriarse. Tiempos que se encuentran en el rango de los tiempos de enfriamiento para un calentamiento de 10s. Además, en cuanto a la aplicabilidad de estas mezclas asfálticas en pavimentos de carreteras, éstos se podrían calentar por microondas durante 40s, alcanzando incrementos de temperatura superficiales superiores a los 65°C (ΔT_{tot} , ver Tabla 4), teniendo que detener su tráfico durante una hora aproximadamente para que el pavimento vuelva a su temperatura de servicio.

3.3 Influencia de las fibras en las propiedades de auto-reparación de las mezclas asfálticas

La Figura 8 muestra los resultados del nivel de reparación alcanzado por las mezclas asfálticas con fibras (2%, 4%, 6% y 8% de fibras) en función del número de ciclos de sanado, usando calentamiento por microondas a 4 diferentes tiempos:(a) 10s, (b) 20s, (c) 30s y (d) 40s. En estas Figuras se puede observar que el calentamiento por microondas ayuda a la recuperación de un porcentaje de la resistencia mecánica de las mezclas agrietadas con fibras. Por otro lado, en las

gráficas se observa que los niveles de reparación incrementan con el incremento en el tiempo de calentamiento en las mezclas. De este modo, 40s es el tiempo de calentamiento que logra los mayores niveles de reparación en las muestras, seguido de 30s, 20s y 10s respectivamente, ver Figura 8. Esto se debe a que la temperatura alcanzada por las probetas incrementa con el tiempo de calentamiento (ver Tabla 4), lo cual permite obtener mayores niveles de reparación.

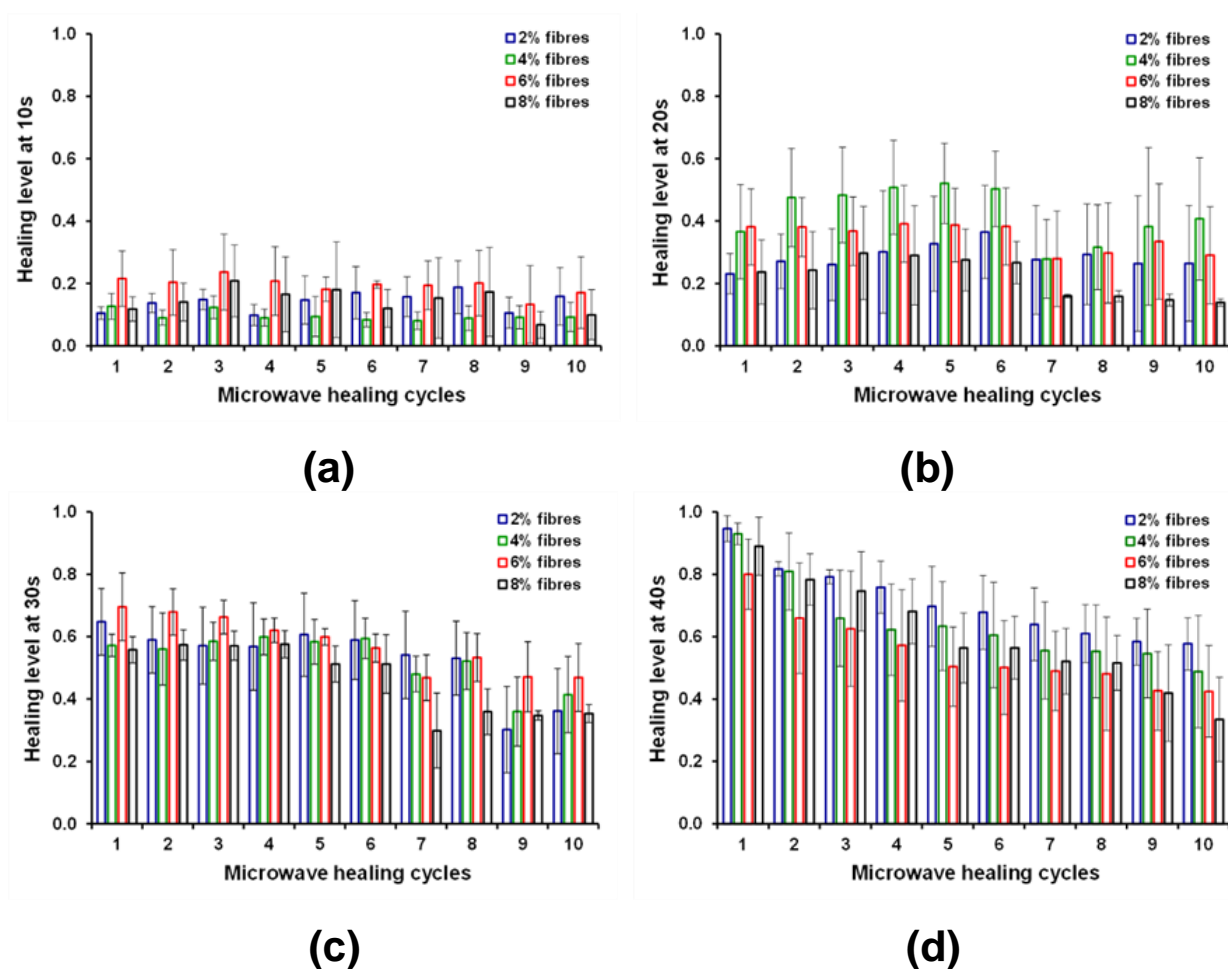


Figura 8. Nivel de reparación de las mezclas asfálticas en función del número de ciclos de sanado y contenido de fibras, calentadas a: (a) 10s, (b) 20s, (c) 30s, y (d) 40s.

Además, se puede ver que para tiempos de calentamientos bajos (10s y 20s), el número de ciclos de sanado no tienen una influencia significativa en los niveles de reparación. Por ejemplo, para un tiempo de 20s (ver Figura 8(b)), una probeta de 6% de contenido de fibras alcanza un nivel de reparación de 38% para el primer ciclo de sanado y 29% para el décimo. Por otro lado, para los tiempos de calentamiento más altos (30s y 40s), se puede observar que los niveles de reparación se ven reducidos con cada ciclo de sanado. Por ejemplo, para un tiempo de 40s (ver Figura 8(d)), una

muestra con un 4% de contenido de fibras alcanza un nivel de reparación de un 93% para el primer ciclo de reparación y un 49% para el décimo. La disminución del nivel de reparación se puede atribuir a las temperaturas alcanzadas por las mezclas asfálticas a tiempos altos de calentamiento (ver Tabla 4). Esto ha sido demostrado en investigaciones previas (Norambuena & Garcia, 2016), en donde se probó que el calentamiento por microondas puede cambiar la estructura interna de las mezclas asfálticas, cambiando de posición los áridos dentro de las probetas y alterando el contenido de vacíos dentro de las mezclas. De esta forma se ve reducida su resistencia mecánica y por lo tanto sus niveles de reparación con cada ciclo de sanado. Adicionalmente, el cemento asfáltico se daña más por cada ciclo de sanado para estos tiempos de calentamiento (30s y 40s). Asimismo, para tiempos altos de calentamiento se observa que los niveles de reparación también dependen del contenido de fibras en las mezclas asfálticas. Por ejemplo, para un tiempo de 30s (ver Figura 8(c)), se observa que en general mezclas con un 6% y un 2% de contenido de fibras han registrado los mayores niveles de reparación, seguido de las mezclas con un 4% y 8% de contenido de fibras respectivamente. De esta forma, un mayor nivel de reparación no necesariamente está atribuido a una mayor resistencia mecánica y un mayor contenido de fibras, como se puede observar en los resultados de fuerza máxima de flexión (fuerza soportada por las probetas antes de pasar por los ciclos de rotura-sanado) en la Figura 9. Este resultado se puede deber a la temperatura alcanzada por las probetas de 6% de contenido de fibras para un tiempo de 30s (ver Tabla 4).

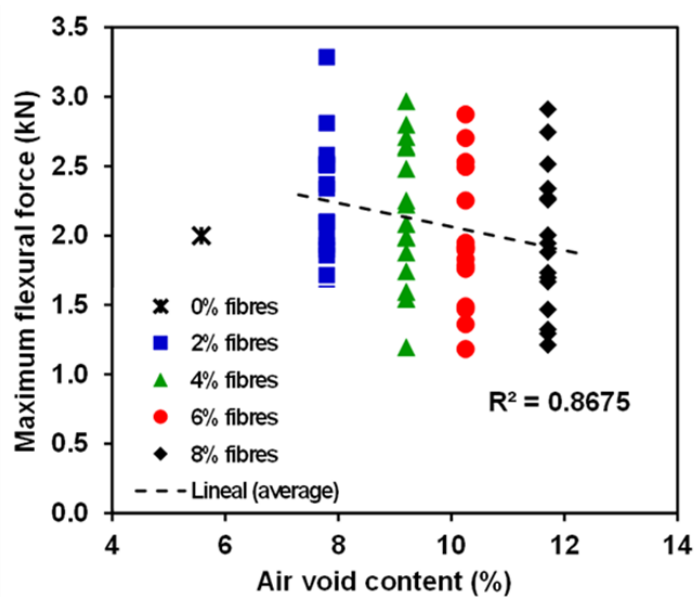


Figura 9. Fuerza inicial resistida a flexión en función del contenido de huecos.

De esta manera, las muestras que alcanzan altas temperaturas (6% de contenido de fibras) presentarán un alto nivel de reparación (60% en promedio). Además, las mezclas con un 2% y 4% de contenido de fibras han registrado valores muy similares de niveles de reparación (55% en promedio), lo cual puede tener relación con que su contenido de vacíos y su distribución de fibras dentro de la mezcla asfáltica sean semejantes. Finalmente, las mezclas con un 8% de contenido de fibras representan los niveles más bajos de reparación (40% en promedio) para 30s de calentamiento por microondas. Esto puede deberse principalmente a que un mayor contenido de fibras aumenta el contenido de huecos en las mezclas, y por lo tanto disminuye la resistencia a la flexión de las mezclas (ver Figura 9), e incrementa la formación de clústeres de fibras (ver Figura 7(d)) por lo que no resulta conveniente la utilización de mezclas asfálticas con un alto contenido de fibras. Por otra parte, analizando las barras de error de los resultados de los niveles de reparación (ver Figura 8), independientemente del ciclo de sanado en el que se encuentren, se puede observar que la variabilidad de los resultados para las probetas con diferentes contenidos de fibras ha sido similar para los diferentes tiempos de calentamiento. Esto sugiere que en cuanto a los niveles de reparación, la diferencia entre mezclas asfálticas con diferentes contenidos de fibras no sería significativa. Sin embargo, la influencia del contenido de fibras en los niveles de reparación de las mezclas asfálticas aún no ha sido comprobada. Debido a esto, con el objetivo de evaluar si es realmente necesario aumentar los contenidos de fibras para obtener mayores niveles de reparación en las mezclas asfálticas, se ha calculado la tasa de reducción entre ciclos (RRC), la cual se obtiene de acuerdo a la ecuación:

$$RRC = \left[\frac{HL_i}{HL_{max}} \right]_n \quad (6)$$

Donde HL_i es el nivel de reparación para un porcentaje $i\%$ de fibras (considerando datos individuales) y HL_{max} es el nivel de reparación máximo (valor promedio para el porcentaje de fibras que obtiene el máximo nivel de reparación) dentro del ciclo n . Este Ratio representa la variación de la reparación dentro de un mismo ciclo de sanado, para los diferentes contenidos de fibras.

Con la finalidad de demostrar que la diferencia entre los valores de la tasa de reducción entre ciclos (RRC) es debido a la dispersión (ver Figura 8), la probabilidad Weibull de todos los RRC ha sido calculada y presentada versus los percentiles de datos en la Figura 10. Esta función de probabilidad

ha sido utilizada considerando que el proceso de ciclos de reparación (rotura y calentamiento) se ajusta a un proceso de daño por fractura en materiales, idealizados por medio de una función de daño tipo Weibull. En la Figura 10, se representan los datos de RRC independientes del ciclo de sanado y del contenido de fibras, para los distintos tiempos de calentamiento. Los resultados muestran que los valores de RRC pueden alinearse en una línea recta con una pendiente 1:1, ajustándose a la distribución de probabilidad Weibull. Esto quiere decir que las diferencias entre los niveles de recuperación alcanzados por las mezclas dentro de un mismo ciclo han sido producto de variaciones estadísticas, lo que implica que los máximos niveles de reparación alcanzados para cada ciclo no son significativos, y además estos máximos no han sido producto de una diferencia en el contenido de fibras en la mezcla asfáltica, ni del ciclo en el que se encuentre. Por consiguiente, la variable responsable del aumento en los niveles de reparación ha sido el tiempo de calentamiento.

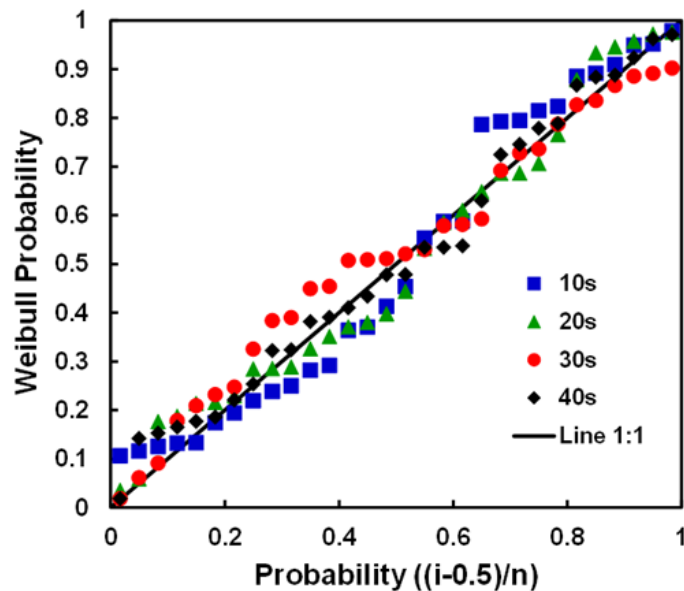


Figura 10. Gráfico probabilidad-probabilidad Weibull para los valores de tasa de reducción entre ciclos.

Por otra parte, la Figura 10 muestra los valores de las RRC para sus diferentes tiempos de calentamiento, lo cual permite observar cómo se ajusta cada tiempo a la distribución de probabilidad Weibull. De esta forma, se puede ver que los datos correspondientes a los tiempos de 30s y 40s han tenido un mejor ajuste a la distribución de probabilidad. Sin embargo, los datos correspondientes a los tiempos de 10s y 20s son más dispersos. De esta forma, podemos decir que cuanto mejor sea el ajuste de los datos, mayor es la influencia que tendrá el tiempo de calentamiento en los niveles de reparación de las mezclas asfálticas. Por un lado, el peor ajuste de los datos

correspondientes a los tiempos de calentamiento de 10s y 20s a la distribución de probabilidad de Weibull tiene relación con la gran dispersión y aleatoriedad que presentan los niveles de reparación de las mezclas calentadas a estos tiempos de calentamiento. Por otro lado, en el caso de las muestras asfálticas calentadas a tiempos de 30s y 40s, éstas tienen el tiempo suficiente para absorber la temperatura y distribuirla. Por otra parte, en la Figura 10 se demostró que la variable más influyente en cuanto a los niveles de reparación en las mezclas asfálticas es el tiempo de calentamiento. En base a esto, nace la necesidad de definir un tiempo óptimo de calentamiento por microondas en mezclas asfálticas. De esta forma, en la Figura 11 se presentan los niveles de reparación en mezclas asfálticas con un 4% de contenido de fibras, para 7 diferentes tiempos de calentamiento.

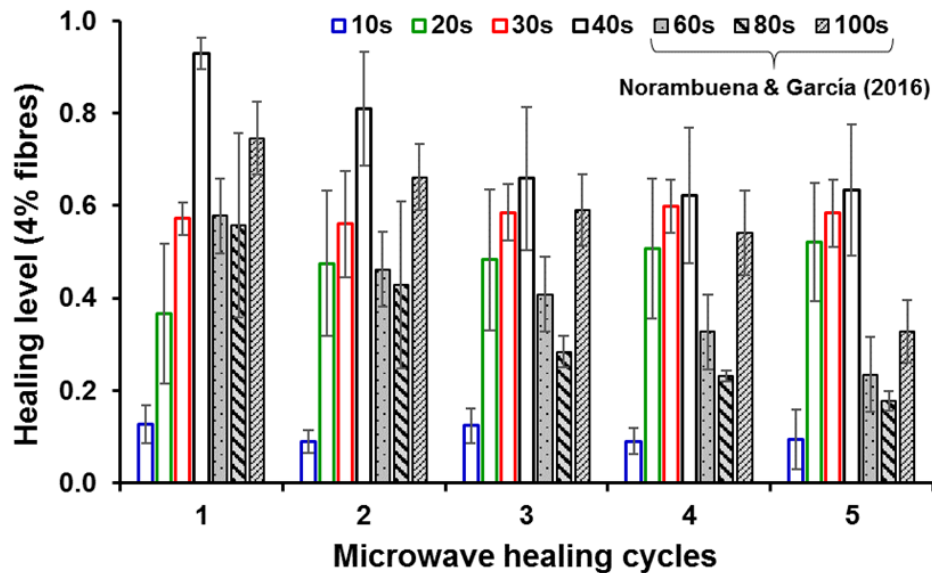


Figura 11. Nivel de reparación de las probetas con 4% de fibras, para los distintos tiempos de calentamiento.

Para esta gráfica se han considerado tiempos de calentamiento superiores a 40s extraídos de Norambuena & García (2016). En esta Figura se puede observar que existen 2 posibles tiempos de calentamiento óptimos, los cuales serían 40s y 100s, ya que ambos logran los máximos niveles de sanado. Sin embargo, el tiempo de calentamiento de 100s fue descartado debido a que calentar las probetas mediante microondas durante 100s produce un daño en el material, ya que funde el cemento asfáltico. Además, en la gráfica se puede observar el efecto de calentar las probetas durante 100s en la reducción de los niveles de reparación tras cada ciclo de sanado. En consecuencia, en cuanto al calentamiento microondas, para un microondas de 700W con una

frecuencia de trabajo de 2,45 GHz, el tiempo óptimo de sanado es el de 40s. Sin embargo, en base a los niveles de reparación alcanzados para los cinco ciclos de sanado (ver Figura 11), y tomando en cuenta los resultados obtenidos en la Figura 10, 30s también se presenta como un tiempo de calentamiento competitivo ante el tiempo óptimo de 40s. A modo de analizar esto cuantitativamente, se ha calculado el ratio del nivel de reparación con respecto a 40s para los diferentes tiempos de calentamiento y contenidos de fibras. Se obtienen los valores de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$HLR_{r/40s} = \left[\frac{HL_t}{HL_{40s}} \right]_{x\%} \quad (7)$$

Donde $HLR_{r/40s}$ es el ratio del nivel de reparación con respecto a 40s, HL_t es el nivel de recuperación para un tiempo t (10s, 20s o 30s) y HL_{40s} es el nivel de recuperación promedio obtenido con 40s de calentamiento, para cada porcentaje de fibras ($x\%$). Considerando que 40s es el tiempo óptimo de sanado, en la Figura 12 se representa la variación con respecto a dicho óptimo de los otros tiempos de sanado. Se observa que dependiendo del contenido de fibras, 30s también puede ser un tiempo óptimo de calentamiento. Resultando más óptimo en mezclas con un 6% de contenido de fibras, seguido de 4%, 8%, y 2%, respectivamente.

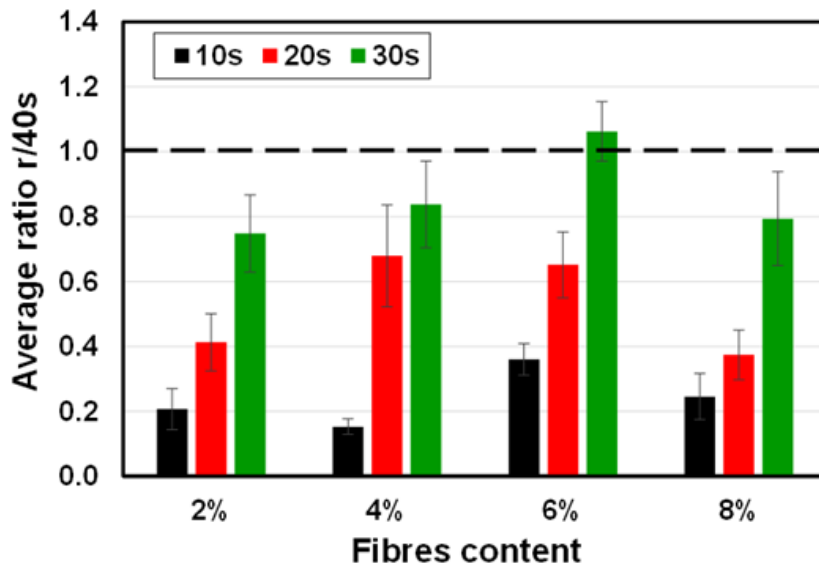


Figura 12. Valores promedio de los Ratio del nivel de sanado con respecto al nivel de sanado con 40s ($HLR_{r/40s}$), para los diferentes tiempos de calentamiento y contenidos de fibras.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha evaluado la influencia de las fibras metálicas en el comportamiento mecánico y de auto-reparación de una nueva mezcla asfáltica reforzada con fibras. Para ello, se emplearon cinco diseños diferentes de mezcla asfáltica, utilizando la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico, pero con diferentes contenidos de fibras. Se evaluaron las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas a través del ensayo de tracción indirecta en probetas pre-acondicionadas en tres diferentes estados: seco, saturado en agua y envejecido. Por otro lado, las propiedades de auto-reparación de las mezclas asfálticas se estudiaron mediante el ensayo de flexión en 3 puntos antes y después del sanado por calentamiento con radiación microondas a 4 diferentes tiempos: 10s, 20s, 30s, y 40s. De este modo, en base al análisis de los resultados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- En lo referente a las propiedades mecánicas de las muestras, se observó que la resistencia a la tracción indirecta (ITS) se redujo en las probetas acondicionadas bajo los estados de saturación en agua y envejecimiento. Además, también se observó que la presencia de fibras metálicas incrementa levemente los valores de ITS. Sin embargo, tras un análisis estadístico se concluyó que el contenido de fibras y los estados de acondicionamiento no presentaron una influencia significativa en la resistencia a la tracción indirecta de las mezclas asfálticas, y que la diferencia en los valores de ITS de muestras con y sin fibras metálicas, para los diferentes estados ambientales se debió a la dispersión en los resultados.
- Por otra parte, con respecto al calentamiento en las muestras, se pudo observar que en general cuanto mayor fue el tiempo de calentamiento y el contenido de fibras, la temperatura superficial alcanzada fue mayor. De este modo, se pudo concluir que las fibras metálicas ayudan a incrementar la temperatura de las mezclas asfálticas con fines de auto-reparación usando calentamiento por microondas.
- Además, para tiempos bajos de calentamiento (10s y 20s) las mezclas asfálticas experimentaron incrementos de temperatura similares independientemente de su contenido de fibras. En contraste, para tiempos altos de calentamiento (30s y 40s), existió una gran diferencia en el incremento de la temperatura para mezclas asfálticas dependiendo de su contenido de fibras.
- Por otro lado, se observó que las muestras con una mejor distribución de sus fibras registraron las mayores temperaturas superficiales máximas. Esto se debió a que una mala distribución

de las fibras en las probetas genera calentamientos localizados en sectores donde existen clústeres de fibras. Además, se encontró que mezclas con un alto contenido de huecos presentaron una peor distribución del calor desde las fibras al resto de la mezcla asfáltica, debido principalmente a la disipación del calor que se generó en los vacíos.

- En cuanto al enfriamiento de las mezclas, se encontró que los mayores tiempos de enfriamiento se registraron para tiempos de calentamiento de 20s y 30s. En contraste, los menores tiempos de enfriamiento fueron registrados para tiempos de calentamiento de 10s y 40s. Además, se observó que en general los tiempos de enfriamiento incrementaron con el contenido de fibras de las probetas.
- Por otra parte, se pudo observar que el calentamiento por microondas contribuye a la auto-reparación de las mezclas agrietadas con fibras. Además, se observó que los niveles de reparación en las mezclas asfálticas incrementaron con los tiempos de calentamiento por microondas. Esto se debió mayormente a la temperatura alcanzada por las probetas.
- Adicionalmente, se concluyó que para tiempos de calentamiento bajos (10s y 20s), el número de ciclos de sanado no tuvo influencia en los niveles de reparación alcanzados por las mezclas asfálticas. Sin embargo, para tiempos de calentamiento altos (30s y 40s), los niveles de reparación de las mezclas disminuyeron con cada ciclo. Esto pudo deberse al cambio en la estructura interna que sufren las probetas sometidas a tiempos altos de calentamiento, y al daño que sufre el cemento asfáltico cuando se ve expuesto a altas temperaturas.
- Además, se observó que para tiempos altos de calentamiento (30s y 40s), el contenido de fibras tuvo influencia en los niveles de reparación alcanzados por las mezclas. Sin embargo, se ha encontrado que un mayor nivel de reparación no necesariamente está atribuido a un mayor contenido de fibras, ni a una mayor resistencia mecánica de las muestras.
- Por otra parte, se comprobó estadísticamente que independientemente del ciclo de sanado, el contenido de fibras no tuvo una influencia significativa en los niveles de reparación alcanzados por las mezclas asfálticas, y que la diferencia en los niveles de reparación en muestras con diferentes contenidos de fibras se debió a la dispersión en los resultados. Por consiguiente, se concluyó que la variable de mayor consideración en la auto-reparación de mezclas asfálticas usando calentamiento por microondas es el tiempo de calentamiento.
- Finalmente, se comprobó que 40s es el tiempo óptimo de calentamiento usando microondas con fines de auto-reparación de mezclas asfálticas. Sin embargo, se observó que dependiendo del contenido de fibras, 30s también puede ser un tiempo óptimo de calentamiento.

5 REFERENCIAS

- Abtahi SM, Sheikhzadeh M, Hejazi SM (2010). Fibre-reinforced asphalt-concrete – A review. *Constr Build Mater*; 24(6):871-877.
- Airey G (2003). State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *Int. J. of Pavement Eng*; 4(3):165-176.
- Airey G, Choi Y (2002). State of the art report on moisture sensitivity test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Road Materials and Pavement Design*; 3(4):355-372.
- Collin RE (2000). *Foundations for Microwave Engineering*, Wiley-IEEE Press.
- Delgadillo R, Wahr C, García G, González A (2012). Asphalt Technology in Chile, Leading Research and Practice. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*; 81:775-795.
- EN 12697-23:2003. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- Fitzgerald R (2000). Novel applications of carbon fiber for hot mix asphalt reinforcement and carbon-carbon pre-forms. MSc Thesis. Michigan Technological University, USA.
- Gallego J, Del Val Miguel A, Contreras V, Paez A (2013). Heating asphalt concrete with microwaves to promote self-healing. *Constr Build Mater*; 42:1-4.
- García A (2011). Self-Healing of open cracks in asphalt mastic. *FUEL*, 93, pp.264-272.
- García A, Norambuena-Contreras J, Pacheco-Bueno M, Partl MN (2015). Single and multiple healing of porous and dense asphalt concrete. *JIMSS*; 26:425-433.
- García A, Pacheco-Bueno M, Norambuena-Contreras J, Partl MN (2013). Induction healing of dense asphalt concrete. *Constr Build Mater*; 49:1-7.
- Garcia A, Schlangen E, van de Ven M, Liu Q (2012). A simple model to define induction heating in asphalt mastic, *Constr. Build. Mater*; 31:38–46.
- Garcia A, Schlangen E, van de Ven M, van Vliet D (2011). Induction heating of mastic containing conductive fibers and fillers, *Mater. Struct*; 44:499–508.
- Hassan H, Al-Oraimi S, Taha R (2005). Evaluation of open-graded friction course mixtures containing cellulose fibres and styrene butadiene rubber polymer. *J Mater Civ Eng*; 17(4):415-422.

- Liu Q (2012). Induction healing of porous asphalt concrete. Ph.D. Thesis. TU Delft, the Netherlands.
- Maurer Dean A, Gerald M (1989). Field performance of fabrics and fibres to retard reflective cracking. *Transp. Res. Rec*; 1248:13-23.
- McDaniel RS (2015). NCHRP Synthesis 475: Fibre additives in asphalt mixtures. Report to American Association of State Highway and Transportation Officials, Transportation Research Board, Washington DC, USA.
- Norambuena Contreras J, Concha JL (2016). Self-healing of asphalt mixtures via microwave heating: 13th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP2016, Jackson Hole, Wyoming, USA.
- Norambuena-Contreras J, Garcia A (2016). Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. *Material and Design Journal*; 106:404-414.
- Norambuena-Contreras J, Valdés G, González A, Serpell R, Schlangen E (2016). Effect of fibres addition on the physical and mechanical properties of asphalt mixtures with crack-healing purposes by microwave radiation. *Constr Build Mater*; 127:369-382.
- Putman BJ, Amirkhanian SN (2004). Utilization of waste fibres in stone matrix asphalt mixtures, resources. *Conserv Recycle*; 42:265-274.
- Read J, Whiteoak D (2013). *The Shell Bitumen Handbook*, Thomas Telford.
- Sun Y, Liu Q, Wu S, Shang F (2014). Microwave heating of Steel slag asphalt mixture. *Key Eng Mat*; 599:193-197.
- Wu S, Mo L, Shui Z, Chen Z (2015). Investigation of the conductivity of asphalt concrete with conductive fillers. *Carbon*; 43(7):1358-1363.
- Wu S, Ye Q, Li N (2008). Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibres. *Constr Build Mater*; 22(10):2111-2115.
- Zubeck HK, Vinson TS (1996). Prediction of low-temperature cracking of asphalt concrete mixtures with thermal stress restrained specimen test results. *Trans Res Rec*; 1545:50-58.