

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

PROFESOR PATROCINANTE:

DR. JOSÉ NORAMBUENA CONTRERAS

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
TERMOFÍSICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
REFORZADAS CON RESIDUOS METÁLICOS**

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

MARIO ALONSO ALVARADO MERCADO

Concepción, Diciembre de 2016

DEDICATORIA

Dedicado a mi madre Nelly, a mis sobrinos Fran y Maxi y a mis abuelos Dagoberto y Agustina...

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi profesor guía Dr. José Norambuena por su apoyo y buena disposición durante este proceso. Además, quiero destacar su calidad como persona y docente, ya que desde el inicio me hizo sentir partícipe del proyecto, factor que me motivó en el desarrollo de este estudio. Rescato también, su exigencia y dedicación, ya que demuestra que como profesional ansía hacer de manera correcta lo que se propone, valores que admiro y pretendo mantener siempre.

De igual forma, agradezco al equipo del LabMAT, a José Luis Concha por la capacitación con los equipos del laboratorio, además de tener siempre la mejor actitud para aclarar dudas y ayudar en los ensayos. Agradezco también, a Irene González-Torre por facilitar los espacios del laboratorio en todo momento que fuera requerido, su forma eficaz y organizada de realizar las actividades hizo más fácil el desarrollo de este estudio.

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

Además, agradezco a mis amigos de colegio, UdeC y UBB. Con mención especial a mi amigo y futuro colega Mg. Andrés Burboa Lizama, por su ayuda en la elaboración del software utilizado en este estudio. La amistad incondicional que me han entregado durante todos estos años ha sido muy importante y apreciada.

Agradezco a María José por su apoyo, cariño, confianza y paciencia otorgada durante estos años. Me siento afortunado estar acompañado de alguien como tú, el saber que podemos contar el uno con el otro siempre me hace un hombre feliz y tranquilo.

Finalmente, agradecer a quienes han estado a mi lado siempre, mi familia. A mi madre, por la constante entrega y sacrificio que ha realizado durante mis 26 años de vida, simplemente sin ti no hubiera logrado nada de lo que estoy realizando hoy. Espero poder agradecerte como corresponde algún día. A mis hermanos, por su constante humor y cariño. A mi padre, porque has vuelto a ser un apoyo importante durante mis años universitarios y me has hecho creer en las segundas oportunidades. También quiero destacar a mis primos Andrés, Carlos, Rodolfo y Roberto por siempre creer en mis capacidades y motivarme a lograr mis metas. Y mis sobrinos, por entregar alegría y desorden a mi vida.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TERMOFÍSICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS REFORZADAS CON RESIDUOS METÁLICOS

Mario Alvarado Mercado
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
maalvara@alumnos.ubiobio.cl

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

RESUMEN

Las fibras en materiales compuestos son conocidas por mejorar sus propiedades mecánicas. Sin embargo, las fibras (cuando son metálicas) también pueden ser utilizadas para el desarrollo de nuevos pavimentos con fines energéticos y de auto-reparación de sus grietas usando técnicas de calentamiento. De este modo, las fibras procedentes de residuos metálicos pueden ser potencialmente utilizadas para el desarrollo de nuevas mezclas asfálticas con propiedades termofísicas avanzadas, aunque no está claro cómo funciona esta influencia en la mezcla. Por lo tanto, esta investigación tuvo como principal objetivo evaluar la influencia del contenido y tipo de residuo metálico sobre las propiedades volumétricas y termofísicas de las mezclas asfálticas. Con este objetivo, se han estudiado en laboratorio nueve diferentes diseños de mezcla asfáltica, empleando la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico, pero con dos diferentes tipos de residuos metálicos: virutas y fibras de acero. De este modo, se ha evaluado la distribución de los residuos metálicos en el interior de las mezclas a través de ensayos de ultrasonido. Además, la distribución de los residuos metálicos ha sido relacionada con los resultados de las propiedades termofísicas de las mezclas, como son: la resistividad eléctrica y la conductividad térmica. Finalmente, los principales resultados y conclusiones de esta investigación son presentados en este informe.

Palabras claves: Mezclas asfálticas; Fibras de lana de acero; Virutas de acero; Resistividad eléctrica; Propiedades térmicas.

Conteo de palabras: 10870 + 11 Figuras / 2 Tablas*250 + 1 Figura/ 2 Tabla* 500 = 12495 Palabras Totales.

EVALUATION OF THE THERMOPHYSICAL BEHAVIOUR OF ASPHALT MIXTURES REINFORCED WITH METALLIC WASTES

Mario Alvarado Mercado
Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío
maalvara@alumnos.ubiobio.cl

José Norambuena Contreras, Ph.D
LabMAT, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío
jnorambuena@ubiobio.cl

ABSTRACT

The addition of fibres in asphalt mixtures is a technique known for improving their mechanical properties. However, the addition of metallic fibres can also be used to develop new pavements with energetic purposes and with self-healing properties using heating techniques. Thus, fibres from metallic wastes can be used to develop new asphalt mixtures with advanced thermophysical properties, although it is still not clear how the fibres influence in the mixtures is. Hence, the main objective of this research was to evaluate the influence of the type and amount of the metallic waste added to the mixture on the volumetric and thermophysical properties of the asphalt mixtures. With this purpose, nine different asphalt mixtures have been studied in laboratory conditions, using the same aggregates gradation and bitumen content, but with two different metallic wastes: steel shavings and steel wool fibres. To do this, the spatial distribution of the metallic wastes inside the mixtures was evaluated through ultrasonic tests. Additionally, the metallic waste distribution was directly related with the thermophysical properties of the mixtures, such as: electrical resistivity and thermal conductivity. Finally, main results and conclusion of this work are presented in this document.

Keywords: Asphalt mixture; Steel wool fibres; Steel shavings; Electrical resistivity; Thermal properties.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	7
1.1	ANTECEDENTES	7
1.2	HIPÓTESIS	9
1.3	OBJETIVOS	9
1.3.1	<i>Objetivos generales</i>	9
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	9
1.4	DECLARACIÓN DE AUTOR	9
2	MATERIALES Y MÉTODOS	10
2.1	MATERIALES	10
2.2	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO	11
2.3	DENSIDAD APARENTE Y CONTENIDO DE HUECOS EN LAS MUESTRAS DE ENSAYO	12
2.4	CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LOS RESIDUOS METÁLICOS	13
2.5	MEDIDA DE LA DISTRIBUCIÓN DE RESIDUOS METÁLICOS USANDO ULTRASONIDO	14
2.6	MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	19
2.7	MEDIDA DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS	20
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
3.1	INFLUENCIA DE LOS RESIDUOS METÁLICOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS	21
3.2	DISTRIBUCIÓN DE LOS RESIDUOS METÁLICOS EN EL INTERIOR DE LAS MEZCLAS	23
3.3	INFLUENCIA DEL TIPO Y CONTENIDO DE RESIDUO METÁLICO EN LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	26
3.4	INFLUENCIA DEL TIPO Y CONTENIDO DE RESIDUO METÁLICO EN LAS PROPIEDADES TÉRMICAS	29

4	CONCLUSIONES	31
5	REFERENCIAS	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Composición de la mezcla asfáltica reforzada con residuos metálicos.....	13
Tabla 2.	Propiedades térmicas promedio de las muestras de ensayo.	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.	Imágenes ópticas (a-b) y SEM (c-d) de las fibras de lana de acero y virutas metálicas. ...	10
Fig. 2.	Histograma de la longitud de las (a) fibras de lana de acero y (b) virutas de acero.....	11
Fig. 3.	(a) Distribución de puntos a medir en la muestra (b) Ensayo y equipo de ultrasonido.	14
Fig. 4.	Transformación espacial de las coordenadas de la muestra: (a) representación del plano circular; (b) representación del plano cuadrado; (c) matriz de tiempos en plano cuadrado con interpolación bilineal, y (d) valores restringidos por el radio con interpolación bilineal.....	18
Fig. 5.	(a) Megómetro y electrodos de placa, y (b) medición de la resistencia eléctrica.	19
Fig. 6.	(a) Controlador manual y sensor térmico, y (b) medición de la conductividad térmica. ...	20
Fig. 7.	Variación de la (a) densidad aparente promedio y (b) contenido de huecos promedio con el contenido de residuos metálicos.	23
Fig. 8.	Tiempo de pulso ultrasónico promedio en función del contenido de residuos metálicos..	24
Fig. 9.	Representación cualitativa de la distribución de los residuos metálicos en el interior de las mezclas con: (a) 4% de fibras, (b) 4% de virutas, (c) 8% de fibras, y (d) 8% de virutas.....	25
Fig. 10.	Resistividad eléctrica de muestras en función del contenido de residuo metálico.....	27
Fig. 11.	Influencia del tipo y contenido de residuos metálicos en el interior de las mezclas asfálticas: (a) mezcla de referencia, (b) bajo contenido de fibras, (c) alto contenido de fibras, y (d) diferentes contenidos de virutas. Figura basada en el trabajo de Wang et al., 2016.....	28

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Una mezcla asfáltica es un material compuesto por áridos, filler y cemento asfáltico. Sin embargo, este material debido a cargas del tráfico y las condiciones medio ambientales puede sufrir daños mecánicos como grietas (Menozzi et al., 2015), pérdidas de resistencia, rigidez y durabilidad (Airey et al., 2008). Por lo tanto, con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, se pueden incorporar diferentes tipos de fibras (fibras de celulosa y minerales (Hassan et al., 2005), de polipropileno y poliéster (Wu et al., 2008), y diversos polímeros, lana de acero y otras fibras de residuos (Putman & Amirghanian, 2004)) en la matriz de la mezcla asfáltica (McDaniel, 2015). Entre estas fibras, las procedentes de residuos metálicos pueden mejorar la resistencia al envejecimiento, daños por humedad y al agrietamiento por reflexión de la mezcla asfáltica (Goel & Das, 2004). También proveen al material una mayor ductilidad y resistencia a la fatiga post-agrietamiento (Bentur & Mindess, 2007). No obstante, los residuos metálicos pueden tener un impacto negativo en la pérdida de partículas y en la resistencia a la flexión de la mezcla asfáltica, cuando no se encuentran uniformemente distribuidas (García et al., 2013a). Además, cabe mencionar que anualmente se producen 1.67 MMt de acero en el mundo, y por cada tonelada de acero procesado se producen 200kg de desechos metálicos (Branca & Colla, 2012). De este modo, las fibras procedentes de residuos metálicos pueden ser potencialmente utilizadas para el desarrollo de nuevas mezclas asfálticas con propiedades termofísicas avanzadas. En este contexto, los residuos metálicos eléctricamente conductores pueden ser adicionados a la matriz de mezcla asfáltica con el objetivo de modificar su conductividad eléctrica (Liu, 2012). Esto es posible a la teoría de percolación de materiales compuestos conductores. Esta teoría establece que un material compuesto conductor incrementa su conductividad eléctrica a medida que aumenta el contenido de fibras eléctricamente conductoras. Esto ocurre hasta un punto de percolación donde la resistividad eléctrica cae bruscamente (Weber & Kamal, 1997). Autores como García et al., 2009 y Wang et al., 2016 han comparado la efectividad de las fibras metálicas respecto a otros aditivos conductores. Ambos trabajos han concluido que las fibras metálicas son más efectivos que los polvos finos conductores con fines de incrementar la conductividad eléctrica. Esto se debe a que los residuos metálicos (tipo fibras) forman canales conductores dentro de la mezcla resultado de su flexibilidad y morfología. Sin embargo, Wang et al., 2016 han planteado que una combinación entre fibras y polvos metálicos conductores podrían controlar la repentina caída de la resistividad eléctrica. Por otra parte, García et al., 2013c experimental han usado fibras metálicas con el objetivo

de modificar la conductividad térmica de las mezclas asfálticas densas. La conductividad térmica puede verse incrementada debido a que los residuos metálicos (fibras o partículas) pueden absorber mayor energía térmica que otros materiales en el interior de la mezcla asfáltica. De esta manera, se aumenta la velocidad de calentamiento total en el material compuesto (Norambuena-Contreras et al., 2015). Sin embargo, García et al., 2014 han concluido que un exceso del contenido de aditivos metálicos puede provocar una mala distribución en el interior de la mezcla, aumentando la formación de clústeres. Esto aumenta la porosidad del material provocando (en la práctica) una disminución de la conductividad térmica. En resumen, las fibras metálicas procedentes de residuos pueden ser usadas para el desarrollo de nuevos pavimentos asfálticos con fines energéticos. Entre estas potenciales aplicaciones se encuentran los pavimentos colectores solares (Tang et al., 2014) y los pavimentos para el derretimiento de nieve en carreteras (Wu et al., 2005). Otros potenciales usos de las mezclas asfálticas con residuos metálicos son con fines de la auto-reparación de sus grietas, a través de procesos de calentamiento como la inducción electromagnética (Liu, 2012; García et al., 2013) o la radiación por microondas (Gallego et al., 2013; Norambuena-Contreras & García, 2016). La inducción electromagnética consiste en la adición de fibras metálicas conductoras de electricidad en la mezcla asfáltica. De este modo, con la ayuda de un dispositivo de calentamiento por inducción, es posible calentar las fibras metálicas a nivel local, las cuales calientan el cemento asfáltico que fluye a través de las posibles grietas abiertas, sellándolas (García et al., 2013b). García et al., 2013 han logrado recuperar hasta un 60% de la resistencia mecánica de mezclas asfálticas dañadas usando métodos de inducción electromagnética. Sin embargo, la temprana deformación de las mezclas como consecuencia del calentamiento del ensayo, impidió que las muestras recuperaran su resistencia total. Por otro lado, la radiación por microondas, es una técnica de calentamiento que hace uso de la propagación de ondas electromagnéticas para provocar un cambio de orientación en las moléculas polares, producto del campo magnético alterno existente. Como consecuencia, esto implica una fricción interna, aumentando la temperatura del material. De este modo, las fibras metálicas añadidas en la mezcla asfáltica, pueden reflejar la radiación de microondas y acelerar el aumento de temperatura. Sin embargo, el calentamiento por microondas puede modificar la porosidad de las mezclas. Norambuena-Contreras & García, 2016 han comprobado experimentalmente que el calentamiento por microondas (efecto del movimiento capilar del cemento asfáltico en la mezcla) modifica la estructura interna de la mezcla asfáltica (posición de áridos y partículas metálicas) aumentando su contenido de vacíos, mientras que en otras áreas de la mezcla puede verse disminuida. Como resultado, esto puede afectar la resistencia

mecánica del material. Por lo tanto, la adición de fibras metálicas procedentes de residuos puede tener influencia sobre las propiedades volumétricas y termofísicas de la nueva mezcla asfáltica, aunque aún no está claro de qué forma se produce esta influencia. Por todas estas razones, esta investigación tiene como principal objetivo evaluar la influencia de dos diferentes residuos metálicos (fibras y virutas de acero) en las propiedades volumétricas (distribución de los residuos), eléctricas y térmicas de las nuevas mezclas asfálticas. Con este objetivo, se han utilizado 4 diferentes porcentajes de fibras y virutas metálicas en las mezclas: 2%, 4%, 6% y 8%. En total se han evaluado experimentalmente 9 diferentes tipos de mezclas: 1 de referencia sin residuos metálicos, 4 con diferentes contenidos de fibras, y 4 con diferentes contenidos de virutas metálicas.

1.2 Hipótesis

- Los residuos metálicos como fibras y virutas pueden influir sobre las propiedades volumétricas y termofísicas de la nueva mezcla asfáltica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos generales

- Evaluar la influencia del tipo y contenido de residuo metálico en las propiedades volumétricas y termofísicas de las nuevas mezclas asfálticas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Medir las propiedades morfológicas de los diferentes residuos metálicos usando microscopia óptica y electrónica de barrido.
- Determinar la densidad y porosidad de las mezclas con y sin adición de residuos metálicos.
- Evaluar la distribución espacial de los residuos metálicos en el interior de las mezclas asfálticas usando ultrasonidos y análisis de imágenes.
- Medir la conductividad eléctrica y térmica de mezclas con y sin adición de residuos metálicos usando ensayos no-destructivos.
- 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, Concha JL. (2016). Self-healing of asphalt mixtures via microwave heating: 2016 ISAP Symposium, ISAP2016, Jackson Hole, Wyoming, USA. (in Press)*” y de la publicación en preparación, con título “*Effect of type and fiber content on the thermophysical properties of asphalt mixtures*”.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

En este estudio se ha utilizado una mezcla asfáltica semi-densa tipo IV-A-12. La granulometría se muestra en la Tabla 1. Los áridos se han clasificado en tres fracciones: árido grueso o gravilla (densidad 2.779g/cm^3), árido fino o arena (densidad 2.721g/cm^3), y filler (densidad 2.813g/cm^3). El cemento asfáltico usado fue un CA-24 con una penetración a 25°C de 56dmm y densidad de 1.039g/cm^3 . Además, se han adicionado dos tipos residuos metálicos a las mezclas asfálticas, un tipo de mezclas contiene fibras de lana de acero cortadas mecánicamente (Fig. 1(a) y (c)), mientras que al segundo tipo de mezclas se le han añadido virutas de acero (Fig. 1(b) y (d)), tamizadas en un rango de tamaño apto para garantizar su mezclado.

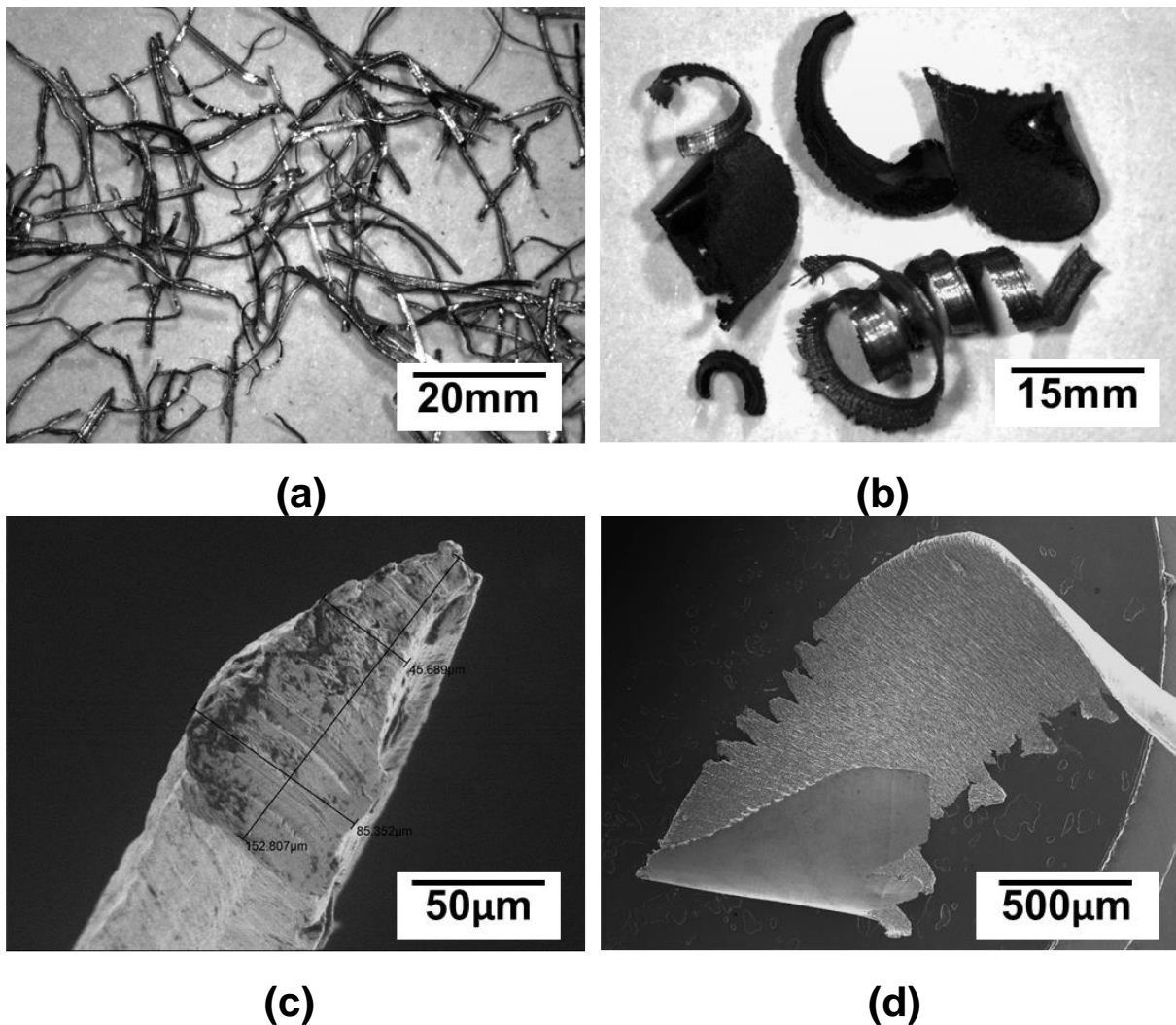


Fig. 1. Imágenes ópticas (a-b) y SEM (c-d) de las fibras de lana de acero y virutas metálicas.

El material utilizado para las fibras fue acero de bajo contenido en carbono, con una densidad de 7.180g/cm^3 . Estas fibras tienen un diámetro promedio de 0.157mm (Fig. 1(c)) con una relación de aspecto promedio de 30 y una longitud inicial en el rango de 2-8mm (ver Fig. 2(a)), lo que significa que tanto fibras cortas como largas fueron adicionadas a la matriz de la mezcla asfáltica. Por otra parte, el material usado en las virutas fue acero inoxidable austenítico, con una densidad de 7.980g/cm^3 . Estas virutas tienen un espesor promedio de 0.335mm (Fig. 1(d)) y una longitud inicial en el rango de 1-6mm (ver Fig. 2(b)). Finalmente, se utilizaron 4 porcentajes diferentes de fibras y virutas en las mezclas: 2%, 4%, 6% y 8%, por volumen total del cemento asfáltico, ver Tabla 1. En total se prepararon 9 tipos diferentes de mezclas asfálticas: 1 mezcla asfáltica sin residuos metálicos (mezcla de referencia), 4 mezclas asfálticas con diferentes contenidos de fibras y 4 mezclas asfálticas con diferentes contenidos de virutas, empleando la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico en mezcla, pero cambiando la masa de los residuos en la mezcla.

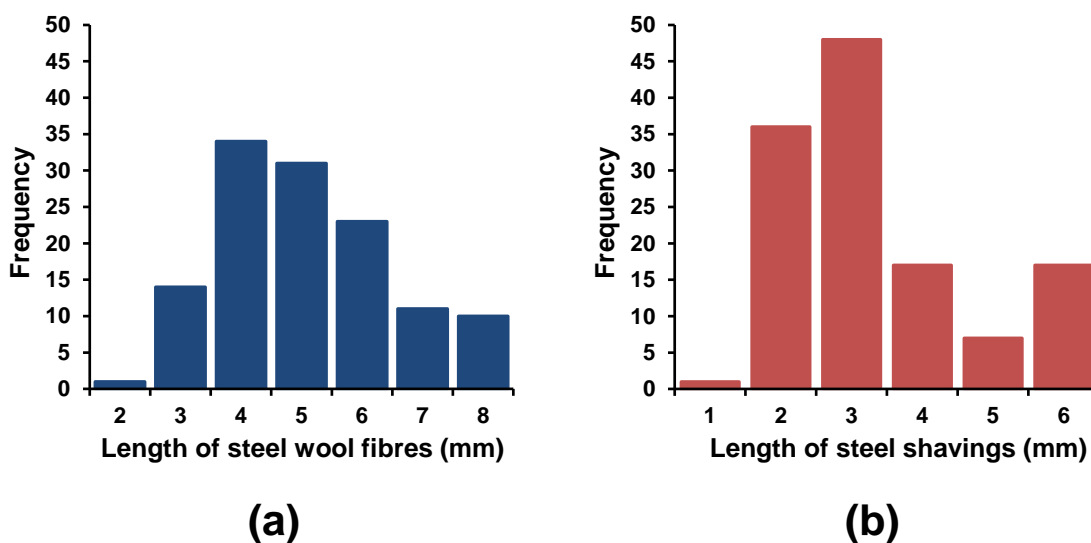


Fig. 2. Histograma de la longitud de las (a) fibras de lana de acero y (b) virutas de acero.

2.2 Preparación de las muestras de ensayo

Para la fabricación de las muestras de ensayo, los materiales fueron mezclados manualmente dentro de un recipiente metálico a una velocidad constante de 100 rpm. Así, previo al proceso de mezclado, los áridos fueron calentados a una temperatura de 150°C durante 24 horas, mientras que el cemento asfáltico y los residuos metálicos se calentaron a una temperatura de 150°C durante 2 horas. De este modo, los materiales fueron vertidos al recipiente en el siguiente orden: primero, el cemento asfáltico y los residuos metálicos (fibras o virutas); segundo, el árido grueso; tercero, el árido fino y finalmente, el filler. Los materiales fueron mezclados durante un tiempo aproximado

de 3.5 minutos, siempre conservando una temperatura de mezclado constante de 150°C en el interior del recipiente. Una vez mezclados los materiales y garantizando una buena distribución de los residuos metálicos, estos fueron dispuestos en el interior de un molde Marshall, previamente calentado, de aproximadamente 10cm de diámetro y 6cm de altura, con el objetivo de compactar las mezclas mediante un martillo Marshall aplicando 75 golpes por cada cara de la muestra. Después de la compactación y posterior enfriamiento de 24 horas a temperatura ambiente, las muestras Marshall fueron extraídas mecánicamente desde el interior del molde. Finalmente, para este estudio se fabricaron un total de 27 probetas Marshall: 24 con fibras y virutas y 3 de referencia sin adición de residuos. Adicionalmente, con el objetivo de minimizar errores en las mediciones efecto de las caras rugosas de las muestras Marshall, todas las probetas Marshall fueron serradas en sus caras, obteniendo muestras de ensayo con caras lisas y con una altura promedio de 4cm.

2.3 Densidad aparente y contenido de huecos en las muestras de ensayo

Se han evaluado las propiedades físicas de las mezclas asfálticas con y sin adición de residuos metálicos con el objetivo de analizar su influencia en las propiedades termofísicas de las muestras. De este modo, se ha determinado la densidad aparente y el contenido de huecos de todas las muestras de ensayo. Inicialmente, la densidad aparente se ha calculado como la relación entre la masa en seco y el volumen real de cada muestra. Para ello, se ha medido la masa en seco y el volumen real incluyendo huecos, dato obtenido a partir de la masa sumergida en agua. Por otra parte, el contenido de huecos de cada muestra ha sido determinado a partir del 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 de la muestra (CH), queda expresado de acuerdo a la ecuación (1).

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

Donde ρ_a es la densidad aparente de cada muestra, medida en g/cm^3 y ρ_{mt} 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 3 valores por cada diseño de mezcla.

2.4 Caracterización morfológica de los residuos metálicos

Para determinar la longitud de los residuos metálicos se han seleccionado 120 fibras y virutas de acero, de manera aleatoria del total de residuos disponibles para la fabricación de las mezclas asfálticas. La longitud de éstas ha sido determinada a través de imágenes realizadas usando un microscopio óptico Leica EZ4 con 35x de magnificación. Posteriormente, se ha determinado la longitud de cada una de los residuos metálicos mediante el programa de procesamiento de imagen ImageJ® (ver Fig. 1(a) y (b)). De esta forma, el programa consideró que 148 pixeles equivalen a una longitud de 1 mm. Así, la longitud de las fibras y virutas han sido representadas en histogramas de frecuencias con el objetivo de comparar la distribución de sus longitudes (ver Fig. 2). Por otra parte, el diámetro y espesor promedio de las fibras de lana y virutas de acero se ha calculado como el valor promedio de 10 residuos metálicos usando un micrómetro digital calibrado, realizando tres medidas de repetición por cada uno de los residuos. Finalmente, el aspecto superficial y la morfología de las fibras y virutas individuales han sido analizados mediante imágenes SEM obtenidas usando un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6610/LV.

Tabla 1. Composición de la mezcla asfáltica reforzada con residuos metálicos.

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	2-8	0.157	16
6% fibres			24
8% fibres			32
Steel shavings (% of vol./Bitumen)	Length range (mm)	Average thickness (mm)	
2% shavings			9
4% shavings	1-6	0.335	18
6% shavings			27
8% shavings			36

2.5 Medida de la distribución de residuos metálicos usando ultrasonido

Con el objetivo de evaluar la distribución de las fibras y virutas en el interior de las muestras de mezcla asfáltica, se midió el tiempo de pulso ultrasónico a través de las muestras de ensayo con y sin residuos metálicos. Todas las muestras de ensayo se evaluaron mediante pruebas ultrasónicas directas basadas en las recomendaciones de Norambuena-Contreras et al., 2010. El procedimiento de ensayo consistió en aplicar un pulso de compresión de alta frecuencia en las caras opuestas de la muestra utilizando un transmisor electroacústico. Para ello, se utilizó un equipo ultrasónico modelo 58-E4800 UPV (Controls Group) que consta de 2 transductores piezoeléctricos de 54 kHz (ver Fig. 3). Adicionalmente, se ha utilizado un gel acoplante para evitar vacíos de aire en la zona de contacto entre los transductores y las caras de las muestras.

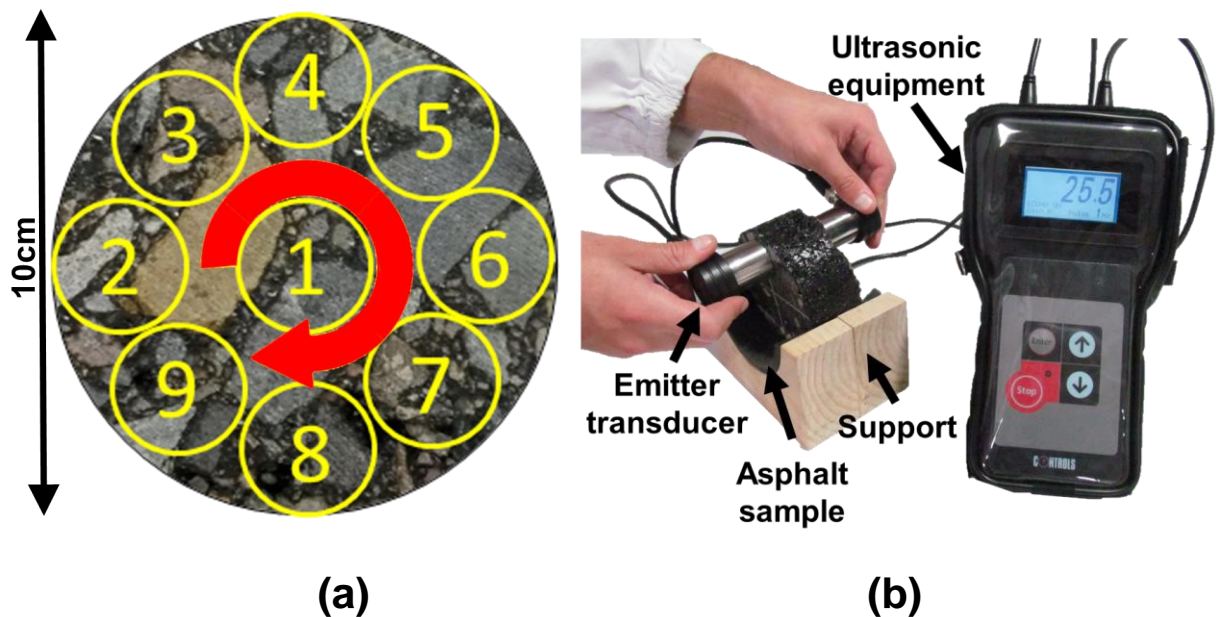


Fig. 3. (a) Distribución de puntos a medir en la muestra (b) Ensayo y equipo de ultrasonido.

Para el desarrollo del ensayo, cada muestra fue dispuesta en un soporte de alineación y auscultada en 9 puntos hasta evaluar la totalidad de la superficie de la muestra (ver Fig. 3(a)). De esta manera, el equipo determinó el tiempo de transmisión ultrasónico (t_{ij}) para cada punto de la muestra en μs . El valor representativo del tiempo de transmisión, para cada punto, ha sido calculado como el promedio de tres repeticiones en el mismo punto de auscultación. De este modo, un mayor tiempo

de pulso ultrasónico en una muestra de mezcla con residuos metálicos, puede implicar una alta porosidad dentro del material (zonas de menor densidad) o a una menor presencia de residuos metálicos. Mientras que menores tiempos de propagación pueden ser asociados a zonas de baja porosidad en el material (zonas de mayor densidad) o a una mayor presencia de residuos metálicos en la muestra. Así, con el propósito de analizar los tiempos de pulso ultrasónico promedio y relacionarlos con la distribución espacial de los residuos metálicos en el interior de las muestras, se ha realizado el siguiente procedimiento para la obtención de las imágenes de distribución.

Primero, la totalidad de los datos de tiempos de pulso ultrasónico medidos en los 9 puntos de evaluación (ver Fig. 3(a) y su idealización parametrizada en Fig. 4(a)) fueron registrados en un archivo .txt. Luego, estos datos fueron exportados al software MATLAB, 2011, usando el comando “xlsread (The MathWorks Inc, 2000)” y quedando expresados de forma matricial, como sigue:

$$[t_{ij}] = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{91} & t_{92} & t_{93} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde i es la posición de auscultación en el ensayo y j es el número de muestra utilizada.

Luego, se calculó el promedio de tiempo ultrasónico respectivo a cada posición (ij) y grupo de muestras con igual porcentaje de adición de residuos metálicos. Así, los datos promedios de tiempo de pulso ultrasónico se han presentado como un vector tipo columna, como se muestra a continuación:

$$[\bar{t}_i] = \begin{bmatrix} \bar{t}_1 \\ \vdots \\ \bar{t}_9 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ahora, con el objetivo de asociar los datos promedios de tiempos ultrasónicos ($[\bar{t}_i]$) con la distribución de los residuos para cada muestra, estos datos fueron graficados en un plano cartesiano cuadrado (ver Fig. 4(b)) con el fin de facilitar la interpolación de sus valores (ver Fig. 4(c)). Para ello, se utilizó el comando “meshgrid (The MathWorks Inc, 2000)”, estableciendo como coordenada de origen (0,0) el centro de la muestra y como coordenada extrema de cada eje su radio (R), ver Fig. 4(b).

Posteriormente, cada matriz de tiempos ultrasónicos ($[\bar{t}_i]$) ha sido reordenada en una matriz cuadrada de dimensiones 3×3 y ubicados en concordancia con su posición inicial de evaluación (ver Fig. 3(a) y Fig. 4(c)), quedando presentados de forma matricial como se muestra:

$$[\bar{t}_i] = \begin{bmatrix} \bar{t}_1 \\ \vdots \\ \bar{t}_9 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \bar{t}_3 & \bar{t}_4 & \bar{t}_5 \\ \bar{t}_2 & \bar{t}_1 & \bar{t}_6 \\ \bar{t}_9 & \bar{t}_8 & \bar{t}_7 \end{bmatrix} \quad (4)$$

De este modo, en el plano espacial resultante de dimensiones $2R \times 2R$ (ver Fig. 4(c)), se ha aplicado una interpolación bilineal en cada punto de evaluación usando el comando “interp2 (The MathWorks Inc, 2000)”. Así, para obtener un valor numérico para una función interpolación lineal (f_i) en un punto arbitrario $P(x_i, y_j)$ de la Fig. 4(c)), se han escogido valores arbitrarios de f_i en cuatro puntos conocidos $\bar{t}_1(x_1, y_1)$; $\bar{t}_2(x_2, y_1)$; $\bar{t}_3(x_2, y_2)$; $\bar{t}_4(x_1, y_2)$, agrupados en un vector $\overline{t_{Bi}}$:

$$\overline{t_{Bi}} = \begin{bmatrix} \bar{t}_1(x_1, y_1) \\ \bar{t}_2(x_2, y_1) \\ \bar{t}_3(x_2, y_2) \\ \bar{t}_4(x_1, y_2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Así, cada valor $P(x_i, y_j)$ tendrá asociado un factor de ponderación \overline{w}_i , agrupado en un vector de ponderación según:

$$\overline{w}_i = \begin{bmatrix} (x - x_2)(y_2 - y) \\ (x_1 - x)(y_2 - y) \\ (x_1 - x)(y - y_1) \\ (x - x_2)(y - y_1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Correspondiendo cada elemento del vector de ponderación (\overline{w}_i) al área coloreada de la Fig. 4(c), formada entre el punto $P(x_i, y_j)$ y el valor de f_i en su posición equidistante opuesto. Así, el valor

de la función $f(x, y) = t(x, y)$ se aproxima para cualquier valor (x, y) bajo la restricción de $x_2 \leq x \leq x_1$ e $y_1 \leq y \leq y_2$ estimado usando la ecuación:

$$t(x, y) \approx \frac{\sum_{i=1}^4 (\bar{t}_i * \bar{w}_i)}{\sum_{i=1}^4 \bar{w}_i} \quad (7)$$

Por lo tanto, con el objetivo de obtener una imagen 2D representativa de la muestra ensayada para su idealización parametrizada (ver Fig. 4(a), sobre las coordenadas de la muestra asfáltica se ha aplicado una transformación espacial, pasando de un plano cartesiano circular (ver Fig. 4(a)) a uno cuadrado (ver Fig. 4(b)). Para ello, previamente, las coordenadas de la muestra (u, v) mostradas en la Fig. 4(a), han sido normalizadas, para luego poder ser reemplazadas en las siguientes ecuaciones de transformación espacial:

$$x = \frac{R}{2} * \left(\left(\sqrt{2 + u^2 - v^2 + 2u\sqrt{2}} \right) - \left(\sqrt{2 + u^2 - v^2 - 2u\sqrt{2}} \right) \right) \quad (8.1)$$

$$, y = \frac{R}{2} * \left(\left(\sqrt{2 - u^2 + v^2 + 2u\sqrt{2}} \right) - \left(\sqrt{2 - u^2 + v^2 - 2u\sqrt{2}} \right) \right) \quad (8.2)$$

Donde x e y representan las coordenadas abscisas y ordenadas transformadas al plano cuadrado mostrado en la Fig. 4(b).

De este modo, las coordenadas transformadas de la Fig. 4(b) han sido ajustadas al plano cuadrado de la matriz interpolada mostrada en la Fig. 4(c). Debido a que las coordenadas transformadas (x, y) no representan con exactitud los valores en el plano cuadrado, en la Fig. 4(c) fue necesario aplicar factores de ponderación usando MATLAB, 2011 para obtener una representación gráfica más representativa, ver Fig. 4(d). Adicionalmente, se ha creado una matriz de 3x3 con valores “NaN (Not-a-Number) (The MathWorks Inc, 2000)”, representada como el área de color gris en la Fig. 4(d). Esta matriz se ha utilizado para facilitar la representación gráfica de una segunda interpolación, donde los valores “NaN” han sido expresado como:

$$[M_{NaN}] = \begin{bmatrix} NaN & \cdots & NaN \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ NaN & \cdots & NaN \end{bmatrix} \quad (9)$$

De esta manera, con este procedimiento, los promedios de tiempos ultrasónicos que se encuentren en el área gris de la Fig. 4(d) han sido considerados como valores “no-numéricos” no siendo representados de forma gráfica. Por el contrario, los tiempos de ultrasonidos que se encuentren en una distancia menor o igual a R se consideran válidos para ser graficados por MATLAB, 2011.

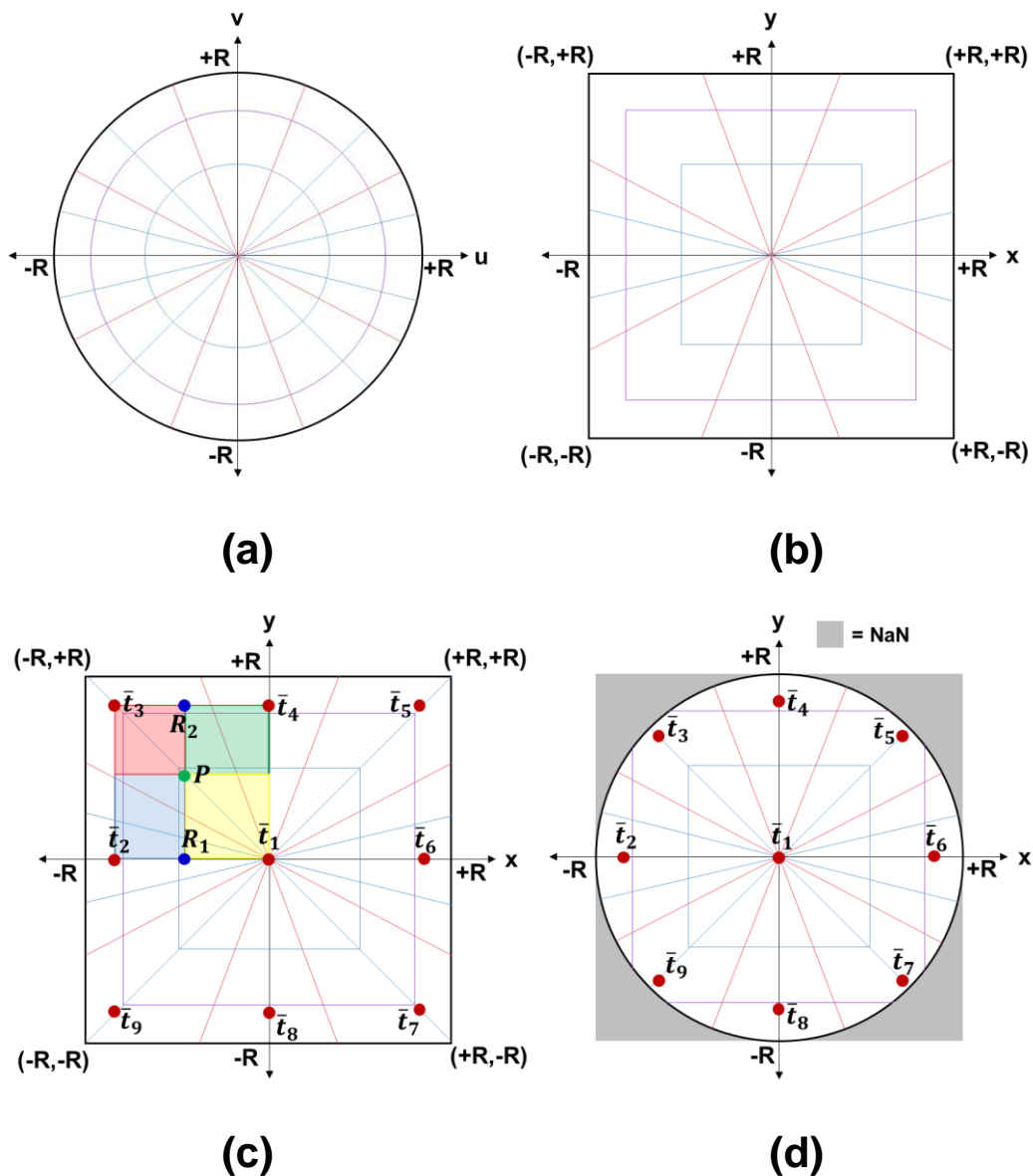


Fig. 4. Transformación espacial de las coordenadas de la muestra: (a) representación del plano circular; (b) representación del plano cuadrado; (c) matriz de tiempos en plano cuadrado con interpolación bilineal, y (d) valores restringidos por el radio con interpolación bilineal.

2.6 Medida de la resistividad eléctrica

Con el objetivo de evaluar la influencia del contenido y tipo de residuo metálico en la conductividad eléctrica de las muestras de mezcla asfáltica, se ha medido la resistencia eléctrica de todas las muestras con y sin adición de residuos metálicos (Fig. 5). Para ello, se utilizó un megóhmetro modelo HIOKI IR4056-20 de 5 rangos (50V-1000V) conectado a dos electrodos de placa de acero inoxidable de dimensiones 10x15cm. Así, se ha ubicado cada electrodo en las caras opuestas de las muestras, asegurando que las muestras estuvieran centradas y las placas alineadas. Para garantizar un mejor contacto entre la placa y la superficie de la muestra se ha aplicado una presión mínima ($P=1\text{kPa}$) a los electrodos. Esto permitió asegurar un registro de valores estables de resistencia eléctrica en cada medición. Por lo tanto, una vez medida la resistencia eléctrica de cada muestra, se obtuvo la resistividad eléctrica (ρ) dada la Segunda Ley de Ohm, según la ecuación (10):

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} \quad (10)$$

Siendo R la resistencia eléctrica de cada muestra en Ω , S es el área de las placas de electrodos, en m^2 y l el espesor de cada muestra en m. Finalmente, la resistividad eléctrica representativa de cada muestra de ensayo fue determinada como el promedio de 3 repeticiones. De este modo, valores más bajos de resistividad eléctrica (mayor conductividad eléctrica) en las muestras pueden implicar un mayor contenido de residuos metálicos y una mejor conectividad de ellos en su interior. Al contrario, valores más altos de resistividad eléctrica (menor conductividad eléctrica), serán resultados de una baja o nula conectividad de residuos metálicos en el interior de las muestras.

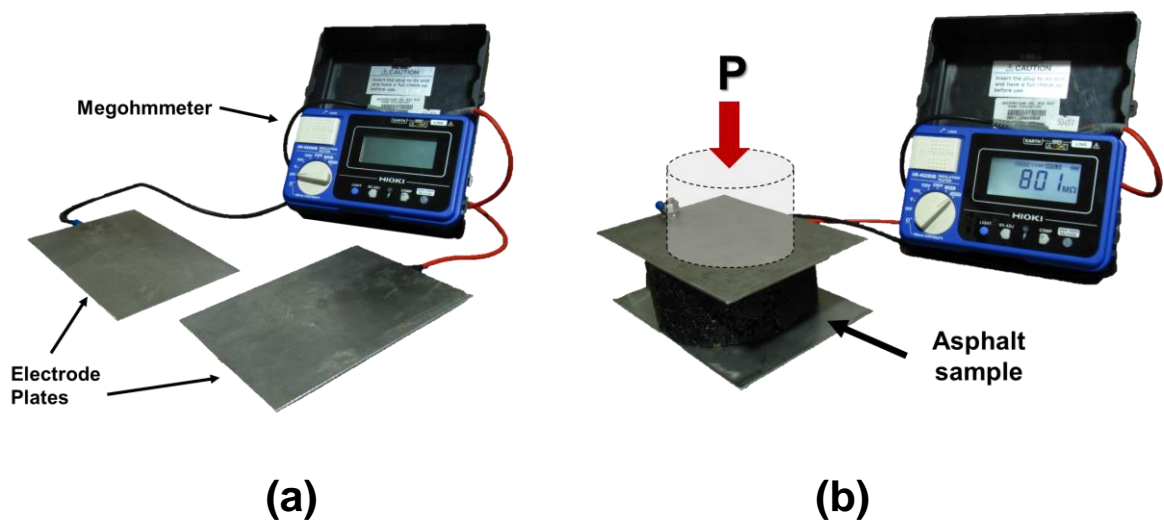


Fig. 5. (a) Megómetro y electrodos de placa, y (b) medición de la resistencia eléctrica.

2.7 Medida de las propiedades térmicas

Con el objetivo de evaluar la influencia del contenido y tipo de residuo metálico en la capacidad de transferencia de calor de las mezclas, se ha medido la conductividad térmica de todas las muestras con y sin adición de residuos metálicos usando método de la aguja térmica, basado en la teoría de fuente lineal de calor transitorio (ASTM D 5334, 2008). Para ello, se ha utilizado el analizador de propiedades térmicas KD2-Pro (Decagon Devices Inc.). Este equipo consta de un controlador manual y un sensor térmico (ver Fig. 6(a)). En este estudio, se ha utilizado un sensor térmico compuesto por una sonda de acero inoxidable de 3.9 mm de diámetro y 60 mm de longitud (sensor RK-1), con un rango de medición de 0.1 a 6.0 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Este sensor incorpora un calentador y una termocupla en su interior. Para realizar el ensayo de conductividad térmica, primero, se ha recubierto el sensor térmico con un gel térmico polisintético, reduciendo la presencia de huecos de aire y los efectos de resistencia al contacto con la superficie interna de la muestra de ensayo. Luego, el sensor fue embebido en la muestra de ensayo previamente perforada. Además, con el objetivo de proporcionar unas condiciones adiabáticas durante la medición, la muestra ensayada se dispuso sobre otras dos muestras con el mismo contenido de residuo metálico, asegurando así la altura mínima requerida por el sensor (ver Fig. 6(b)). La duración de cada ensayo fue de 10 min, donde se determinó el perfil de calentamiento y enfriamiento de cada muestra en condiciones de régimen transitorio.

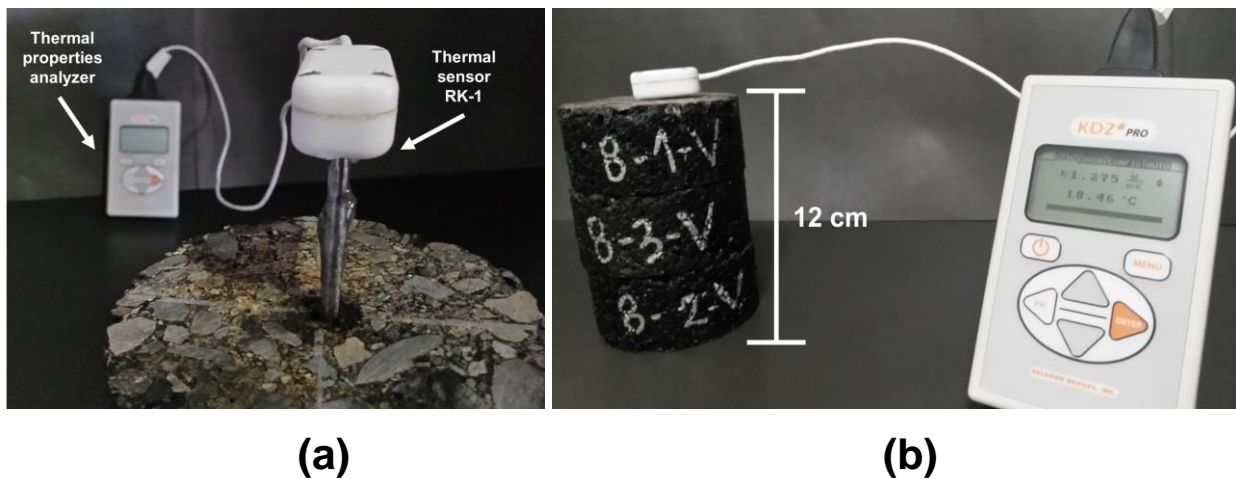


Fig. 6. (a) Controlador manual y sensor térmico, y (b) medición de la conductividad térmica.

Finalmente, la conductividad térmica (λ) representativa de cada muestra fue determinada como el promedio de 3 repeticiones. De este modo, valores más bajos de conductividad térmica en las muestras pueden implicar muestras más porosas (menor densidad) con un menor contenido de residuos metálicos. Al contrario, valores más altos de conductividad térmica pueden implicar

muestras con una menor porosidad (mayor densidad) y con un mayor contenido de residuos metálicos en su interior. Adicionalmente, con el objetivo de caracterizar otras propiedades térmicas de las muestras adicionales a la conductividad térmica, se ha calculado la capacidad calorífica específica y la difusividad térmica de todas las muestras de ensayo. Así, la capacidad calorífica específica de cada muestra (C_p) fue interpretada como la energía necesaria para aumentar la temperatura de la mezcla asfáltica en 1°C en $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Esta variable ha sido calculada según la ecuación (11).

$$C_p = \frac{1}{m_{\text{Total}}} [m_{\text{Ag}} * C_{\text{Ag}} + m_{\text{M}} * C_{\text{M}} + m_{\text{M.W}} * C_{\text{M.W}}] \quad (11)$$

Donde, m_{Total} es la masa total de cada muestra en kg, C_{Ag} y m_{Ag} son la capacidad calorífica específica en $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ y la masa de los áridos en kg, C_{M} y m_{M} son la capacidad calorífica específica en $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ y la masa en kg del cemento asfáltico, y $C_{\text{M.W}}$ y $m_{\text{M.W}}$ son la capacidad calorífica específica en $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ y la masa de los residuos metálicos en kg, segunda corresponda: C_{F} para fibras y C_{S} para virutas. Los valores de capacidad calorífica específica de cada componente de la mezcla fueron obtenidos de la literatura. Así, C_{Ag} (Hassn et al., 2016), C_{M} , C_{F} (Norambuena-Contreras & García, 2016) y C_{S} (CTE, 2010), se han establecido en $908 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $1900 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $482 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ y $450 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, respectivamente.

Por otra parte, la difusividad térmica de cada muestra de ensayo (β) fue interpretada como la velocidad en m^2/s a la que se transmite la energía calórica a través de la mezcla asfáltica, desde zonas de mayor temperatura a zonas con menor temperatura, hasta lograr un equilibrio térmico. Esta variable ha sido calculada según la ecuación (12).

$$\beta = \frac{\lambda}{\rho_a * C_p} \quad (12)$$

Donde λ es la conductividad térmica de la muestra en $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, ρ_a es la densidad aparente de cada muestra en g/cm^3 y C_p es la capacidad calorífica específica de cada muestra de ensayo en $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Influencia de los residuos metálicos en las propiedades físicas

En la Fig. 7 se muestran los resultados promedios de las densidades aparentes y contenido de huecos de las muestras con y sin adición de residuos metálicos. Las barras de error en la Fig. 7 corresponden a \pm una desviación estándar. De este modo, en la Fig. 7(a) se puede observar que la

densidad aparente promedio de todas las muestras con residuos fue menor que el valor de referencia para muestras sin residuos. También se observa que el valor de la densidad aparente para muestras con residuos se redujo ligeramente con el incremento del contenido de residuos metálicos. De este modo, el valor máximo de densidad aparente promedio fue de 2.373g/cm^3 para la mezcla de referencia. Mientras las mezclas con un contenido de residuos metálicos de 2%, 4%, 6% y 8% presentaron valores de densidad aparente promedio más bajos: 2.354g/cm^3 , 2.333g/cm^3 , 2.346g/cm^3 y 2.334g/cm^3 para virutas y 2.338g/cm^3 , 2.351g/cm^3 , 2.337g/cm^3 y 2.333g/cm^3 para fibras de lana de acero, respectivamente. Sin embargo, la diferencia de densidad aparente promedio entre fibras de lana de acero y virutas no fue significativa (ver barras de error en Fig. 7(a)). En general, la disminución de las densidades de las mezclas con residuos respecto a una de referencia, se debe a que el volumen y la masa de las mezclas varían al adicionar residuos metálicos. Sin embargo, la disminución de la densidad aparente en las mezclas asfálticas con residuos metálicos, se produce principalmente por la variación del volumen total de cada muestra más que a la variación de su masa, comparado con una muestra de referencia sin residuos metálicos. Por otra parte, en la Fig. 7(b) se observa que las mezclas asfálticas aumentan el contenido de huecos con el incremento del contenido residuos metálicos. De esta forma, el menor contenido de huecos se ha registrado en la mezcla de referencia (sin residuos metálicos), con un contenido de huecos promedio de 5.13%. Mientras, mezclas con mayores contenidos de residuos metálicos de 2%, 4%, 6% y 8% presentaron mayores valores promedio de contenido de huecos: 7.18%, 7.54%, 8.42% y 9.33% para fibras de lana de acero y 6.57%, 8.22%, 8.06% y 9.31% para virutas, respectivamente. Esto se debe a que la superficie específica total de las mezclas sin residuos es menor en comparación a las mezclas con residuos metálicos. En general, se ha observado que las mezclas con adición de virutas tienden a generar menores contenidos de huecos en comparación a las mezclas con adición de fibras de lana de acero (comparar barras de error en Fig. 7(b)). Una hipótesis para esto, podría ser que las virutas metálicas reducen su tamaño debido a la fractura (trituration mecánica) producida durante los procesos de mezclado y compactación, disminuyendo su capacidad de formar clústeres en el interior de la mezcla, y reduciendo así la probabilidad de la formación de huecos de aire en la muestra. No obstante, para un porcentaje de 8% de residuos metálicos, ambos tipos de mezclas (con fibras y virutas) registraron densidades aparentes y contenido de huecos promedio similares: 2.333g/cm^3 y 9.33% en la mezcla con fibras de lana de acero y 2.334g/cm^3 y 9.31% con virutas. Asimismo, estas muestras presentaron el mayor contenido de huecos de todas las mezclas evaluadas. Esto ocurre debido a que cuando un mayor volumen de

residuos metálicos es sumado a la mezcla, existe una mayor probabilidad de que las muestras contengan residuos metálicos (virutas o fibras) mal distribuidos (ver Fig. 9(c) y (d)). Este tema será discutido en mayor profundidad en la siguiente sección sobre la distribución de los residuos metálicos en el interior de las mezclas mediante el análisis de los resultados del tiempo ultrasónico.

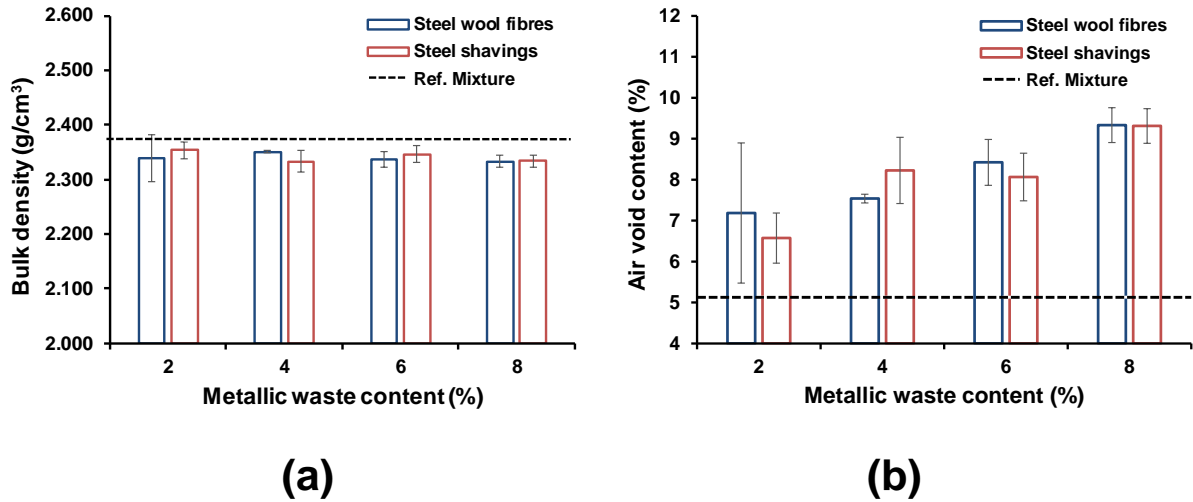


Fig. 7. Variación de la (a) densidad aparente promedio y (b) contenido de huecos promedio con el contenido de residuos metálicos.

3.2 Distribución de los residuos metálicos en el interior de las mezclas

En la Fig. 8 se muestran los resultados promedio del tiempo de pulso ultrasónico obtenidos para los diferentes contenidos y tipos de residuos metálicos evaluados en este estudio. Las barras de error en la Fig. 8 corresponden a \pm una desviación estándar. En esta Figura, se puede observar que a medida que incrementa el contenido de residuos metálicos incrementa el tiempo de propagación del pulso ultrasónico. También se observa que el tiempo ultrasónico promedio de todas las muestras con residuos fue mayor que el valor de referencia para muestras sin residuos, con un tiempo promedio de propagación de aproximadamente $11\mu\text{s}$. Además, se observa que las virutas metálicas presentaron mayores tiempos de propagación que las fibras de lana de acero. Esto podría deberse a la morfología de las virutas. Como se discutió anteriormente, una hipótesis para esto podría ser que las virutas metálicas reducen su tamaño debido a trituración mecánica producida durante los procesos de mezclado y compactación, disminuyendo su capacidad de formar canales conductores para el pulso de onda, aumentando su dispersión, lo que dificulta la propagación de la onda ultrasónica a través de ellas. De este modo, las muestras con virutas metálicas se comportarían (desde un punto de vista de propagación de ondas) como una mezcla asfáltica sin residuos metálicos, pero con mayores tiempos de propagación respecto de una muestra de referencia, debido

a sus partículas metálicas. Por el contrario, las fibras de lana de acero tienen la capacidad de formar canales conductores en el interior de las mezclas, debido a que presentan una mayor longitud y capacidad de distribución en las muestras (Norambuena-Contreras et al., 2016). Por lo tanto, la onda ultrasónica al encontrarse con canales de acero viaja a una mayor velocidad a través de estas mezclas, disminuyendo su tiempo de propagación, respecto a las muestras con virutas (Fig. 8). Para validar ésta hipótesis, en la Fig. 9 se presentan los tiempos promedio de propagación a través de las muestras con un 4% y 8% de adición. Estos resultados pueden ser interpretados como la representación cualitativa de la distribución de los residuos metálicos en el interior de las mezclas, con base en la Fig. 4(d).

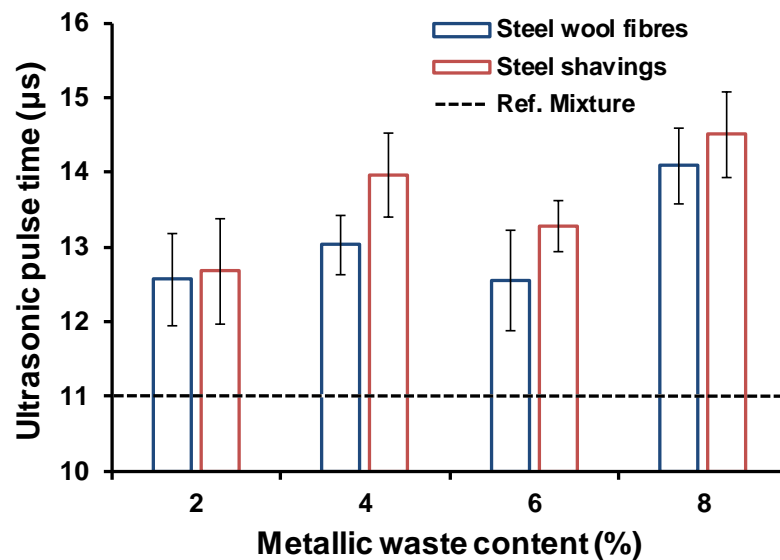


Fig. 8. Tiempo de pulso ultrasónico promedio en función del contenido de residuos metálicos.

De esta forma, la Fig. 9(a) representa una muestra con 4% de fibras de lana de acero. En esta Figura, se puede observar mayormente un área de color azul, que representa menores tiempos de propagación. También se puede asociar a zonas con una mayor densidad (bajo contenido de huecos) con una buena distribución de las fibras. Por otra parte, en esta Figura también se observa una pequeña zona roja, asociada a mayores tiempos de propagación en la muestra, lo que implica una zona de baja densidad (con un alto contenido de huecos). Por otra parte, la Fig. 9(b) representa una muestra con un 4% de virutas de acero. En esta Figura, es posible diferenciar 3 zonas:

i) una zona superior (zona roja y amarilla que abarca un 50% de la superficie de la muestra) que presenta los mayores tiempos de propagación. Esto se puede asociar a que el pulso de onda ultrasónico no encontró un camino directo a través de la muestra, debido a la alta dispersión en las

partículas de viruta (ver Fig. 11(d)), comportándose esta zona como una mezcla de baja densidad. Este comportamiento coincide con los resultados mostrados en la Fig. 8. ii) una zona intermedia (color verde) que presenta un equilibrio entre la distribución de las virutas y el contenido de huecos. Finalmente, la iii) zona inferior (zona azul) que presenta características similares a la muestra con 4% de fibras de lana de acero, mostrada en la Fig. 9(a) y discutida anteriormente.

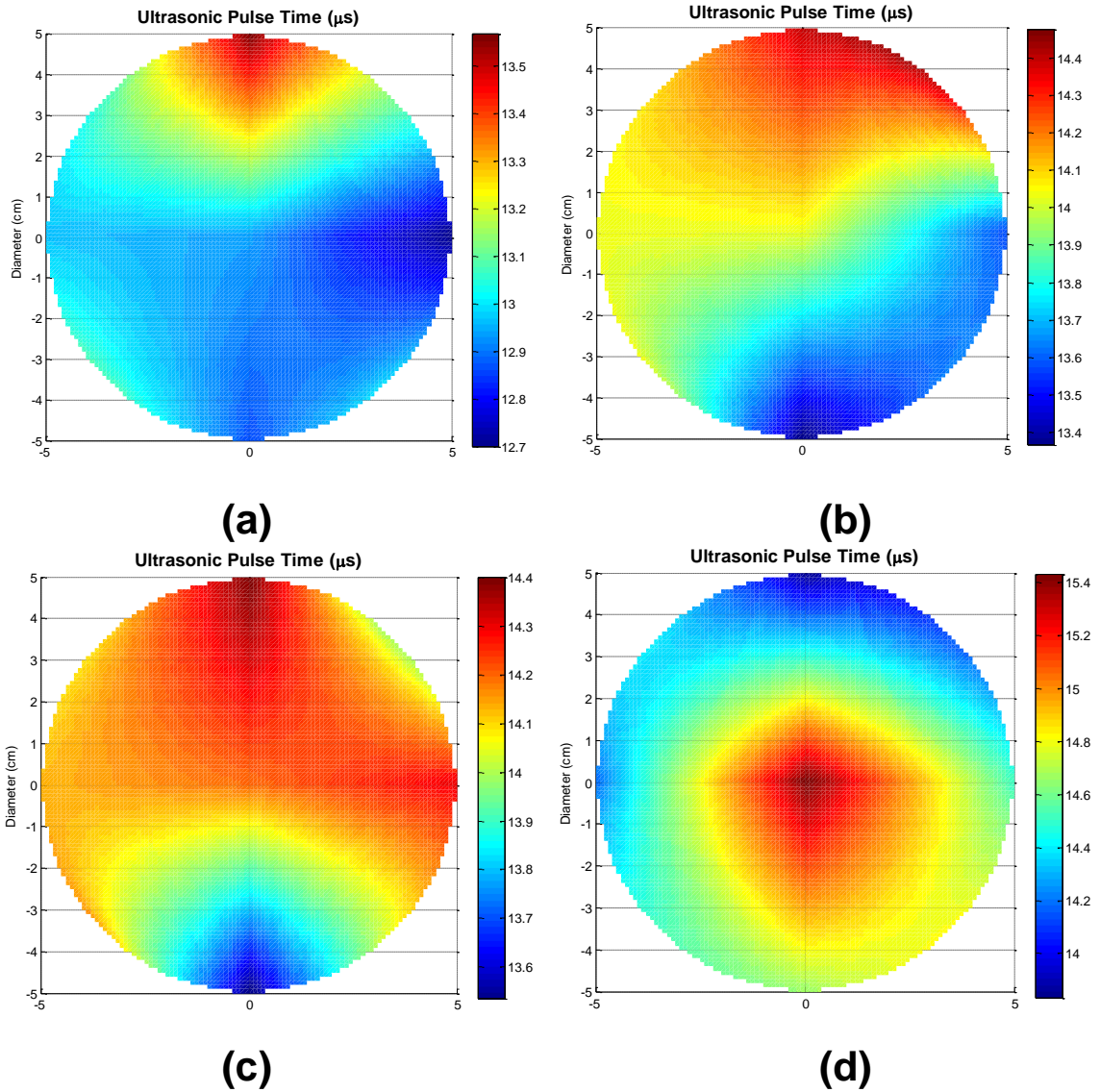


Fig. 9. Representación cualitativa de la distribución de los residuos metálicos en el interior de las mezclas con: (a) 4% de fibras, (b) 4% de virutas, (c) 8% de fibras, y (d) 8% de virutas.

De manera similar, la Fig. 9(c) representa una muestra con un 8% de fibras de lana acero. En esta Figura, es posible observar mayormente una zona de color rojo, asociada a mayores tiempos de propagación, pudiendo ser interpretada como una zona con mala distribución de fibras (formación

de clusters) y un mayor contenido de huecos. Resultados similares sobre muestras con un 4% y 8% de fibras de lana de acero, también han sido comprobados por Norambuena-Contreras et al., 2016, mediante ensayos de micro-tomografía computarizada de rayos x. Finalmente, la Fig. 9(d) representa una muestra con 8% de virutas. En esta Figura, es posible apreciar un área roja en el centro de la muestra, pudiendo ser interpretado como una zona puntual con acumulación de virutas. En resumen, los residuos metálicos (virutas y fibras) aumentan el tiempo de propagación del pulso ultrasónico en el interior de las mezclas. De este modo, se ha demostrado que esta variable depende principalmente de la distribución y del contenido de residuos en el interior de la mezcla, más que del contenido de huecos existente, mostrando una mejor distribución de tiempos en muestras con adición de fibras de lana de acero.

3.3 Influencia del tipo y contenido de residuo metálico en la resistividad eléctrica

En la Fig. 10 se muestran los resultados promedio de la resistividad eléctrica obtenidos para las muestras con diferentes contenidos y tipos de residuos metálicos. Las barras de error en la Fig. 10 corresponden a \pm una desviación estándar. En esta Figura, se pueden observar diferencias en la influencia de cada tipo de residuo metálico sobre la resistividad eléctrica, respecto de una mezcla de referencia sin fibras. De esta forma, la mezcla de referencia ha registrado una resistividad eléctrica promedio de $3.27 \times 10^8 \Omega m$, mientras las muestras con un 2%, 4%, 6% y 8% de fibras de lana de acero, su resistividad eléctrica promedio fue de $1.68 \times 10^8 \Omega m$, $1.56 \times 10^8 \Omega m$, $4.05 \times 10^7 \Omega m$ y $2.04 \times 10^7 \Omega m$, respectivamente. Con base en los resultados, las muestras con fibras de lana de acero han registrado un comportamiento eléctricamente conductor, mientras que las muestras con virutas metálicas no mostraron este comportamiento, registrando valores de resistividad eléctrica similares a una muestra de referencia. Además, se ha encontrado que, al incrementar el contenido de fibras de lana de acero en las mezclas, la resistividad eléctrica promedio de las muestras disminuye (ver Fig. 10), lo que provoca un aumento de la conductividad eléctrica del material. Con el objetivo de comprender los valores de resistividad eléctrica mostrados en la Fig. 10, la Fig. 11 muestra una idealización sobre la influencia del tipo y contenido de residuo metálico en el interior de las mezclas asfálticas. En esta Figura, se observa que las fibras de lana de acero pueden actuar como canales conductores de electricidad (ver Fig. 11(b) y (c)), por lo tanto, cuanto mayor sea el contenido de fibras añadidas a la mezcla, mayor será la probabilidad de formar conexiones eléctricas aumentando la conductividad eléctrica del material. Lo anterior, reafirma la teoría de percolación en materiales compuestos conductores (Weber & Kamal, 1997). Con base en esta teoría, es posible distinguir en la Fig. 10 tres fases asociadas al comportamiento de las fibras (ver

barras azules en Fig. 10) en el interior de las mezclas: i) una fase de aislación o no-conductiva, en esta etapa las fibras de lana de acero se encuentran dispersas y su comportamiento eléctrico es similar al de una mezcla de referencia (ver Fig. 11(a) y (b)). Esta fase i corresponde a muestras con un contenido de fibras menores o iguales a un 4%. ii) una fase de transición, en esta etapa la mezcla comienza a manifestar un comportamiento eléctricamente conductor, donde la resistividad eléctrica comienza a disminuir rápidamente (ver Fig. 11(c)). Esta fase ii corresponde a muestras con un contenido de fibras entre el 6% y un 8%. Finalmente, se encuentra la fase iii) fase conductora, esta fase las fibras de lana de acero ya han formado un canal eléctricamente conductor definido, donde un mayor aumento del contenido de fibras no registra una diferencia significativa sobre el valor de resistividad eléctrica medida. Este valor se conoce como punto de percolación. No obstante, debido a los contenidos de fibras utilizados, en este estudio no se ha registrado un valor de percolación.

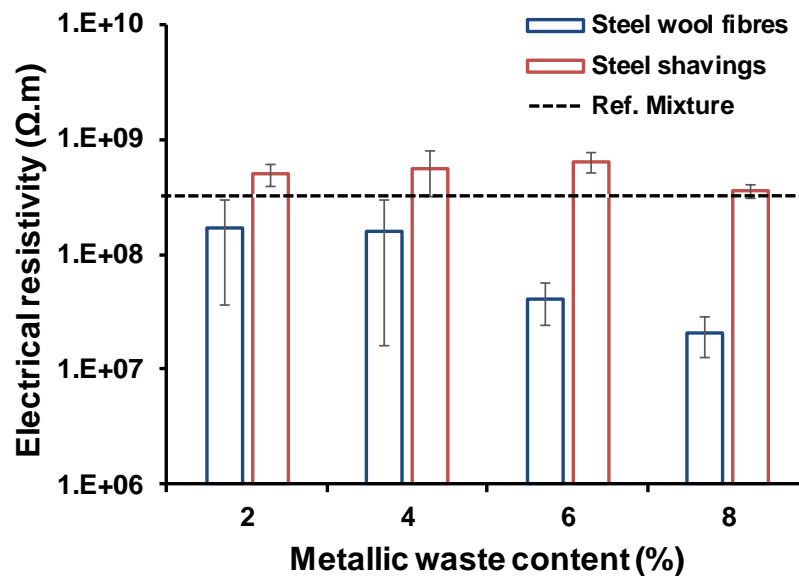


Fig. 10. Resistividad eléctrica de muestras en función del contenido de residuo metálico.

Por otra parte, observando la Fig. 10, se demuestra que el contenido de virutas de acero no tiene influencia en la disminución de la resistividad eléctrica en las muestras, registrando resultados promedio en el mismo orden de magnitud que la muestra de referencia sin fibras ($3.27 \times 10^8 \Omega m$). Así, los resultados promedio de resistividad eléctrica alcanzados por las muestras con virutas y ordenadas de mayor a menor fueron: $6.5 \times 10^8 \Omega m$, $5.5 \times 10^8 \Omega m$, $4.9 \times 10^8 \Omega m$ y $3.5 \times 10^8 \Omega m$ para muestras con un 6%, 4%, 2% y 8% de virutas, respectivamente. Este resultado se podría explicar con base en la hipótesis de que las virutas metálicas se trituran durante los procesos de mezclado y compactación de las muestras, por lo que actuarían como partículas y no como fibras metálicas

(ver Fig. 11(d)). Esto dificulta la formación de canales conductores en las muestras con virutas, haciéndolas incapaces de actuar como un elemento conductor de electricidad. Otra causa de este comportamiento, puede deberse a que las virutas se componen de acero inoxidable austenítico, donde los principales elementos de su aleación son Níquel y Cromo. Una vez aleado, estos materiales le otorgan al acero una resistividad eléctrica más alta en comparación al acero de bajo contenido en carbono, usado para las fibras de lana de acero (Al-Aql, 2003). Por lo tanto, las muestras de ensayo con virutas tienen una menor capacidad de traspasar la corriente eléctrica a través de ellas.

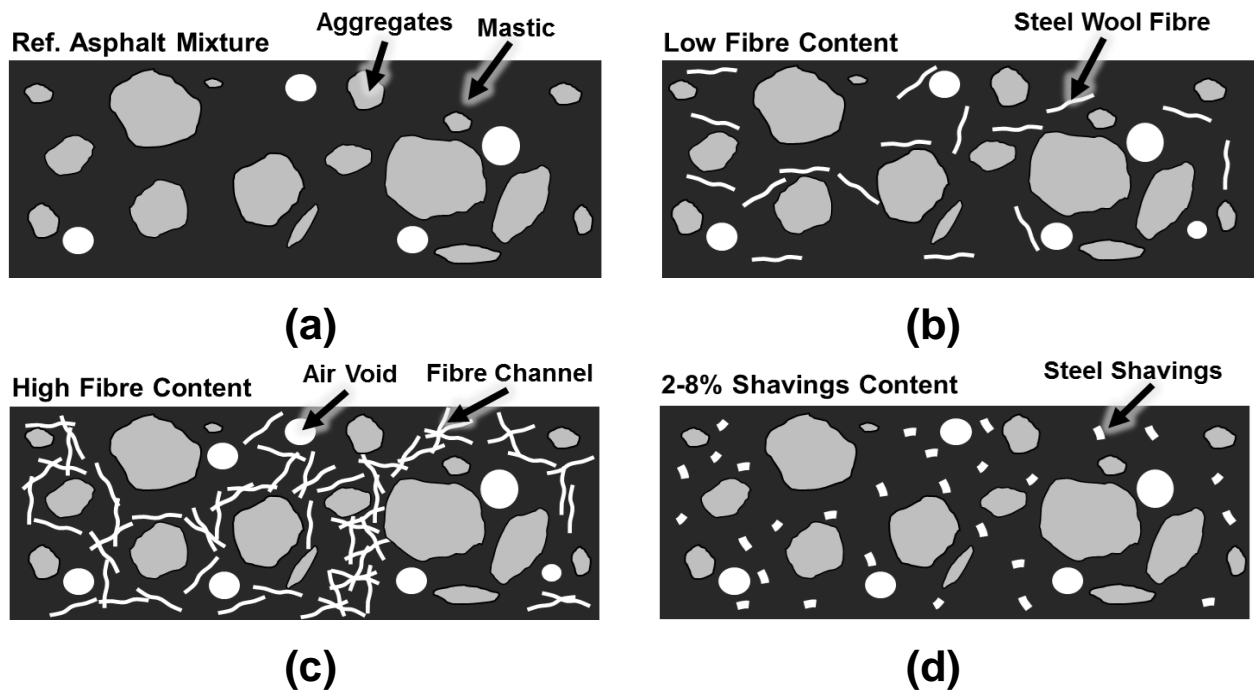


Fig. 11. Influencia del tipo y contenido de residuos metálicos en el interior de las mezclas asfálticas: (a) mezcla de referencia, (b) bajo contenido de fibras, (c) alto contenido de fibras, y (d) diferentes contenidos de virutas. Figura basada en el trabajo de Wang et al., 2016.

En resumen, se concluye que las fibras de lana de acero mejoran la conductividad eléctrica de la mezcla asfáltica, respecto de una mezcla de referencia sin residuos metálicos. Además, la menor resistividad eléctrica se ha registrado para las mezclas con un 8% de fibras ($2.04 \times 10^7 \Omega m$). Además, en este estudio, no se ha alcanzado un valor de resistividad eléctrica para lograr el umbral de percolación, aunque las mezclas con un 6% y 8% de fibras muestran un comportamiento eléctrico de transición. Por último, se concluye que las virutas de acero, independientemente del contenido, no aumentan la conductividad eléctrica de la mezcla asfáltica. Por lo tanto, como recomendación

futura, las mezclas con fibras de lana de acero podrían ser utilizadas para el desarrollo de nuevos pavimentos inteligentes con propiedades de auto-monitorizar esfuerzos y daños en el material. Debido a que los pavimentos conductores se comportan como un material piezoeléctrico frente a diferentes esfuerzos. Estos esfuerzos, provocan variaciones en la resistividad eléctrica, lo que permite al material auto-monitorizar eventuales defectos en él con la ayuda de sensores (Liu et al., 2015). Además, este tipo de mezcla asfáltica permite el desarrollo de nuevos pavimentos con propiedades de auto-reparación mediante la inducción electromagnética y el calentamiento por microondas (Norambuena-Contreras & García, 2016).

3.4 Influencia del tipo y contenido de residuo metálico en las propiedades térmicas

En la Tabla 2 se muestran los resultados promedio de todas las propiedades térmicas (conductividad térmica, capacidad calorífica específica y difusividad térmica) registradas para las muestras con diferente tipo y contenido de residuos metálicos. En esta Tabla, se observa que la presencia de residuos metálicos provocó una disminución en los valores promedio de conductividad térmica, en comparación a la muestra de referencia. Con base en el trabajo de Norambuena-Contreras & Concha, 2016, este resultado puede deberse al aumento del contenido de huecos generado por la adición y distribución de los residuos metálicos en el interior de las muestras (ver Fig. 7(b) y Fig. 9). Por lo tanto, este aumento del contenido de huecos reduce la transmisión de calor en el interior de las mezclas, como resultado de una mayor disipación de calor a través de los huecos de aire.

Tabla 2. Propiedades térmicas promedio de las muestras de ensayo.

Metallic waste content	Steel wool fibres			Steel shavings		
	Thermal conductivity (W/mK)	Specific heat capacity (J/kgK)	Thermal diffusivity ($\times 10^{-7}$) (m^2/s)	Thermal conductivity (W/mK)	Specific heat capacity (J/kgK)	Thermal diffusivity ($\times 10^{-7}$) (m^2/s)
2%	1.343	954.67	6.017	1.187	954.01	5.286
4%	1.385	951.45	6.192	1.246	950.16	5.621
6%	1.379	948.27	6.223	1.257	946.36	5.662
8%	1.369	945.13	6.209	1.252	942.62	5.691
Ref. 0%	1.406	957.93	6.185	1.406	957.93	6.185

De este modo, la muestra de referencia presentó la mayor conductividad térmica promedio con un valor de $1.406 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, respecto de las muestras con residuos metálicos. Sin embargo, las muestras con adición de fibras de lana de acero, presentaron mayores valores promedio de conductividad térmica en comparación a las muestras con virutas de acero, para todos los

contenidos evaluados (ver Tabla 2). Esto se debe a que las virutas metálicas al ser mayormente partículas (ver Fig. 1(d)), presentan una mayor dispersión en la matriz asfáltica, impidiendo que el sensor térmico pudiera distinguir entre componentes de la mezcla con un mayor o menor calor específico (ver Fig. 11(d)). Este comportamiento provoca que las muestras con adición de virutas sean más susceptibles a disminuir sus propiedades térmicas, sumado a la influencia del incremento del contenido de huecos (Fig. 7(b)). Por el contrario, el sensor térmico si logró diferenciar entre los componentes de las mezclas asfálticas con fibras de lana de acero, ya que estas fibras (efecto de su morfología, ver Fig. 1 y Fig. 2) se encuentran más aglutinadas en el interior de la mezcla, logrando mantener la temperatura interna de la muestra. Por lo tanto, este comportamiento facilita el traspaso del flujo de energía calórica en su interior a zonas de menor temperatura (Fig. 11(b) y (c)), lo que implica que, térmicamente, la influencia del contenido de fibras fue superior que la del contenido de huecos en este tipo de mezclas asfálticas. Además, otra razón que explicaría la diferencia entre conductividades térmicas para muestras con fibras y virutas, se debe a que la conductividad térmica de los aceros que las compone. Así, el acero austenítico de las virutas es menor que la del acero de bajo contenido en carbono de las fibras de lana (Chagas et al., 2013), resultando en que las muestras de mezcla asfáltica con virutas presenten una menor capacidad de conducción del calor, respecto de muestras con fibras de lana de acero. Por otra parte, en la Tabla 2 se observa que la capacidad calorífica específica de las muestras disminuye proporcionalmente a medida que incrementa el contenido de residuos metálicos. Esto se debe a que la masa total de las muestras de ensayo incrementa con el aumento del contenido de residuos metálicos (ver Tabla 1). De este modo, la muestra de referencia presentó la mayor capacidad calorífica específica con un valor de 957.93 J/kgK. Mientras, las muestras con fibras de lana de acero mostraron una capacidad calorífica específica en un orden de magnitud similar a la mezcla de referencia, siendo 954.67 J/kgK el valor máximo y 945.13 J/kgK el mínimo para un 2% y 8% de adición de fibras, respectivamente. Sin embargo, las muestras con virutas mostraron una capacidad calorífica específica ligeramente menor que la mezcla de referencia, siendo 954.01 J/kgK el valor máximo y 942.62 J/kgK el mínimo para un 2% y 8% de adición de virutas, respectivamente. Este resultado se debe a que las virutas poseen una densidad mayor en comparación a las fibras de lana de acero, lo que incrementa la masa total utilizada en la ecuación (11). Asimismo, en la Tabla 2 se observa que la difusividad térmica de las mezclas con fibras de lana de acero, en general, incrementa respecto de una mezcla de referencia sin fibras. Este incremento se registró para mezclas con un 4% de contenido de fibras. Donde la muestra con un 6% de adición presentó la mayor difusividad térmica con un valor de 6.223×10^{-7}

$7\text{m}^2/\text{s}$, mientras que las muestras con un 8% y 4% presentaron una difusividad térmica menor con valores de 6.209 y $6.192 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$, respectivamente. Este resultado se debe a que la disminución que sufre la densidad aparente y la capacidad calorífica específica en este tipo de mezclas, es mayor en comparación a lo que se reduce la conductividad térmica de las mismas. Por el contrario, la adición de virutas disminuye la difusividad térmica de las mezclas asfálticas para todos los contenidos evaluados, comparado con una muestra de referencia sin virutas. En resumen, se concluye que los residuos metálicos incorporados a las muestras reducen la conductividad térmica y la capacidad calorífica específica de la mezcla asfáltica. Sin embargo, las fibras de lana de acero incrementan la difusividad térmica de las muestras, para porcentajes de adición superiores al 4%. En cambio, las virutas de acero disminuyen la difusividad térmica de la mezcla asfáltica. Por lo tanto, como recomendación futura, las mezclas con fibras de lana de acero podrían ser utilizadas para el desarrollo de nuevos pavimentos asfálticos colectores que podrían absorber la radiación solar, almacenando está en el interior de la carretera (Bobes-Jesús et al., 2013). Estos pavimentos consisten en tuberías de cobre embebidas en el interior del pavimento, por las cuales fluye un líquido con capacidad de calentarse. Su funcionamiento consiste en que la radiación solar aumenta la temperatura del pavimento causando una transferencia de calor con el fluido en el interior de las tuberías, lo que provoca una posterior disminución de la temperatura del pavimento y un incremento de la temperatura del fluido. De este modo, en periodos de invierno, la energía calorífica almacenada en el interior de los pavimentos pudiera ser liberada a la carretera, con el objetivo de derretir la nieve en la superficie de la misma, reduciendo el peligro de accidentes por deslizamientos en carreteras.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha evaluado la influencia del tipo y contenido de dos diferentes residuos metálicos (fibras y virutas) sobre las propiedades volumétricas y termofísicas de las nuevas mezclas asfálticas. Para ello, se han estudiado 9 diseños de mezcla asfáltica empleando la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico en mezcla, pero cambiando la masa de los residuos metálicos adicionados a la mezcla. En total, se utilizaron 4 porcentajes diferentes de fibras y virutas en las mezclas: 2%, 4%, 6% y 8%, por volumen total del cemento asfáltico. De este modo, en base al análisis de los resultados, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- En este estudio, se encontró que las mezclas asfálticas con residuos metálicos redujeron su densidad aparente, respecto de una mezcla sin residuos. Además, la densidad aparente para muestras con residuos se redujo ligeramente con el incremento del contenido de residuos metálicos.
- Por otra parte, el contenido de huecos en las muestras con residuos incrementó a medida que aumento el contenido de residuos metálicos en las mezclas. En general, las mezclas con adición de virutas presentaron menores contenidos de huecos en comparación a las mezclas con adición de fibras de lana de acero.
- Los ensayos de ultrasonidos han comprobado que la distribución de los residuos metálicos en el interior de las muestras no fue uniforme, y que el tiempo de propagación del pulso ultrasónico incremento con el contenido de residuos en la mezcla. Se ha comprobado que esta variable depende principalmente de la distribución y del contenido de residuos en el interior de la mezcla, más que del contenido de huecos existente, mostrando una mejor distribución de tiempos en muestras con adición de fibras de lana de acero.
- Se comprobó que la resistividad eléctrica de las muestras disminuyó con el incremento de fibras de lana de acero. Esto se debió a que las fibras metálicas presentaron una mejor conectividad en el interior de las mezclas. De forma contraria, se comprobó que la resistividad eléctrica de las muestras no disminuyó con el incremento del contenido de virutas, registrando valores constantes y mayores en comparación a una muestra de referencia sin residuos. Esto se debió principalmente al tipo de acero utilizado en las virutas y la mala conectividad de las virutas en el interior de las muestras.
- Respecto a las propiedades térmicas de las mezclas asfálticas con residuos metálicos, se ha comprobado que los residuos metálicos incorporados a las muestras reducen la conductividad térmica y la capacidad calorífica específica de las mezclas. Sin embargo, las fibras de lana de acero incrementan la difusividad térmica de las muestras, para porcentajes de adición superiores al 4%. Por el contrario, las virutas de acero disminuyen la difusividad térmica de la mezcla asfáltica independiente del contenido de virutas sumado a la mezcla.

Finalmente, esta investigación correspondió a un estudio exploratorio con el objetivo de evaluar nuevas aplicaciones de pavimentos asfálticos con residuos metálicos. Así, su desarrollo ha permitido concluir tres potenciales aplicaciones: 1) las mezclas asfálticas con residuos metálicos podrían ser utilizadas para el desarrollo de nuevos pavimentos inteligentes con propiedades de

auto-monitorización de esfuerzos y daños; 2) las mezclas con residuos metálicos podrían ser utilizadas para el desarrollo de nuevos pavimentos asfálticos colectores capaces de absorber la radiación solar, almacenando está en el interior de la carretera; y 3) las mezclas asfálticas con residuos metálicos podrían ser utilizadas para el desarrollo de nuevos pavimentos con propiedades de auto-reparación de sus grietas usando técnicas de calentamiento electromagnético.

5 REFERENCIAS

Airey G.D, Collop A.C, Zoorob S.E, Elliot R.C. (2008). The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. *Construction and Building Materials*; 22:2015-2024.

Al-Aql A.A. (2003). Electrical resistivity measurements in Ni-Cr alloys. *Materials & Design*; 24:547-550.

ASTM D 5334. (2008). Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure. American Society for Testing and Materials.

Bentur A, Mindess S. (2007). *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Taylor & Francis Group, Abingdon, UK.

Bobes-Jesús V, Pascual-Muñoz P, Castro-Fresno D, Rodríguez- Hernández J. (2013). Asphalt solar collectors: A literatura review. *Applies Energy*; 102:962-970.

Branca T.A, Colla V. (2012). Possible uses of steelmaking slag in agriculture: an Overview. *InTechOpen*.

Chagas G.M.P, Barbosa P.A, Barbosa C.A, Machado I.F. (2013). Thermal Analysis of the Chip Formation in Austenitic Stainless Steel. *Procedia CIRP*; 8:293-298.

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

García Á, Bueno M, Norambuena-Contreras J, Partl M.N. (2013). Induction healing of dense asphalt concrete. *Construction and Building Materials*; 49:1-7.

García Á, Norambuena-Contreras J, Bueno M, Partl M.N. (2014). Influence of Steel Wool Fibers on the Mechanical, Thermal, and Healing Properties of Dense Asphalt Concrete. *Journal of Testing and Evaluation*; 42:1107-1118.

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

- García Á, Norambuena-Contreras J, Partl M.N. (2013b). Electrical, Thermal and Induction Heating Properties of Dense Asphalt Concrete. *Advanced Materials Research*; 723:303-311.
- García Á, Norambuena-Contreras J, Partl M.N. (2013c). Experimental evaluation of dense asphalt concrete properties for induction heating purposes. *Construction and Building Materials*; 46:48-54.
- García Á, Schlangen E, van de Ven M, Liu Q. (2009). Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers. *Construction and Building Materials*; 23:3175-3181.
- Goel A, Das A. (2004). Emerging road materials and innovative applications. In: National conference on materials and their application in civil engineering. Hamipur, India.
- Hassan H, Al-Oraimi S, Taha R. (2005). Evaluation of open-graded friction course mixtures containing cellulose fibres and styrene butadiene rubber polymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*; 17:415-422.
- Hassan A, Aboufoul M, Wu Y, Dawson A, García A. (2016). Effect of air voids content on thermal properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*; 115:327-335.
- Liu Q. (2012). Induction healing of porous asphalt concrete. Ph.D. Thesis. TU Delft, The Netherlands.
- Liu X, Nie Z, Wu S, Wang C. (2015). Self-monitoring application of conductive asphalt concrete under direct tensile deformation. *Case Studies in Construction Materials*; 3:70-77.
- MATLAB. (2011). *MATLAB* version 7.13.0.564 (R2011b). Natick, MA: MathWorks Inc.
- McDaniel R.S. (2015). NCHRP Synthesis 475: Fiber additives in asphalt mixtures. Report to American Association of State Highway and Transportation Officials, Transportation Research Board, Washington DC, USA.
- Menozi A, García Á, Partl M.N, Tebaldi G, Schuetz P. (2015). Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples. *Construction and Building Materials*; 75:162-168.
- Norambuena-Contreras J, Castro-Fresno D, Vega-Zamanillo A, Celaya M, Lombillo-Vozmediano I. (2010). Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test. *NDT&E International*; 43:629-634.
- Norambuena-Contreras J, Concha JL. (2016). Self-healing of asphalt mixtures via microwave heating: 2016 ISAP Symposium, ISAP2016, Jackson Hole, Wyoming, USA.
- Norambuena-Contreras J, García Á. (2016). Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. *Materials & Design*; 106:404-414.
- Norambuena-Contreras J, Gutiérrez-Aguilar V, González-Torre I. (2015). Physical and mechanical behaviour of a fibre-reinforced rubber membrane with self-healing purposes via microwave heating. *Construction and Building Materials*; 94:45-56.

- Norambuena-Contreras J, Serpell R, Valdés Vidal G, González A, Schlangen E. (2016). Effect of fibres addition on the physical and mechanical properties of asphalt mixtures with crack-healing purposes by microwave radiation. *Construction and Building Materials*; 127:369-282.
- Putman B.J, Amirghanian S.N. (2004). Utilization of waste fibres in stone matrix asphalt mixtures. *Resources, Conservation and Recycling*; 42:265-274.
- Tang N, Wu S.P, Chen M.Y, Pan P, Sun C.J. (2014). Effect mechanism of mixing on improving conductivity of asphalt solar collector. *International Journal of Heat and Mass Transfer*; 75:650-655.
- Technical Building Code [Código Técnico de la Edificación (CTE)]. (2010). Catálogo de elementos constructivos del CTE, Spain.
- The MathWorks, Inc. (2000). *Matlab: The Language of Technical Computing*. The MathWorks Inc, Natick, MA, USA.
- Wang H, Yang J, Liao H, Chen X. (2016). Electrical and mechanical properties of asphalt concrete containing conductive fibers and fillers. *Construction and Building Materials*; 122:184-190.
- Weber M & Kamal M.R. (1997). Estimation of the volumen resistivity of electrically conductive composites. *Polymer Composites*; 18:711-725.
- Wu S, Mo L, Shui Z, Chen Z. (2005). Investigation of the conductivity of asphalt concrete containing conductive fillers. *Carbon*; 43:1358-1363.
- Wu S, Ye Q, Li N. (2008). Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibres. *Construction and Building Materials*; 22:2111-2115.