

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE



EVALUACIÓN DE LA AUTORREPARACIÓN MEDIANTE CALENTAMIENTO POR RADIACIÓN DE
MICROONDAS Y MEDICIÓN DE OTRAS PROPIEDADES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON PAVIMENTO
ASFÁLTICO RECICLADO, FIBRAS DE LANA DE ACERO Y VIRUTAS METÁLICAS

LUCIANO CRISTÓBAL STOREY PALMA

Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía

Álvaro González Vacarezza

Profesor Co-referente

Rodrigo Delgadillo Sturla

Octubre de 2019

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE



EVALUACIÓN DE LA AUTORREPARACIÓN MEDIANTE CALENTAMIENTO POR RADIACIÓN DE
MICROONDAS Y MEDICIÓN DE OTRAS PROPIEDADES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON PAVIMENTO
ASFÁLTICO RECICLADO, FIBRAS DE LANA DE ACERO Y VIRUTAS METÁLICAS

Memoria de titulación presentada por
LUCIANO CRISTÓBAL STOREY PALMA

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Álvaro González Vacarezza

Profesor Co-referente
Rodrigo Delgadillo Sturla

Octubre de 2019

AGRADECIMIENTOS

A Asfalcura, que aportó los materiales y las caracterizaciones de estos.

Al profesor José Norambuena-Contreras, por su aporte a la investigación, la oportunidad de ir a trabajar a la Universidad del Bío Bío y su aporte con ideas. A José Concha, que me ayudó durante mi estadía y el trabajo en la Universidad del Bío Bío, con la realización de los ciclos de flexión-reparación y otras mediciones realizadas.

A Elber y Horacio, que me ayudaron en el laboratorio de la Universidad de Desarrollo en la confección de las probetas y en la realización de ensayos.

DEDICATORIA

A mi familia y amigos.

RESUMEN

En carreteras chilenas, las mezclas asfálticas tienen un elevado uso; debido a esto, y al interés de lograr disminuir los costos y aumentar la vida útil de estas mezclas, se ha investigado la capacidad de autorreparación de las mezclas asfálticas, intentando potenciar esta capacidad. En este sentido, se han estudiado mezclas con pequeñas cantidades de metal, que logren aumentar la capacidad de autorreparación de las mezclas confeccionadas con cemento asfáltico y áridos vírgenes.

En este estudio se busca analizar el efecto de la incorporación de fibras de lana de acero, virutas metálicas –residuos de tornería- y pavimento asfáltico reciclado (RAP), en: la capacidad de autorreparación, la densidad aparente, el contenido de vacíos de aire y el módulo de rigidez a tracción indirecta de mezclas asfálticas.

Para esto, se confeccionaron treinta tipos de mezclas, considerando cuatro niveles de contenido de RAP, y cinco niveles de contenido de fibras de lana de acero y virutas metálicas.

Para evaluar la capacidad de autorreparación de las mezclas, se realizaron siete ciclos de flexión-reparación consistentes en rotura de probetas semicilíndricas por flexión a tres puntos a una temperatura de -20 [°C] y reparación por exposición a microondas durante 40 segundos.

Los resultados obtenidos indican que el uso de RAP genera una disminución del contenido de vacíos de aire y un aumento de la rigidez de las mezclas; mientras que el uso de agregados metálicos genera un aumento del contenido de vacíos de aire y una disminución de la rigidez de las mezclas. Junto con esto, se obtuvo que el uso de RAP y agregados metálicos no modifica el comportamiento isotrópico de las mezclas asfálticas.

Los resultados de autorreparación indican que se puede reutilizar materiales y obtener mezclas con capacidad de autorrepararse, capacidad que disminuye con el aumento de RAP en las mezclas, y que se obtienen mejores resultados de autorreparación con virutas metálicas que con fibras de lana de acero, teniéndose el mejor resultado con un 1% de virutas metálicas.

Además, los resultados obtenidos en esta investigación han sido utilizados en dos artículos publicados en las revistas *Construction and Building Materials* y *Journal of Environmental Management* y en dos artículos de los congresos: Provia 2018 e ISAP 2018; además, han servido como base para nuevas investigaciones que generan continuidad a este estudio.

ABSTRACT

Asphalt mixtures are widely used in Chilean roads. This fact, together with the purpose of diminishing costs and increasing the service life of these mixtures, have led to investigate the capacity of self-healing in asphalt mixtures, aiming to enhance this capacity. Therefore, the study considers mixtures with small portions of metal, with the purpose of increasing self-healing capacity in mixtures developed with asphalt concrete and virgin aggregates.

This research intends to analyze the effect of the incorporation of steel wool fibers, metal shaving (turnery waste) and reclaimed asphalt pavement (RAP) on the self-healing capacity, the bulk density, the air voids content and the indirect tensile strength modulus of asphalt mixtures.

For this purpose, thirty types of mixtures were developed, considering four levels of RAP content and five levels of steel wool fibers and metal shaving content.

To evaluate the healing capacity of mixtures, seven cycles of bending-healing were developed, which involve a semi cylindrical specimen break due to a bending to three points at a temperature of -20 [°C] and to a healing by exposure to microwaves during forty seconds.

Results obtained indicate that the use of RAP reduces the content of air voids and increases the rigid properties on the mixtures; while the use of metal aggregates increases the content of air voids and reduces the rigid properties on the mixtures. Besides, results show that the use of RAP and metal aggregates does not affect the isotropic behavior of the asphalt mixtures.

The self-healing results indicate that materials can be reused, in order to obtain mixtures with a self-healing capacity, which reduces with the RAP increase on the mixtures, achieving then better results of self-healing with metal shaving than with steel wool fibers, being the best result a 1% of metal shaving.

Furthermore, results obtained through this investigation have been used in two papers published by the journals: Construction and Building Materials, and Journal of Environmental Management and in two papers presented in the congresses Provia 2018 and ISAP 2018. Consequently, these results have been used as a basis for new researches, which indeed ensures a continuity to this study.

GLOSARIO

| | |
|-------------------|---|
| <i>CT Scan</i> | : Tomografía Axial Computarizada, por su sigla en inglés (<i>Computed Tomography Scan</i>). |
| <i>CVA</i> | : Contenido de vacíos de aire. |
| <i>d</i> | : Deformación horizontal máxima, en mm. |
| <i>FLA</i> | : Fibras de lana de acero. |
| <i>ITS</i> | : Resistencia a tracción indirecta, por su sigla en inglés (<i>Indirect Tensile Strenght</i>). |
| <i>ITSM</i> | : Módulo de rigidez a tracción indirecta, por su sigla en inglés (<i>Indirect Tensile Stiffness Modulus</i>). |
| $NR_{i,j}$ | : Nivel de reparación (<i>Healing Ratio</i>) del ciclo i en mezclas asfálticas, de la probeta j , calculado como la razón entre $R_{i,j}$ y $R_{0,j}$. |
| P | : Carga máxima vertical, aplicada diametralmente a las probetas. |
| $R_{0,j}$ | : Resistencia a flexión inicial de la probeta j , previo a la primera reparación. |
| $R_{i,j}$ | : Resistencia a flexión de la probeta j , posterior a la reparación i . |
| <i>RAP</i> | : Pavimento asfáltico reciclado, de acuerdo a su sigla en inglés (<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>). |
| <i>SM</i> | : Módulo de rigidez, de acuerdo a su sigla en inglés (<i>Stiffness Modulus</i>). |
| t | : Espesor de las probetas, en mm. |
| <i>VM</i> | : Virutas metálicas. |
| $\rho_{aparente}$ | : Densidad aparente de la mezcla asfáltica, en gr/cm^3 . |
| $\rho_{máx}$ | : Densidad máxima teórica de la mezcla asfáltica, en gr/cm^3 . |
| ν | : Módulo de Poisson. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----------|
| AGRADECIMIENTOS | I |
| DEDICATORIA | II |
| RESUMEN | III |
| ABSTRACT | IV |
| GLOSARIO | V |
| ÍNDICE GENERAL | VI |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | X |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | XII |
| 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 PROBLEMA | 1 |
| 1.2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS..... | 2 |
| 1.2.1 Hipótesis | 2 |
| 1.2.2 Objetivo general | 2 |
| 1.2.3 Objetivos específicos..... | 2 |
| 1.3 ALCANCES DE ESTE ESTUDIO | 3 |
| 1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO | 4 |
| 1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA..... | 5 |
| 2 REVISIÓN DE LITERATURA..... | 6 |
| 2.1 UTILIZACIÓN DE RAP (<i>RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT</i>) EN MEZCLAS ASFÁLTICAS..... | 6 |
| 2.1.1 Contenido máximo y requisitos para la utilización de RAP..... | 6 |
| 2.1.2 Aporte de cemento asfáltico a la mezcla..... | 7 |
| 2.1.3 Efecto del uso de RAP en propiedades físicas de mezclas asfálticas..... | 8 |
| 2.2 CAPACIDAD DE AUTORREPARACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS..... | 10 |
| 2.2.1 Métodos existentes de autorreparación..... | 12 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.2.2 | <i>Mezclas asfálticas con fibras de lana de acero</i> | 12 |
| 2.2.3 | <i>Distribución de las fibras al interior de las mezclas asfálticas</i> | 13 |
| 2.2.4 | <i>Propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas con fibras</i> | 15 |
| 2.2.4.1 | Efecto sobre el contenido de vacíos de aire y la densidad aparente | 15 |
| 2.2.4.2 | Módulo de rigidez y resistencia a tracción | 16 |
| 2.2.5 | <i>Calentamiento por inducción y por exposición a microondas</i> | 17 |
| 2.2.6 | <i>Geometría de probetas y método de carga para ciclos de autorreparación</i> | 18 |
| 2.2.7 | <i>Resultados del nivel de reparación de investigaciones previas</i> | 19 |
| 2.2.7.1 | Mezclas autorreparables en terreno | 24 |
| 3 | MATERIALES, CONFECCIÓN DE MUESTRAS Y METODOLOGÍA | 25 |
| 3.1 | MATERIALES | 25 |
| 3.1.1 | <i>Áridos vírgenes</i> | 25 |
| 3.1.2 | <i>RAP: Reclaimed Asphalt Pavement</i> | 25 |
| 3.1.3 | <i>Cemento asfáltico</i> | 27 |
| 3.1.4 | <i>Agregados metálicos</i> | 27 |
| 3.2 | CONFECCIÓN DE MUESTRAS..... | 30 |
| 3.2.1 | <i>Mezclado y compactación</i> | 30 |
| 3.2.2 | <i>Geometría de probetas para ciclos de autorreparación</i> | 31 |
| 3.3 | METODOLOGÍA..... | 33 |
| 3.3.1 | <i>Densidad aparente y contenido de vacíos de aire</i> | 33 |
| 3.3.2 | <i>Módulo de rigidez a tracción indirecta (ITSM)</i> | 33 |
| 3.3.3 | <i>Ciclos flexión-reparación y medición de la autorreparación</i> | 35 |
| 4 | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 39 |
| 4.1 | DENSIDAD APARENTE Y CONTENIDO DE VACÍOS DE AIRE..... | 39 |
| 4.1.1 | <i>Efecto del contenido de RAP</i> | 39 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.1.2 | <i>Efecto del contenido y tipo de agregado metálico</i> | 41 |
| 4.1.2.1 | Efecto del tipo de agregado metálico | 41 |
| 4.1.2.2 | Efecto del contenido de agregado metálico | 42 |
| 4.2 | MÓDULO DE RIGIDEZ A TRACCIÓN INDIRECTA (ITSM) | 44 |
| 4.2.1 | <i>Efecto del uso de RAP</i> | 44 |
| 4.2.2 | <i>Efecto del tipo de agregado metálico</i> | 45 |
| 4.2.3 | <i>Interacción entre factores</i> | 46 |
| 4.2.4 | <i>Isotropía de mezclas asfálticas con agregados metálicos</i> | 49 |
| 4.3 | EVALUACIÓN DE LA REPARACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS | 50 |
| 4.3.1 | <i>Efecto del contenido de RAP</i> | 51 |
| 4.3.2 | <i>Efecto del contenido de fibras de lana de acero</i> | 53 |
| 4.3.3 | <i>Efecto del contenido de virutas metálicas</i> | 55 |
| 4.3.4 | <i>Efecto del tipo de agregado metálico e interacción entre tipo y contenido de agregado metálico</i> | 56 |
| 4.3.4.1 | Interacción entre tipo y contenido de agregado metálico | 58 |
| 4.3.5 | <i>Efecto de la cantidad de ciclos</i> | 60 |
| 4.3.6 | <i>Interacción entre factores</i> | 62 |
| 4.3.6.1 | Efecto del contenido de agregado metálico en mezclas sin RAP | 62 |
| 4.3.6.2 | Interacción entre todos los factores evaluados: contenido de RAP y tipo y contenido de agregado metálico | 64 |
| 5 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 76 |
| 5.1 | CONCLUSIONES | 76 |
| 5.2 | RECOMENDACIONES | 77 |
| 6 | REFERENCIAS | 79 |
| | ANEXOS | 82 |
| | ANEXO A | 83 |

| | |
|----------------------|------------|
| ANEXO B | 85 |
| ANEXO C | 87 |
| ANEXO D | 92 |
| ANEXO E | 94 |
| ANEXO F | 103 |
| ANEXO G | 115 |
| ANEXO H | 126 |
| ANEXO I | 137 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2-1 Valores medios de densidad seca, adaptado de Guthrie et al. (2007) | 9 |
| Tabla 2-2 Temperatura y nivel de reparación del cemento asfáltico luego del primer ciclo de reparación en probetas con 4% de fibras (Norambuena-Contreras & García, 2016)..... | 23 |
| Tabla 3-1 Granulometría de áridos vírgenes y de RAP..... | 27 |
| Tabla 3-2 Procedencia de cemento asfáltico según porcentaje de RAP en la mezcla | 27 |
| Tabla 3-3 Características físicas de los agregados metálicos | 28 |
| Tabla 3-4 Porcentajes, volúmenes y masas de agregados metálicos utilizados. | 29 |
| Tabla 3-5 Factores y niveles a evaluar..... | 30 |
| Tabla 3-6 Granulometría a utilizar por tipo de mezcla, de acuerdo al porcentaje de RAP considerado | 30 |
| Tabla 4-1 Densidad aparente de mezclas asfálticas en función de su contenido de RAP | 41 |
| Tabla 4-2 Contenido de vacíos de aire de mezclas asfálticas en función de su contenido de RAP .. | 41 |
| Tabla 4-3 Densidad aparente de mezclas asfálticas en función del tipo de agregado metálico | 42 |
| Tabla 4-4 Contenido de vacíos de aire de mezclas asfálticas en función del tipo de agregado metálico | 42 |
| Tabla 4-5 Densidad aparente de mezclas asfálticas en función del contenido de agregado metálico | 43 |
| Tabla 4-6 Contenido de vacíos de aire de mezclas asfálticas en función del contenido de agregado metálico..... | 43 |
| Tabla 4-7 Valores medios y desviación estándar del ITSM en función del contenido de RAP..... | 44 |
| Tabla 4-8 Valores medios del ITSM en función del tipo de agregado metálico en mezclas sin RAP | 45 |
| Tabla 4-9 Valores medios del ITSM en función del tipo de agregado metálico..... | 46 |
| Tabla 4-10 Valores medios de módulos de rigidez [MPa]..... | 46 |

| | |
|--|----|
| Tabla 4-11 Ecuaciones para los valores del Módulo a tracción indirecta como función de la temperatura | 48 |
| Tabla 4-12 Resumen del nivel de reparación en función del contenido de RAP | 52 |
| Tabla 4-13 Valores principales del nivel de reparación de mezclas con diferentes porcentajes de fibra de lana de acero | 54 |
| Tabla 4-14 Valores principales del nivel de reparación de mezclas con diferentes porcentajes de virutas metálicas | 55 |
| Tabla 4-15 Resumen del nivel de reparación en función del tipo de agregado metálico..... | 57 |
| Tabla 4-16 Valores principales del nivel de reparación de mezclas con el paso de los ciclos | 60 |
| Tabla 4-17 Interacción entre tipo y contenido de agregado metálico en mezclas sin RAP | 63 |
| Tabla 4-18 Niveles medios de reparación por tipo de mezcla y ciclo. | 65 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2-1 Capas de cemento asfáltico sobre diferentes tipos de áridos en mezclas asfálticas con RAP | 8 |
| Figura 2-2 Variación de la densidad seca de mezclas asfálticas con distintos porcentajes de RAP (Guthrie et al., 2007) | 9 |
| Figura 2-3 Vista esquemática de la aplicación de cargas de tránsito en un pavimento real (Ayar et al., 2016)..... | 11 |
| Figura 2-4 Imágenes ópticas de fibras de lana de acero | 12 |
| Figura 2-5 CT-Scan de probetas de concreto asfáltico poroso con diferentes tiempos de mezclado (Liu et al., 2011)..... | 13 |
| Figura 2-6 Distribución de virutas dentro de la microestructura de la mezcla asfáltica, en probetas con 4 contenidos distintos de fibra (Norambuena-Contreras et al., 2016) | 14 |
| Figura 2-7 Modelos en 3D de las fibras de lana de acero al interior de secciones de probetas de mezcla asfáltica con (a) 4% de fibras y (b) 8% de fibras (Norambuena-Contreras et al., 2016) | 15 |
| Figura 2-8 Efecto del contenido de fibras en la densidad media de probetas de cemento asfáltico de prueba (Norambuena-Contreras et al., 2016) | 16 |
| Figura 2-9 Módulos de rigidez de probetas versus (a) temperatura de prueba y (b) contenido de vacíos de aire (Norambuena-Contreras et al., 2016) | 17 |
| Figura 2-10 Resistencia a tracción indirecta (ITS) de cemento asfáltico poroso (Liu et al., 2011) ... | 17 |
| Figura 2-11 Tipos de geometrías utilizadas para ensayos a flexión para medir autorreparación | 19 |
| Figura 2-12 Efecto del tiempo de calentamiento en la temperatura superficial de las probetas debido a (a) calentamiento por microondas y (b) calentamiento por inducción (Norambuena-Contreras & García, 2016) | 20 |
| Figura 2-13 Efecto del tiempo de calentamiento en la temperatura de la mezcla cemento asfáltico-fibras de lana de acero debido a (a) calentamiento por microonda y (b) calentamiento por inducción (Norambuena-Contreras & García, 2016) | 21 |

| | |
|---|----|
| Figura 2-14 Niveles de reparación versus repetidos ciclos para probetas con varios porcentajes de fibras bajo (a) calentamiento por microonda y (b) calentamiento por inducción (Norambuena-Contreras & García, 2016)..... | 22 |
| Figura 2-15 Niveles de reparación versus ciclos de reparación repetidos para probetas con 4% de fibras, después de varios periodos de calentamiento bajo (a) calentamiento por microonda y (b) calentamiento por inducción (Norambuena-Contreras & García, 2016)..... | 23 |
| Figura 3-1 Áridos vírgenes utilizados en las mezclas: (a) grava 3/4", (b) grava 1/2" y (c) polvo roca | 26 |
| Figura 3-2 Áridos de RAP: (a) RAP 3/4" y (b) RAP 3/8" | 26 |
| Figura 3-3 Imágenes ópticas de (a) fibras de lana de acero y (b) virutas metálicas | 28 |
| Figura 3-4 Granulometrías utilizadas en la confección de probetas..... | 32 |
| Figura 3-5 Probetas cortadas en cuartos y con hendidura para ciclos de flexión-reparación..... | 32 |
| Figura 3-6 Forma esquemática del pulso de carga (CSN, 2012)..... | 34 |
| Figura 3-7 Etapas de ciclos flexión-reparación..... | 35 |
| Figura 3-8 Detalles de cinta para afirmar probetas durante exposición a microondas..... | 36 |
| Figura 3-9 Disposición de probeta para ensayo a flexión | 37 |
| Figura 3-10 Medición de resistencia a flexión..... | 38 |
| Figura 4-1 Densidad y Contenido de Vacíos de Aire promedios de probetas: mezclas con (a) y (b) FLA y (c) y (d) VM | 40 |
| Figura 4-2 Módulo de rigidez a tracción indirecta de probetas con (a) fibras de lana de acero y (b) virutas metálicas | 47 |
| Figura 4-3 Relación entre módulos de rigidez de las probetas medidos en forma longitudinal y perpendicular a esta..... | 49 |
| Figura 4-4 Nivel de reparación en función del contenido de RAP | 52 |
| Figura 4-5 Nivel de reparación en función del contenido de fibras de lana de acero | 54 |
| Figura 4-6 Nivel de reparación en función del contenido de virutas metálicas..... | 55 |
| Figura 4-7 Nivel de reparación en función del tipo del agregado metálico..... | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 4-8 Niveles de reparación en función de la interacción tipo y contenido de agregado metálico | 58 |
| Figura 4-9 Movimiento de material por ausencia de confinamiento | 59 |
| Figura 4-10 Nivel de reparación en función del ciclo | 61 |
| Figura 4-11 Niveles de reparación en función de la interacción tipo y contenido de agregado metálico, en mezclas sin RAP | 63 |
| Figura 4-12 Ciclos de reparación de mezclas sin RAP y con FLA | 68 |
| Figura 4-13 Ciclos de reparación de mezclas sin RAP y con VM | 69 |
| Figura 4-14 Ciclos de reparación de mezclas con 10% de RAP y con FLA | 70 |
| Figura 4-15 Ciclos de reparación de mezclas con 10% de RAP y con VM | 71 |
| Figura 4-16 Ciclos de reparación de mezclas con 20% de RAP y con FLA | 72 |
| Figura 4-17 Ciclos de reparación de mezclas con 20% de RAP y con VM | 73 |
| Figura 4-18 Ciclos de reparación de mezclas con 30% de RAP y con FLA | 74 |
| Figura 4-19 Ciclos de reparación de mezclas con 30% de RAP y con VM | 75 |

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Problema

En Chile, aproximadamente un 87% de la red vial pavimentada corresponde a pavimentos asfálticos, lo que equivale a 17 000 km (Dirección de Vialidad, 2014), valor porcentual similar al promedio de la Unión Europea, donde aproximadamente el 90% de la red vial corresponde a pavimentos asfálticos (EAPA, 2017) y similar al de Estados Unidos, donde más del 90% de las carreteras y caminos son de pavimentos asfálticos (U. S. Department of Transportation, 2011a).

Junto con la alta cantidad de vías construidas de pavimentos asfálticos, se estima que entre los años 2016 y 2025, la inversión asociada a vialidad interurbana concesionada que corresponderá a mantención de la rutas será aproximadamente de un 50% de la inversión total en vialidad interurbana concesionada, considerando nuevas obras, mantención y ampliación de capacidad, equivalente a 3021 millones de dólares (Cámara Chilena de la Construcción, 2016).

Por otro lado, existen costos asociados a la obtención de los materiales para la construcción de las rutas; en el caso de las mezclas asfálticas, los áridos y el cemento asfáltico, aproximadamente 200 dólares por metro cúbico, desde la obtención hasta que la mezcla se encuentra ejecutada.

Debido a estos puntos, se han realizado diferentes investigaciones con la intención de disminuir los costos de los pavimentos asfálticos, siendo uno de estos métodos el aumentar la vida útil de las mezclas asfálticas, que se ve afectada por factores como las cargas de tránsito y el clima, entre otros. Una forma de aumentar la vida útil de las mezclas asfálticas es hacerlas autorreparables mediante la adición de pequeñas cantidades de metal y exponiendo las mezclas a alguna fuente de energía electromagnética (García et al., 2009), para cerrar las grietas presentes producto del paso del tiempo. Si bien esta solución aumenta la vida útil del pavimento asfáltico, hasta antes del desarrollo de esta memoria solo se había estudiado esta solución con materiales vírgenes –lo que no disminuye los costos iniciales de una mezcla asfáltica-, pero no se ha estudiado la posibilidad de modificar un pavimento que ya está en uso y convertirlo en uno con la capacidad de autorrepararse.

1.2 Hipótesis y objetivos

1.2.1 Hipótesis

Hipótesis 1:

La utilización de pavimento asfáltico reciclado, fibras de lana de acero y virutas metálicas no modifica las propiedades físicas de las mezclas asfálticas.

Hipótesis 2:

La utilización de pavimento asfáltico reciclado, fibras de lana de acero y virutas metálicas no modifica las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas.

Hipótesis 3:

La utilización de pavimento asfáltico reciclado, fibras de lana de acero y virutas metálicas no modifica la capacidad de autorreparación de las mezclas asfálticas.

1.2.2 Objetivo general

Analizar el efecto de la incorporación de pavimento asfáltico reciclado, fibras de lana de acero y virutas metálicas, en la capacidad de autorreparación y en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas.

1.2.3 Objetivos específicos

- Describir los efectos del uso de RAP, fibras de lana de acero y virutas metálicas en propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas.
- Comparar los efectos del uso de fibras de lana de acero y virutas metálicas en propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas.
- Describir los efectos del uso de RAP, fibras de lana de acero y virutas metálicas en la capacidad de autorreparación de mezclas asfálticas.
- Comparar los efectos del uso de fibras de lana de acero y virutas metálicas en la capacidad de autorreparación de mezclas asfálticas.
- Describir y comparar los efectos de la combinación de RAP con fibras de lana de acero y la combinación de RAP con virutas metálicas en la capacidad de autorreparación de mezclas asfálticas.

1.3 Alcances de este estudio

Este trabajo se encuentra realizado considerando una granulometría semidensa de banda IV-A-12 (MOP, 2016a) y cemento asfáltico CA24, de acuerdo a lo indicado en el Manual de Carreteras (MOP, 2016b), por lo que los resultados obtenidos se limitan a este tipo de mezclas. Si bien, puede que estos resultados sean similares con otras bandas granulométricas u otro cemento asfáltico, esto no puede ser asegurado con este estudio.

Todos los materiales utilizados han sido obtenidos en Chile.

Para la evaluación de la autorreparación solo se realizaron ensayos en laboratorio, por lo que no se cuenta con una correlación entre valores obtenidos en laboratorio y valores obtenidos de terreno.

Solo se analiza un tipo de RAP, un tipo de fibra de lana de acero y un tipo de viruta metálica.

Los ensayos realizados para los ciclos de flexión-reparación no corresponden a ensayos estandarizados, ni en Chile ni a nivel internacional.

1.4 Metodología de trabajo

La realización de este trabajo se realizó bajo la siguiente metodología, consistente en 5 etapas.

Investigación Bibliográfica

Estudio y búsqueda de información existente sobre la autorreparación de mezclas asfálticas mediante distintos métodos, enfocado en: formas de evaluar la autorreparación, resultados obtenidos y tipos de mezclas estudiadas.

Diseño del trabajo experimental

Definición de las mezclas a confeccionar, considerando todos los materiales que modifican estas mezclas y definición del trabajo a realizar en laboratorio junto con las variables a evaluar.

Trabajo experimental

Confección de probetas y realización de ensayos ITSM y ciclos de flexión-reparación.

Análisis de resultados

Realización de un análisis global de los resultados obtenidos, basado en un análisis estadístico, junto a un análisis más detallado de cada factor y de las relaciones existentes entre los factores; además, se realiza una comparación con el estado del arte actual.

Desarrollo de artículos para dos Journals y dos congresos: Provia e ISAP, en conjunto con investigadores que apoyaron el desarrollo de esta memoria.

Conclusiones y recomendaciones

Generación de las principales conclusiones obtenidas a partir del trabajo realizado y generación de recomendaciones para la confección de mezclas y para futuras investigaciones.

1.5 Estructura de la memoria

Esta memoria se encuentra estructurada en seis capítulos, que en resumen, contienen lo siguiente:

Capítulo 1: Introducción

Se explica en qué consiste esta memoria: se entrega la razón de esta, se definen las hipótesis y los objetivos y se presenta la metodología y la estructura de la memoria.

Capítulo 2: Revisión de literatura

Se entregan características del uso actual de RAP y consideraciones que se deben tener en mezclas para su uso. Además, se presentan resultados relevantes de la evaluación de la autorreparación de mezclas asfálticas con materiales vírgenes y con fibras de lana de acero.

Capítulo 3: Materiales, confección de muestras y metodología

Primero, se informan los materiales que serán utilizados junto a una caracterización de estos y las cantidades utilizadas de cada uno; luego, se presenta el proceso de confección de probetas y la adaptación de estas para la realización de los ensayos; y finalmente, se presentan las mediciones que se realizarán, junto con una descripción del ensayo utilizado para la medición de la autorreparación de las mezclas.

Capítulo 4: Análisis de resultados

Se presentan los resultados obtenidos para cada tipo de ensayo y un análisis de estos, cómo se relacionan entre sí.

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

Se entregan las conclusiones generales del estudio y recomendaciones para la confección de las mezclas y para trabajos futuros.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

La Revisión de literatura que se presenta consta de dos secciones: la “Utilización de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) en mezclas asfálticas”: las condiciones de su uso, la interacción entre el cemento asfáltico proveniente del RAP y el cemento asfáltico virgen y el efecto en las propiedades físicas de las mezclas asfálticas, y la “Capacidad de autorreparación de mezclas asfálticas” que presenta consideraciones para el estudio e información obtenida de estudios anteriores. La interacción de estas dos variables –uso de RAP y evaluación de autorreparación- no ha sido investigada.

2.1 Utilización de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) en mezclas asfálticas

2.1.1 Contenido máximo y requisitos para la utilización de RAP

El desempeño y la vida útil de las mezclas asfálticas que contienen hasta un 30 [%] de RAP son similares a mezclas confeccionadas solo con materiales vírgenes, de acuerdo a un estudio del *LTPP program (Long-Term Pavement Performance program)* (U. S. Department of Transportation, 2011a).

Dicho esto, el porcentaje máximo de RAP que se puede utilizar en una mezcla asfáltica queda limitado por dos criterios del U.S. Department of Transportation (2011a):

- Debido a la compactación y el desgaste de la mezcla asfáltica, el RAP generalmente contiene una gran cantidad de áridos finos, incluyendo material que pasa la malla #200, lo que puede resultar como limitante del contenido máximo de RAP a utilizar y debe ser compensado con la granulometría de los áridos vírgenes; y
- En algunos estados de Estados Unidos, existe un porcentaje mínimo de cemento asfáltico nuevo, limitando la cantidad de cemento asfáltico proveniente del RAP y, con esto, la cantidad máxima de RAP a utilizar.

En Chile, la Dirección de Aeropuertos (2014) fija el contenido máximo de RAP en 30 [%], mismo valor adoptado por la *Federal Aviation Administration* (U.S. Department of Transportation, 2011b). Además, en caso que la procedencia del RAP sea única y se conozca su trazabilidad de producción, puede utilizarse una cantidad mayor a 20 [%] de RAP en la mezcla (Laboratorio Nacional de Vialidad, 2016).

La granulometría que presentan los áridos provenientes del RAP no es igual a su granulometría original, debido a que los áridos tienen cemento asfáltico adherido, aumentando su tamaño. Sin

embargo, la granulometría utilizada para diseño es la granulometría original de los áridos recuperados del RAP (U. S. Department of Transportation, 2011a). Junto con esto, el tamaño máximo del RAP debe ser igual al tamaño máximo del árido definido para la mezcla (Laboratorio Nacional de Vialidad, 2016).

2.1.2 Aporte de cemento asfáltico a la mezcla

Como ya se mencionó, los áridos provenientes del RAP tienen cemento asfáltico adherido, por lo que el cemento asfáltico considerado en la mezcla corresponde tanto al cemento asfáltico virgen como al que es aportado por el RAP, solo si se cumplen las siguientes condiciones del Laboratorio Nacional de Vialidad (2016):

- Se utiliza más de 10 [%] de RAP en la mezcla; y
- El porcentaje de cemento asfáltico que posee el RAP es mayor a 3.0 [%].

Si no se cumplen estas condiciones, el RAP solo se considera como árido (Laboratorio Nacional de Vialidad, 2016).

El porcentaje del cemento asfáltico total que es aportado por el RAP se determina como se muestra en la Ecuación 2-1:

$$\text{Cemento asfáltico reemplazado} [\%] = \frac{A \cdot B}{C} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Donde:

- A: porcentaje de cemento asfáltico en el RAP;
- B: porcentaje de RAP en la mezcla; y
- C: porcentaje total de cemento asfáltico contenido en la mezcla.

Si bien el rendimiento y la vida útil de las mezclas asfálticas con RAP son similares a las mezclas con materiales vírgenes, Colbert & You (2012) determinaron que el aumento de la concentración de RAP contribuye a aumentar la rigidez y la viscosidad del cemento asfáltico resultante de la mezcla y que solo una parte del cemento asfáltico proveniente del RAP se mezcla con el cemento asfáltico virgen, teniéndose que los áridos provenientes del RAP generan unos “áridos compuestos” –por el árido y una capa de cemento asfáltico envejecido-, y que el cemento asfáltico virgen se mezcla solo con una parte de cemento asfáltico envejecido. Por lo tanto, aunque se considere la totalidad del cemento asfáltico proveniente del RAP en la cantidad total de cemento asfáltico, solo una fracción de este trabaja como cemento asfáltico. Junto con esto, Huang et al. (2005) determinaron que la cantidad

de cemento asfáltico envejecido que queda adherida a los áridos es cercana al 60 [%], mientras que solo un 40 [%] de cemento asfáltico envejecido proveniente del RAP se mezcla con el cemento asfáltico virgen.

La Figura 2-1 muestra esta situación: los áridos provenientes del RAP tienen una capa de cemento asfáltico envejecido que los recubren, mientras que los áridos vírgenes quedan en contacto con la mezcla de cemento asfáltico virgen y cemento asfáltico proveniente del RAP.

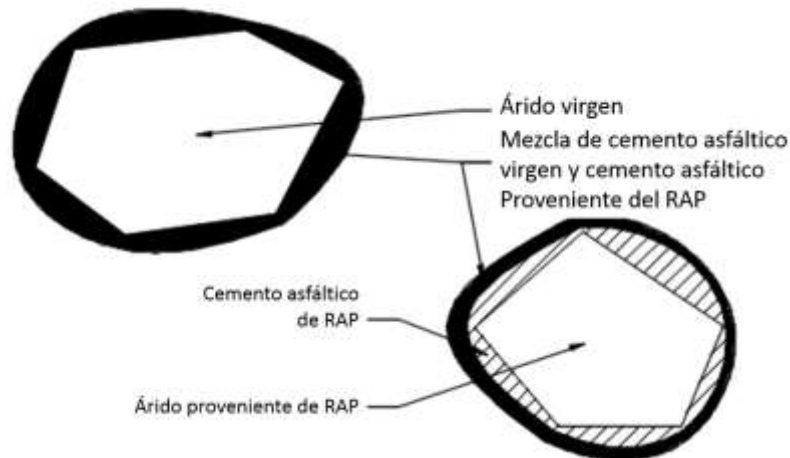


Figura 2-1 Capas de cemento asfáltico sobre diferentes tipos de áridos en mezclas asfálticas con RAP

2.1.3 Efecto del uso de RAP en propiedades físicas de mezclas asfálticas

De acuerdo a los resultados obtenidos por Guthrie, Colley & Eggett (2007), donde se compararon los resultados de mezclas asfálticas con cinco niveles de RAP, incluyendo 0% y 100%, procedentes de dos fuentes distintas, el uso de RAP en mezclas asfálticas genera una disminución de la densidad seca, como se muestra en la Tabla 2-1 y en la Figura 2-2, en las que puede verse que para las mezclas con RAP R1 se tiene una disminución de 4,3% entre mezclas sin RAP y mezclas con 100% de RAP, y que las mezclas con RAP R2 presentan una disminución de 14,5% entre mezclas sin RAP y mezclas con 100% de RAP. Estos valores de disminución obtenidos indican, además de la dependencia entre contenido de RAP y la densidad seca de las mezclas, que la densidad depende también del RAP que se esté utilizando, por lo que es esperable no obtener los mismos resultados al confeccionar mezclas asfálticas con RAP proveniente de diferentes obras.

Por otro lado, Pradyumna, Mittal & Jain (2013) evaluaron mezclas sin RAP y mezclas con 20% de RAP, obteniendo que el uso de RAP en mezclas asfálticas genera un aumento del contenido de vacíos

de aire, presentando un aumento de 25,5% del CVA, pero obtuvieron una disminución de la densidad aparente menor a 0,1% entre ambas mezclas.

Tabla 2-1 Valores medios de densidad seca, adaptado de Guthrie et al. (2007)

| Contenido de RAP | Densidad seca [lb/pie ³] | |
|------------------|--------------------------------------|-------|
| | R1 | R2 |
| 0 | 136.1 | 136.1 |
| 25 | 134.9 | 132.9 |
| 50 | 132.9 | 127.4 |
| 75 | 131.4 | 122.0 |
| 100 | 130.2 | 116.4 |

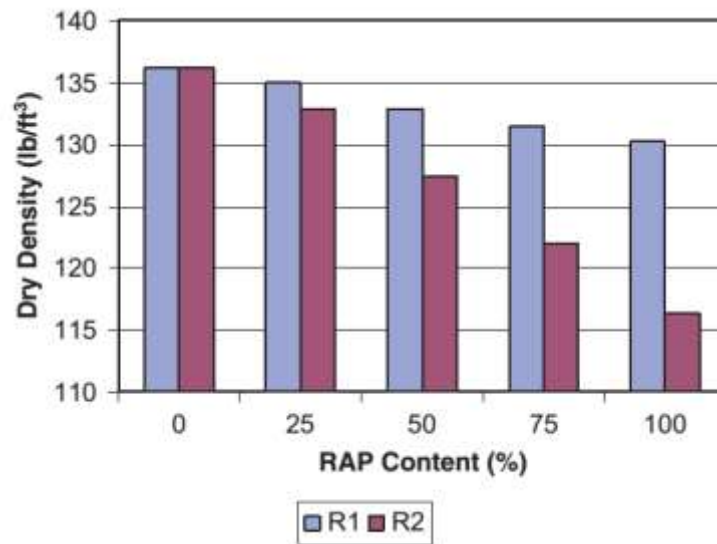


Figura 2-2 Variación de la densidad seca de mezclas asfálticas con distintos porcentajes de RAP (Guthrie et al., 2007)

2.2 Capacidad de autorreparación de mezclas asfálticas

El cemento asfáltico es un material que presenta la capacidad de autorreparación, es decir, la habilidad de cerrar sus fisuras existentes (Ayar, Moreno-Navarro, & Rubio-Gámez, 2016), (Micaelo, Al-Mansoori, & García, 2016), (García, 2012) y (Norambuena-Contreras & García, 2016). Dado que la viscosidad del cemento asfáltico depende de su temperatura, el comportamiento que presenta es el de un fluido Newtoniano cuando la temperatura supera una temperatura límite, entre los 30 [°C] y 70 [°C] dependiendo del cemento asfáltico, mientras que su comportamiento es no Newtoniano por debajo de este límite (Norambuena-Contreras & García, 2016). Dependiendo de la viscosidad y la temperatura del cemento asfáltico, entre otros factores, este fluye por la fisura, reparando la fisura de forma parcial o completa si se proporciona el tiempo suficiente entre cargas de tránsito (Norambuena-Contreras, Serpell, Valdés Vidal, González, & Schlangen, 2016), pudiendo incluso tardar días en repararse, ya que es un proceso lento a temperatura ambiente (Schlangen & Sangadji, 2013). Con esta capacidad de reparar fisuras, se disminuyen considerablemente los costos de mantenimiento, se extiende la vida de servicio del pavimento y, eventualmente, se reduce la emisión de gases con efecto invernadero (Ayar et al., 2016).

El proceso de reparación de materiales bituminosos consta de tres etapas (Liu, García, Schlangen, & Van de Ven, 2011), (Ayar et al., 2016) y (García, Schlangen, & Van de Ven, 2009), que son:

1. Cierre de las fisuras debido a consolidación de esfuerzos y flujo del cemento asfáltico;
2. Cierre de la fisura debido a humedecimiento (adhesión de las dos superficies de la fisura por energía de superficie); y
3. Recuperación de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica debido a difusión y aleatorización de estructuras de asfaltenos (la capacidad de difusión está directamente relacionada con la potencial movilidad de las moléculas en el cemento asfáltico y un cemento asfáltico que contiene más moléculas con cadenas largas y ramas menores presenta una mayor movilidad molecular).

La autorreparación de mezclas asfálticas se ve influenciada por factores intrínsecos y factores extrínsecos (Ayar et al., 2016). Los factores intrínsecos, y que favorecen la capacidad de reparación, son:

- Características del cemento asfáltico: un alto grado de penetración y una baja viscosidad;

- Características de la mezcla asfáltica: alto contenido de cemento asfáltico, graduación gruesa y un bajo contenido de vacíos de aire y aumento de vacíos rellenos con cemento asfáltico, ya que estos dos últimos puntos facilitan el contacto entre las superficies de las grietas; y
- Uso de modificadores como la cal hidratada (puede acelerar el flujo del cemento asfáltico) y el uso de cápsulas o fibras de acero.

Los factores extrínsecos que modifican la capacidad de reparación y que afectan en mayor medida en terreno son:

- Temperatura, dada la dependencia de la viscosidad con esta;
- Condiciones de carga: presentes en laboratorio como la frecuencia de las cargas en Hertz y presentes en terreno como la cercanía entre los vehículos al pasar con una gran frecuencia y la distribución de los ejes en cada vehículo, como puede verse en la Figura 2-3 donde los periodos entre las cargas no son iguales, al no serlo las distancias entre estos ejes ni las velocidades de los vehículos;
- Valores de las cargas: controladas (e.g. constantes o cíclicas) en laboratorio y variables en terreno debido a los diferentes vehículos y entre los ejes de los vehículos;
- Periodos de descanso: presentes en laboratorio como una pausa entre la aplicación de cargas a las probetas por un tiempo determinado y en terreno como periodos en que se tiene ausencia de paso de vehículos; y
- Humedad: presenta mayor afinidad a los áridos que el cemento asfáltico.

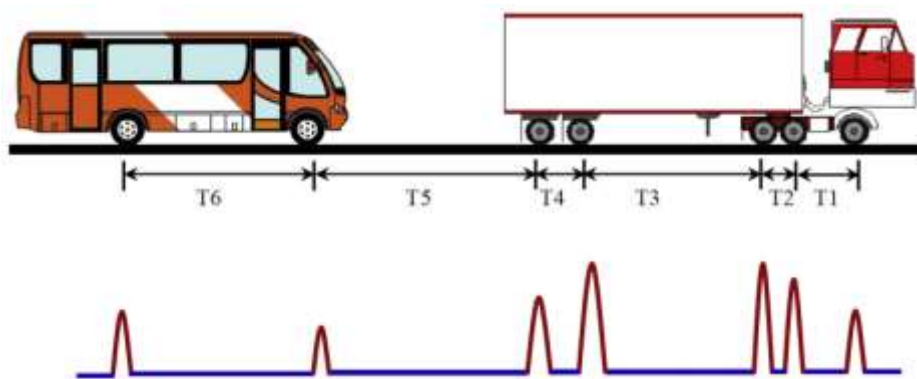


Figura 2-3 Vista esquemática de la aplicación de cargas de tránsito en un pavimento real (Ayar et al., 2016)

Las propiedades de autorreparación de las mezclas asfálticas pueden ser mejoradas, entregando condiciones cercanas a las óptimas (como aumentar la temperatura de la mezcla en periodos de

reposo) o añadiendo rejuvenecedores a la mezcla (que se activan donde y cuando la mezcla lo necesita).

2.2.1 Métodos existentes de autorreparación

La posibilidad de reparar mezclas asfálticas se ha estudiado mediante diferentes métodos, como la adición de fibras de metal a la mezcla junto a algún método que permita acelerar su calentamiento –como por inducción de calentamiento o vía calentamiento por exposición a microondas- y la adición de rejuvenecedores al interior de la mezcla –como cápsulas- que al quebrarse liberan el agente rejuvenecedor que repara la grieta presente (García et al., 2009), (García et al., 2011). Hasta el desarrollo de esta memoria, las investigaciones con agregados metálicos han estudiado mezclas con fibras de lana de acero (correspondiente a acero bajo en carbono de densidad $7.180 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$, de diámetro medio 0.133 [mm] y longitudes iniciales en el rango 2 a 14 [mm] (Norambuena-Contreras et al., 2016) como se muestran en la Figura 2-4, pero no han evaluado el comportamiento de mezclas con metales provenientes de otras fuentes y de mayores dimensiones, tanto en espesores como en longitudes, como lo son las virutas metálicas (elemento utilizado en esta investigación).



Figura 2-4 Imágenes ópticas de fibras de lana de acero

2.2.2 Mezclas asfálticas con fibras de lana de acero

El uso de fibras de lana de acero en las mezclas asfálticas aparece como una forma de lograr aumentar la temperatura de la mezcla asfáltica durante los periodos de reposo de esta. Estas fibras pueden ser utilizadas para aumentar las razones de reparación de mezclas asfálticas considerando

que pueden absorber y entregar más energía térmica que los demás componentes de la mezcla (Norambuena-Contreras et al., 2016).

2.2.3 Distribución de las fibras al interior de las mezclas asfálticas

Las fibras de lana de acero no logran una distribución uniforme al interior de las mezclas asfálticas, debido a que estas tienden a juntarse (incluso sin estar en mezclas), teniéndose que la distribución de las fibras depende de: la duración de mezclado, la longitud de las fibras y la cantidad de fibras en la mezcla, entre otras variables. En la Figura 2-5 se muestra la distribución de las fibras al interior de probetas con mezcla porosa dependiendo de la duración del mezclado, donde se tiene: Figura 2-5(a) 10 minutos de mezclado, Figura 2-5(b) 12 minutos, Figura 2-5(c) 15 minutos y Figura 2-5(d) 20 minutos. Las zonas más claras en las imágenes corresponden a las fibras, con lo que puede verse que al aumentar el tiempo de mezclado se logra una mejor distribución de estas (Liu et al., 2011).

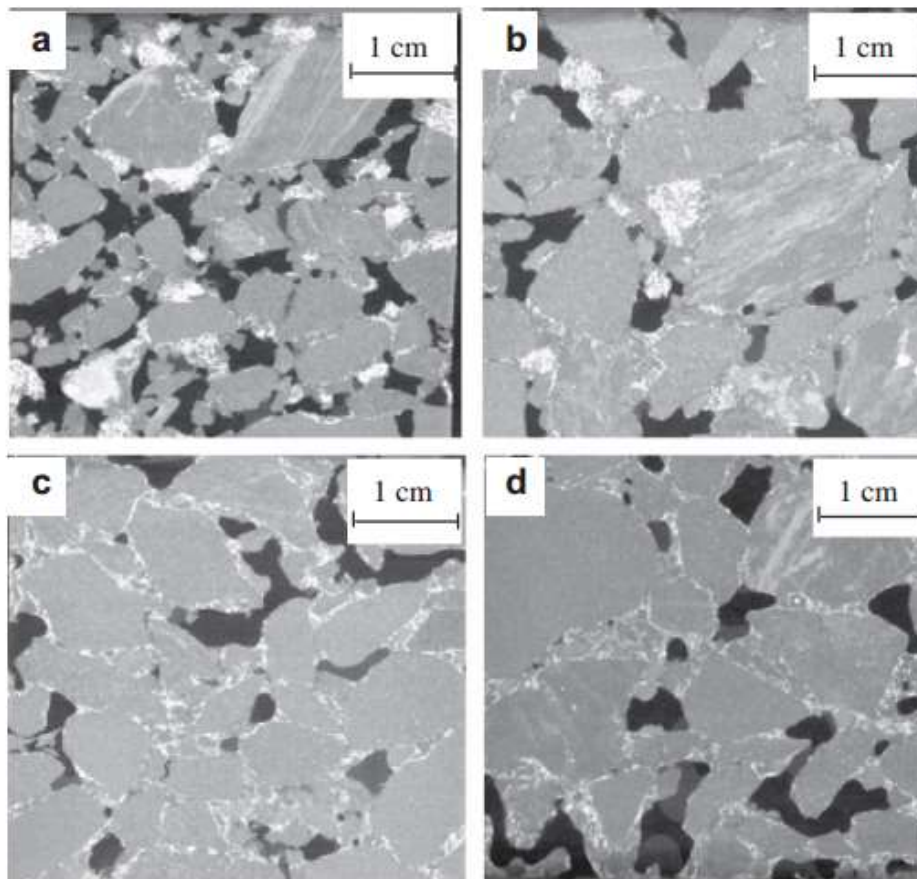


Figura 2-5 CT-Scan de probetas de concreto asfáltico poroso con diferentes tiempos de mezclado (Liu et al., 2011)

Además, como puede verse en la Figura 2-6, dentro del rango de contenido de fibras estudiado por Norambuena-Contreras et al. (2016), la distribución de frecuencia de volumen local de fibras puede ser descrita usando una función de distribución normal, con valores positivos. Junto con esto, la varianza del contenido incrementa con el aumento del contenido de fibras en la mezcla. Como consecuencia de esta varianza, en la microestructura de la mezcla que contiene un alto contenido de fibras, se observan zonas con aglomeraciones de fibras, indicando que hay formación de racimos o *clusters* (Norambuena-Contreras et al., 2016).

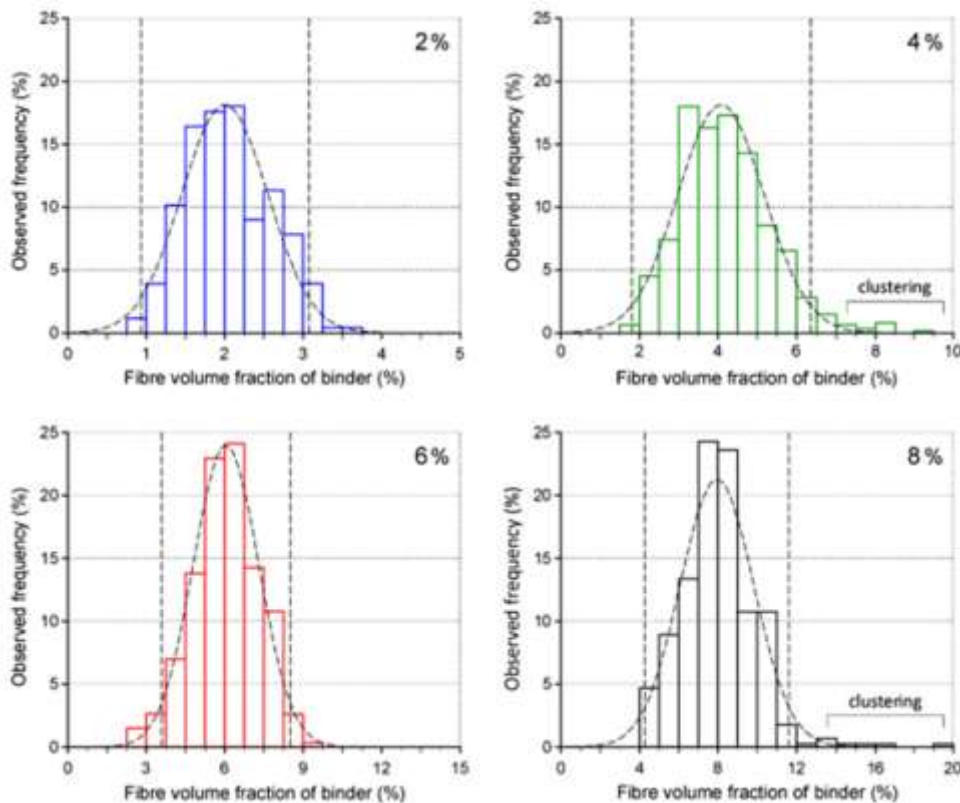


Figura 2-6 Distribución de virutas dentro de la microestructura de la mezcla asfáltica, en probetas con 4 contenidos distintos de fibra (Norambuena-Contreras et al., 2016)

La Figura 2-7(a) y la Figura 2-7(b) muestran las distribuciones espaciales de fibras de lana de acero al interior de secciones de probetas de dimensiones aproximadas 25 [mm] x 25 [mm] x 12 [mm] con 4 [%] y 8 [%] de fibras (Norambuena-Contreras et al., 2016), respectivamente. En estas figuras puede verse la presencia de racimos, que corresponde a las zonas más oscuras.

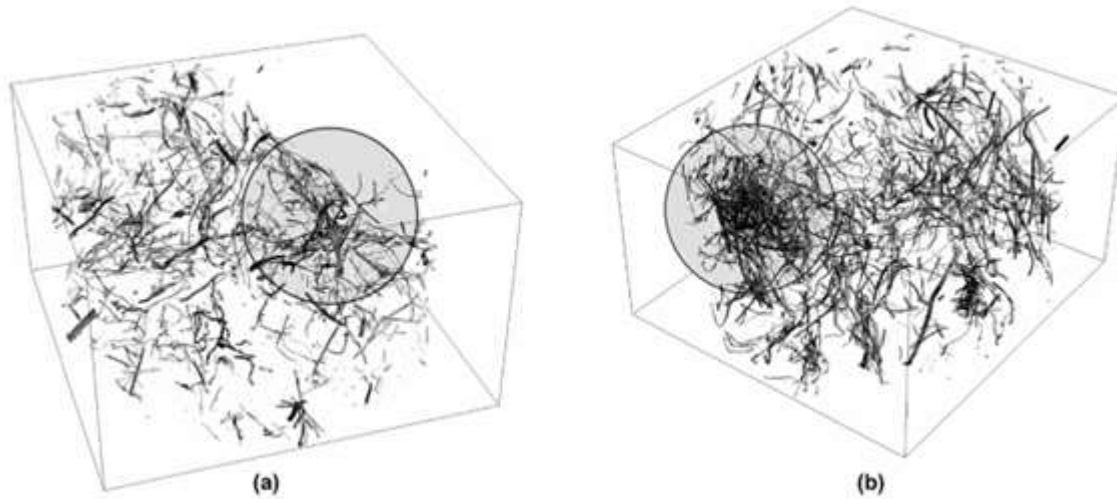


Figura 2-7 Modelos en 3D de las fibras de lana de acero al interior de secciones de probetas de mezcla asfáltica con (a) 4% de fibras y (b) 8% de fibras (Norambuena-Contreras et al., 2016)

2.2.4 Propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas con fibras

2.2.4.1 Efecto sobre el contenido de vacíos de aire y la densidad aparente

La relación entre el contenido de vacíos de aire y la densidad aparente de las mezclas asfálticas es lineal y proporcional; el contenido de vacíos de aire se determina como muestra la Ecuación 2-2.

$$CVA(\%) = \frac{\rho_{m\acute{a}x} - \rho_{aparente}}{\rho_{m\acute{a}x}} \cdot 100\% \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Donde $\rho_{aparente}$ es la densidad aparente y $\rho_{m\acute{a}x}$ es la densidad máxima teórica, determinada de acuerdo al aporte porcentual de masa de cada componente de la mezcla como se muestra en la Ecuación 2-3.

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{\sum((masa\ de\ componente)_i \cdot (volumen\ de\ componente)_i)}{Volumen\ total} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

De acuerdo con Norambuena-Contreras et al. (2016), el efecto de la adición de fibras a las mezclas asfálticas es una disminución de la densidad aparente, como se muestra en la Figura 2-8, debido a la formación de racimos de fibras, ver Figura 2-7, y al aumento de contenido de vacíos de aire.

Debido al aumento del contenido de vacíos de aire en mezclas con FLA, podría ser necesaria una mayor compactación de las mezclas con agregados metálicos, en comparación a mezclas sin estos elementos, ya que podrían generarse problemas de desempeño, disminuyendo la vida útil de la mezcla y aumentando su exposición a la infiltración de humedad.

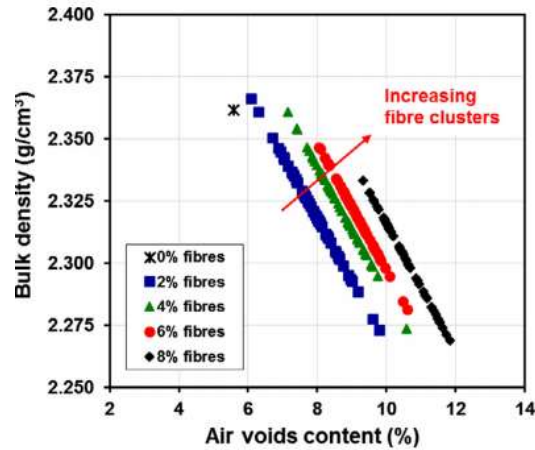


Figura 2-8 Efecto del contenido de fibras en la densidad media de probetas de cemento asfáltico de prueba (Norambuena-Contreras et al., 2016)

2.2.4.2 Módulo de rigidez y resistencia a tracción

El módulo de rigidez medido en mezclas asfálticas reforzadas con fibras de lana de acero se reduce con el aumento de la temperatura, como puede verse en la Figura 2-9(a). Esto ocurre debido a que el cemento asfáltico reduce su rigidez con el aumento de la temperatura debido a su comportamiento viscoelástico, que resulta en una pérdida de la viscosidad de la mezcla asfáltica (Norambuena-Contreras et al., 2016). Además, en general, el módulo de rigidez decrece con el aumento de contenido de fibras. Por otro lado, en la Figura 2-10 puede verse que la resistencia a tracción indirecta en mezclas porosas aumenta al aumentar el contenido de fibras de lana de acero hasta 8 [%]; pero, una cantidad mayor de fibras genera una disminución de la resistencia en mezclas porosas, debido a que genera una mala adhesión entre el cemento asfáltico y los áridos.

Debido a la disposición aleatoria de las grietas, y la consecuente deformación de las probetas, el ensayo para obtener la resistencia a tracción indirecta (ITS) resulta útil para comparar propiedades iniciales, y no para ver propiedades de reparación. Menozzi et al. (2015) evalúan la capacidad de autorreparación de mezclas con daño por fatiga mediante calentamiento por inducción, obteniendo bajos niveles de reparación, debido a que el calentamiento por inducción no repara las deformaciones permanentes, sino que solo cierra las grietas. Además, el módulo de rigidez disminuye ligeramente con el aumento del contenido de vacíos de aire, Figura 2-9(b), aunque aumenta con la reducción de la temperatura por el endurecimiento del cemento asfáltico (Norambuena-Contreras et al., 2016).

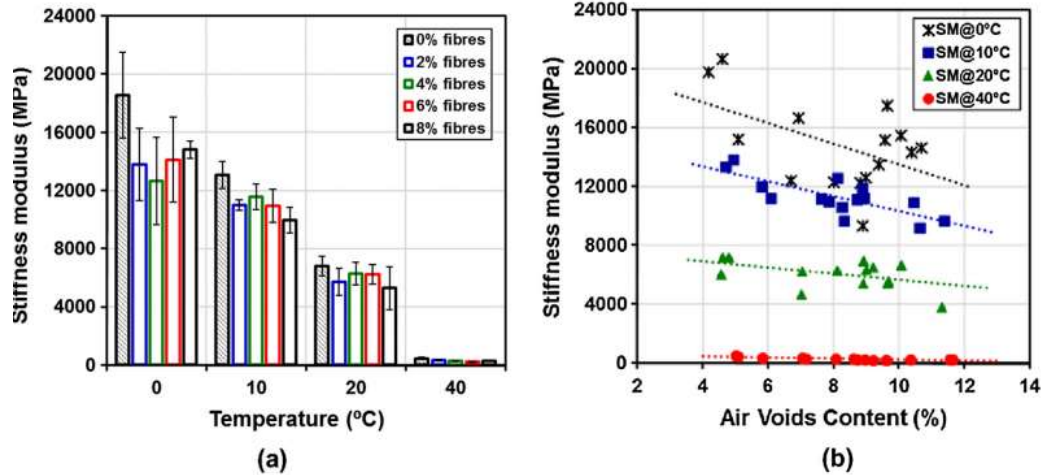


Figura 2-9 Módulos de rigidez de probetas versus (a) temperatura de prueba y (b) contenido de vacíos de aire (Norambuena-Contreras et al., 2016)

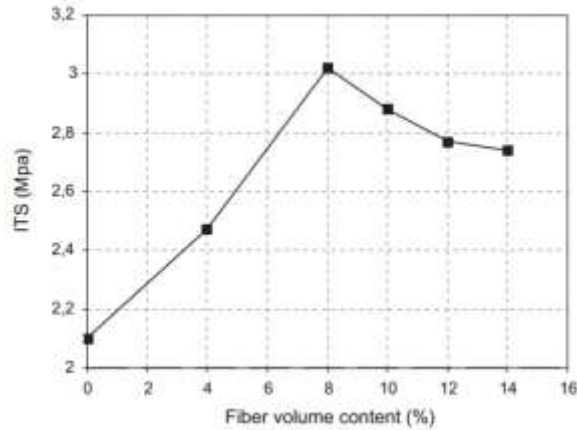


Figura 2-10 Resistencia a tracción indirecta (ITS) de cemento asfáltico poroso (Liu et al., 2011)

2.2.5 Calentamiento por inducción y por exposición a microondas

La reparación de fisuras de mezclas asfálticas usando calentamiento por inducción o calentamiento por radiación de microondas consiste en agregar fibras de lana de acero a la mezcla, que son conductores de electricidad y son magnéticamente susceptible a un campo eléctrico. Con la ayuda de una máquina de inducción o de una aparato de radiación electromagnética, como un horno microondas, es posible calentar la mezcla asfáltica con fibras, calentando el cemento asfáltico y reparando las grietas abiertas existentes en el pavimento (Norambuena-Contreras et al., 2016).

La adición de fibras de lana de acero permite mejorar la eficiencia energética y mejorar el aumento de la temperatura durante los periodos de descanso de la mezcla asfáltica y, dado que la viscosidad del cemento asfáltico depende de la temperatura, se mejora la capacidad de reparación de grietas.

La diferencia entre los procedimientos de calentamiento por inducción y calentamiento por radiación de microondas es la siguiente:

- En el calentamiento por inducción se expone la mezclas a un campo electromagnético alternante con frecuencias en el orden de kilohertz, mientras que en el calentamiento por radiación de microondas se expone la mezcla a un campo electromagnético alternante con frecuencias en el orden de MegaHertz (Norambuena-Contreras & García, 2016).
- El calentamiento por inducción solo aumenta la temperatura de las fibras de lana de acero (efecto Joule); a diferencia del calentamiento por radiación de microondas, que hace que la polaridad de las moléculas polares (como el agua, los metales, los asfáltenos y las resinas (Delgadillo S., 2014)) cambie su orientación como resultado del campo magnético alternante, resultado en una fricción interna y en un aumento de la temperatura del metal y del cemento asfáltico.
- El calentamiento por exposición a microondas también se logra sin fibras, pero si se agregan partículas ferrosas a la mezcla, estas partículas pueden reflejar las microondas y acelerar el aumento de temperatura (Norambuena-Contreras & García, 2016), disminuyendo el tiempo necesario para la reparación.
- Las ondas electromagnéticas de un horno microondas, solo calientan la zona superficial de los materiales, calentando aproximadamente los primeros 40 [mm] de este, la zona más interna de los materiales se calienta por convección (Gizmodo, 2017), por lo que el espesor del material expuesto tiene una gran importancia en el tiempo y la homogeneidad del calentamiento.

2.2.6 Geometría de probetas y método de carga para ciclos de autorreparación

Principalmente, se han utilizado dos configuraciones geométricas de probetas para medir el nivel de autorreparación de las mezclas asfálticas, como se muestra en la Figura 2-11 (García, 2012), (Norambuena-Contreras & Concha, 2016), (Liu et al., 2011), debido a que no existe un método estandarizado o normado para medir la capacidad de autorreparación. La Figura 2-11(a) corresponde a una probeta semicircular que es cargada en el centro (con tamaño máximo de áridos de 12,5 [mm]), y la Figura 2-11(b) corresponde a una viga de sección rectangular con carga central –García (2012) utilizó vigas de 125 [mm] x 25 [mm] x 15 [mm] (con tamaño máximo de áridos de 2 [mm])-. En todos los casos, a las probetas se les hizo una pequeña hendidura en la zona central, para

lograr una zona débil y asegurar que la grieta se genere en el mismo lugar tanto antes de ser reparada como luego de cada reparación.

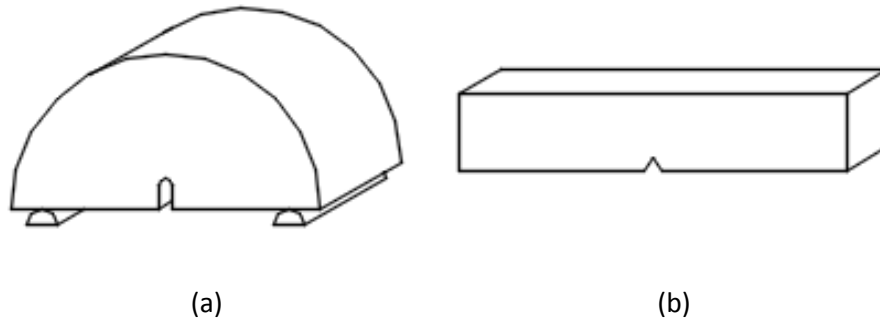


Figura 2-11 Tipos de geometrías utilizadas para ensayos a flexión para medir autorreparación

Las probetas semicirculares utilizadas por Norambuena-Contreras & Concha (2016) corresponden a un cuarto de una probeta Marshall y fueron compactadas en un molde Marshall, con 75 golpes por lado con un martillo Marshall; mientras que las probetas con forma de vigas utilizadas por García (2012) fueron compactadas manualmente. Esto puede implicar diferencias en los resultados, al confeccionar las mezclas con dos métodos diferentes y al utilizar diferentes granulometrías (debido al tamaño máximo límite).

2.2.7 Resultados del nivel de reparación de investigaciones previas

Además de las diferencias presentadas en la sección 2.2.5, donde se explica la diferencia entre los dos tipos de calentamiento, estos dos métodos presentan diferencias en sus resultados, obteniéndose mejores resultados y en un menor tiempo con el calentamiento por exposición a microondas. A continuación se presentan algunas de estas diferencias; y luego, algunos resultados obtenidos por investigaciones previas, que sirven como base para el estudio realizado.

La Figura 2-12 muestra la temperatura promedio alcanzada por la superficie de las probetas después de diferentes periodos de exposición a calentamiento (a) por radiación de microondas y (b) por inducción. En esta figura puede observarse que la temperatura de la superficie de mezclas con fibras aumenta con el tiempo que la probeta se encuentra expuesta, siendo mayores estos aumentos al tener mayor cantidad de fibras. Las probetas sin fibras solo aumentan la temperatura al ser calentadas por exposición a microondas, manteniendo constante la temperatura al ser expuestas a calentamiento por inducción (Norambuena-Contreras & García, 2016). Además, la temperatura superficial de las mezclas asfálticas obtenidas en la práctica puede ser poco homogénea debido a la distribución no homogénea de las fibras (Norambuena-Contreras & García, 2016).

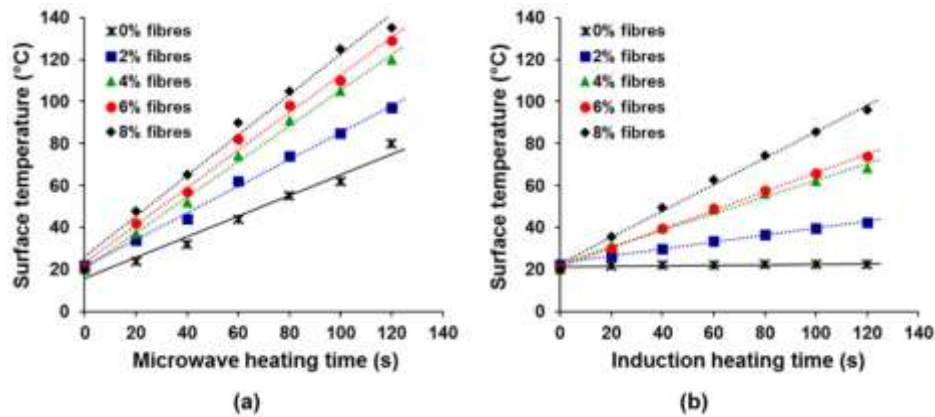


Figura 2-12 Efecto del tiempo de calentamiento en la temperatura superficial de las probetas debido a (a) calentamiento por microondas y (b) calentamiento por inducción (Norambuena-Contreras & García, 2016)

La Figura 2-13 muestra las temperaturas estimadas de la mezcla cemento asfáltico-fibras de lana de acero de los diferentes tipos de mezclas, mediante calentamiento por exposición a microondas y calentamiento por inducción. En esta figura puede verse que el mayor aumento de temperatura ocurre luego de los primeros 20 segundos de calentamiento para todas las mezclas analizadas, tanto para el calentamiento por exposición a microondas como para el calentamiento por inducción (Norambuena-Contreras & García, 2016). Además, como la temperatura del cemento asfáltico bajo calentamiento por radiación de microondas puede ser mayor a la del punto de inflamación del cemento asfáltico, este puede dañar la estructura química del cemento asfáltico; por esto, Norambuena-Contreras & García (2016) recomiendan que el calentamiento sea realizado por periodos inferiores a 40 segundos y, junto a esto, Riffo (2016) y Norambuena-Contreras & González-Torres (2017) indican un periodo de 40 segundos como el tiempo óptimo de calentamiento por exposición a microondas.

De acuerdo a Gómez-Meijide et al. (2018), el calentamiento permite cerrar las grietas de las mezclas asfálticas, pero no reduce el nivel de envejecimiento presente en estas (envejecimiento previo a la reparación y debido a la utilización de RAP). Además, las mezclas pueden rigidizarse debido a alcanzar altas temperaturas durante los procesos de reparación. Para mantener las propiedades reológicas al realizar reparaciones por calentamiento, Gómez-Meijide et al. (2018) proponen agregar cápsulas con agentes rejuvenecedores a las mezclas (García et al., 2009), (García et al., 2011)), que se puede liberar progresivamente a lo largo de la vida útil de la mezcla asfáltica.

La Figura 2-14 muestra resultados promedios para 10 ciclos de reparación; donde la Figura 2-14(a) muestra los resultados obtenidos con calentamiento por radiación de microondas, donde las

probetas fueron expuestas durante 40 segundos, mientras que la Figura 2-14(b) muestra los resultados obtenidos con calentamiento por inducción, donde las probetas fueron expuestas tiempos equivalentes para lograr temperaturas similares a las que se lograron con microondas.

El valor del nivel de reparación, $NR_{i,j}$, de un ciclo i de la probeta j se mide como la razón entre la resistencia a flexión a tres puntos después de la reparación i , $R_{i,j}$, y la resistencia inicial de la misma probeta, $R_{0,j}$, como muestra la Ecuación 2-4.

$$NR_{i,j} = \frac{R_{i,j}}{R_{0,j}} \tag{Ecuación 2-4}$$

En general, puede verse que el nivel de reparación disminuye al aumentar el contenido de fibras. Además, puede notarse que el nivel de reparación es mayor en mezclas que se exponen a microondas que las expuestas a calentamiento por inducción y que el nivel de reparación de las mezclas asfálticas se reduce con cada ciclo de reparación, independiente de la técnica usada (Norambuena-Contreras & Concha, 2016). Esta investigación no muestra resultados de mezclas sin agregados metálicos, ya que tenía por objetivos cuantificar la influencia del calentamiento por inducción y por radiación de microondas y comparar estas dos técnicas y, dado que el calentamiento por radiación requiere de un agregado metálico para aumentar su temperatura, se comparan los resultados solo de mezclas con fibras de lana de acero.¹

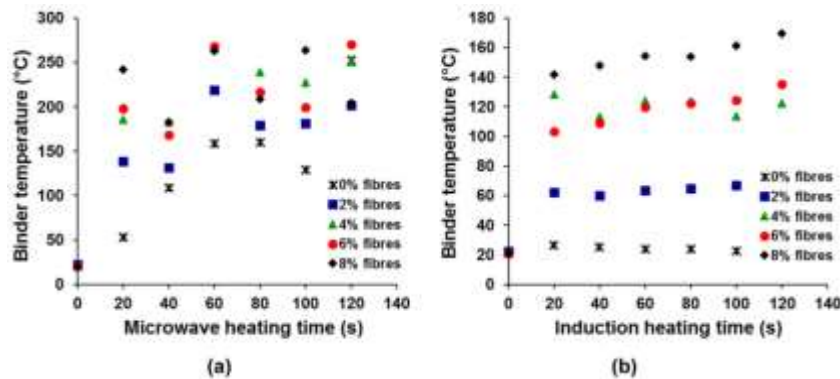


Figura 2-13 Efecto del tiempo de calentamiento en la temperatura de la mezcla cemento asfáltico-fibras de lana de acero debido a (a) calentamiento por microonda y (b) calentamiento por inducción (Norambuena-Contreras & García, 2016)

¹ La investigación realizada y presentada en este documento sí presenta una comparación respecto a mezclas sin agregados metálicos.

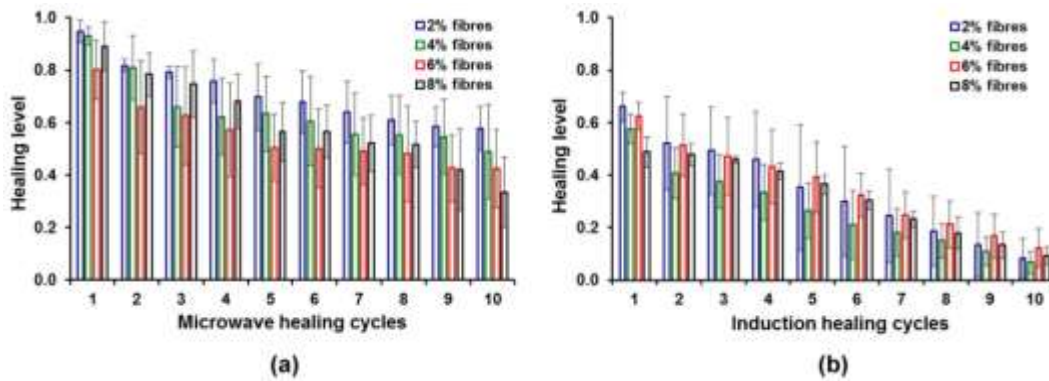


Figura 2-14 Niveles de reparación versus repetidos ciclos para probetas con varios porcentajes de fibras bajo (a) calentamiento por microonda y (b) calentamiento por inducción (Norambuena-Contreras & García, 2016)

Norambuena-Contreras y Concha (2016) recomiendan agregar un 2 [%] de fibras de lana de acero sobre volumen de cemento asfáltico para desarrollar un pavimento asfáltico con propiedades de autorreparación mediante calentamiento por exposición a microondas, logrando una resistencia mecánica ligeramente superior que en mezclas sin fibras, disminuyendo de aproximadamente 10% a 8% la pérdida de partículas.

La Figura 2-15 muestra los resultados promedios de los niveles de reparación de probetas con 4 [%] de fibras, durante 5 ciclos de reparación. Puede verse que la exposición durante 40 y 100 segundos producen los mayores niveles de reparación en las mezclas expuestas a microondas. En la Tabla 2-2, se muestra la temperatura del cemento asfáltico versus el nivel de reparación después del primer ciclo.

El máximo nivel de reparación se obtuvo en mezclas expuestas durante 40 segundos a microondas, que corresponde a la mezcla que logra menores temperaturas, como se muestra en la Tabla 2-2. Al aumentar el tiempo de exposición a microondas, las temperaturas alcanzadas por las mezclas aumentan, siendo cercanas o mayores a la temperatura de inflamación, disminuyendo el nivel de reparación alcanzado como se observa en las mezclas expuestas 60 y 80 segundos. Por otro lado, al aumentar aún más el nivel de exposición a microondas, como el caso de 100 segundos, esta exposición más prolongada puede generar flujo de cemento asfáltico (y posiblemente de áridos) al interior de la hendidura, aumentando la sección de falla de las probetas y, con esto, su resistencia posterior a la reparación.

Tabla 2-2 Temperatura y nivel de reparación del cemento asfáltico luego del primer ciclo de reparación en probetas con 4% de fibras (Norambuena-Contreras & García, 2016)

| Calentamiento por microondas | | | | |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Tiempo [s] | 40 | 60 | 80 | 100 |
| Nivel de reparación | 0.93 | 0.58 | 0.56 | 0.75 |
| Temperatura [°C] | 183.01 | 266.15 | 239.48 | 227.27 |
| Calentamiento por inducción | | | | |
| Tiempo [s] | 40 | 60 | 80 | 100 |
| Nivel de reparación | 0.58 | 0.58 | 0.72 | 0.63 |
| Temperatura [°C] | 113.21 | 124.17 | 123.7 | 113.72 |

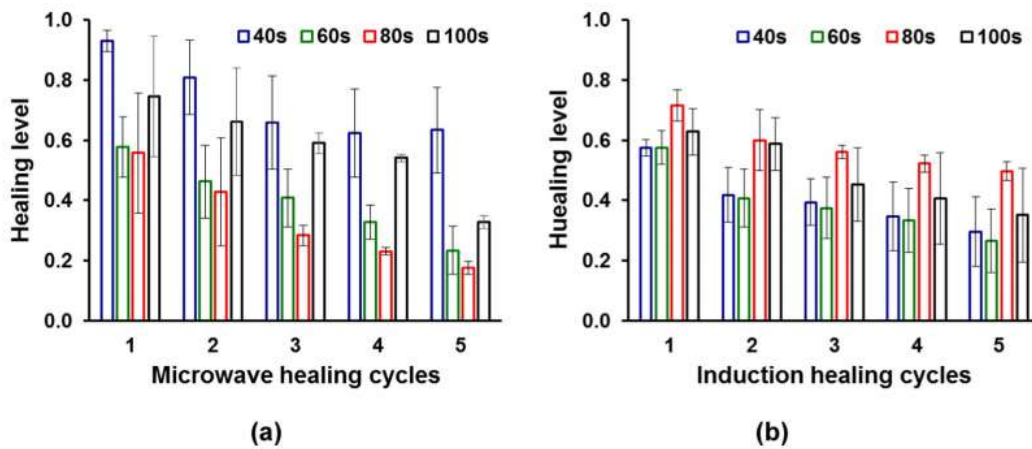


Figura 2-15 Niveles de reparación versus ciclos de reparación repetidos para probetas con 4% de fibras, después de varios periodos de calentamiento bajo (a) calentamiento por microonda y (b) calentamiento por inducción (Norambuena-Contreras & García, 2016)

Para el calentamiento por exposición a microondas, los mayores niveles de reparación expresados como recuperación de la resistencia a flexión, se tienen en probetas con menores temperaturas en el cemento asfáltico, mientras que las probetas con mayores temperaturas tienen las menores reparaciones. En todas las pruebas de reparación usando microondas, los materiales producen humo negro muy denso, lo que indica daño y degradación en el cemento asfáltico; Menozzi et al. (2015) señalan que un exceso de la temperatura durante el calentamiento degrada al cemento asfáltico al evaluar la capacidad de autorreparación de mezclas con daño por fatiga mediante calentamiento por inducción, pudiendo llegar a afectar la capacidad de reparación. El aumento de temperatura logrado por el uso de fibras genera una mejor reparación, mientras las temperaturas se mantengan controladas, si las temperaturas aumentan a un valor cercano a 240 [°C] los niveles de reparación resultan menores (Norambuena-Contreras & García, 2016).

2.2.7.1 Mezclas autorreparables en terreno

Esta tecnología se ha puesto a prueba en un tramo de 400 metros de una carretera de Holanda, considerando calentamiento por inducción. Para evaluar la autorreparación con fibras, Schlangen se encuentra desarrollando una máquina de inducción más grande para acelerar el proceso, de tamaño suficiente para abarcar una vía por viaje (D'Angelo, 2018).

A la fecha aún no se tienen resultados publicados de este tramo de prueba.

3 MATERIALES, CONFECCIÓN DE MUESTRAS Y METODOLOGÍA

La primera parte de esta sección presenta los diferentes materiales utilizados en la confección de las probetas, junto con la descripción correspondiente de estos; la segunda parte, describe el proceso utilizado para la confección de las probetas y la preparación de estas para la realización de los ciclos de flexión-reparación; y la tercera parte del capítulo, describe los diferentes ensayos realizados a las mezclas asfálticas con el fin de evaluar las características físicas de las mezclas, los módulos de rigidez a tracción indirecta y sus propiedades de autorreparación.

3.1 Materiales

Los materiales utilizados en la confección de las probetas son: áridos vírgenes, cemento asfáltico virgen, RAP, y agregados metálicos: fibras de lana de acero y virutas metálicas. Todos los datos que caracterizan a los áridos vírgenes, al RAP y al cemento asfáltico fueron entregados por Asfalcura, empresa que aportó estos materiales. Los datos que caracterizan a los agregados metálicos fueron entregados por José Norambuena-Contreras, quien aportó estos materiales.

3.1.1 Áridos vírgenes

Para la confección de las probetas se utilizaron tres tipos de áridos vírgenes, que pueden verse en la Figura 3-1; en el Anexo A se encuentran los datos que caracterizan a los áridos utilizados, proporcionados de acuerdo a lo requerido por el Manual de Carreteras (MOP, 2016a). Las granulometrías de estos áridos se presentan en la Tabla 3-1. El origen de estos áridos es el Río Maipo.

3.1.2 RAP: *Reclaimed Asphalt Pavement*

Dos tipos de RAP fueron utilizados para la preparación de las mezclas asfálticas, separados por su tamaño máximo, como puede verse en la Figura 3-2. La información de estos se presenta en el Anexo A. La granulometría y el contenido de cemento asfáltico se muestran en la Tabla 3-1. La procedencia de este RAP es desconocida (fue obtenido de distintas obras). Las mezclas asfálticas a confeccionar consideran 4 porcentajes de RAP, siendo: 0 [%], 10 [%], 20 [%] y 30 [%] (las mezclas con 30 [%] de RAP se estudian solo para analizar la variación de la información obtenida; ya que solo puede usarse más de 20 [%] de RAP en mezclas si la procedencia del RAP es única, de acuerdo a la sección 2.1.1, lo que en este caso no se cumple).

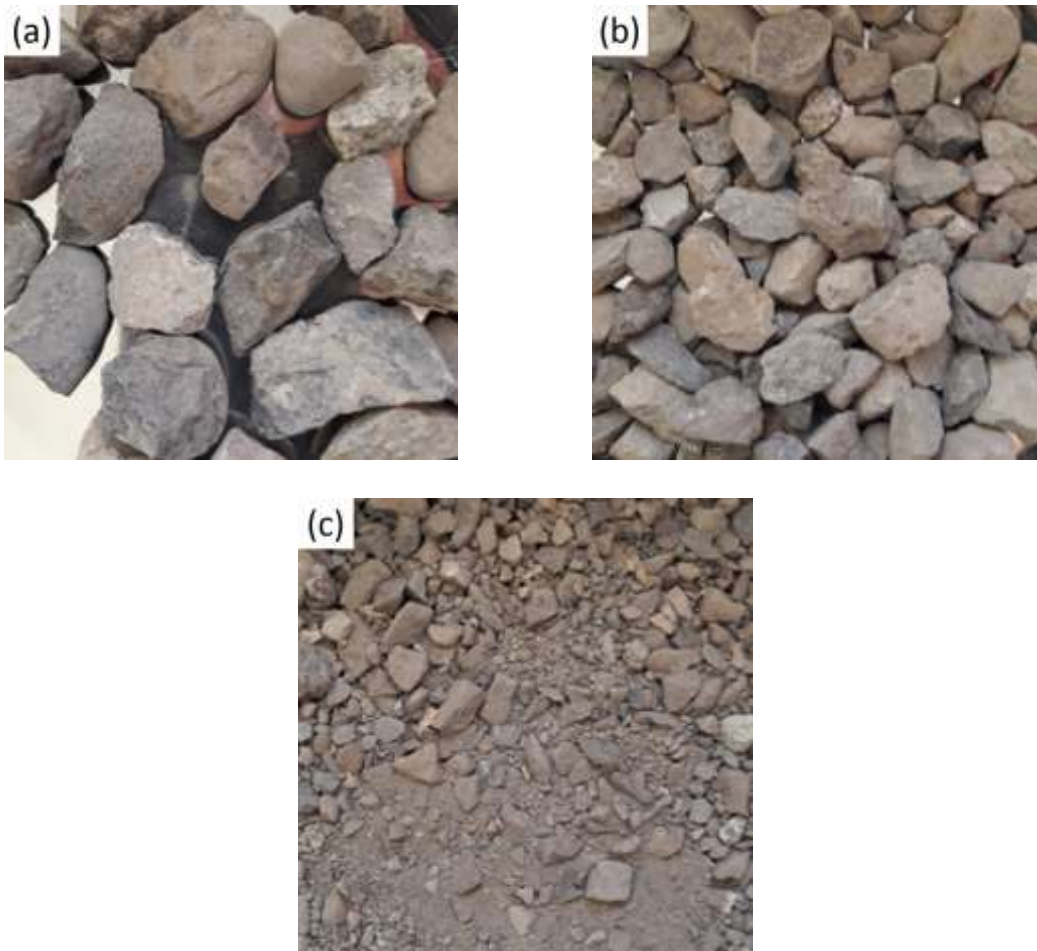


Figura 3-1 Áridos vírgenes utilizados en las mezclas: (a) grava 3/4", (b) grava 1/2" y (c) polvo roca

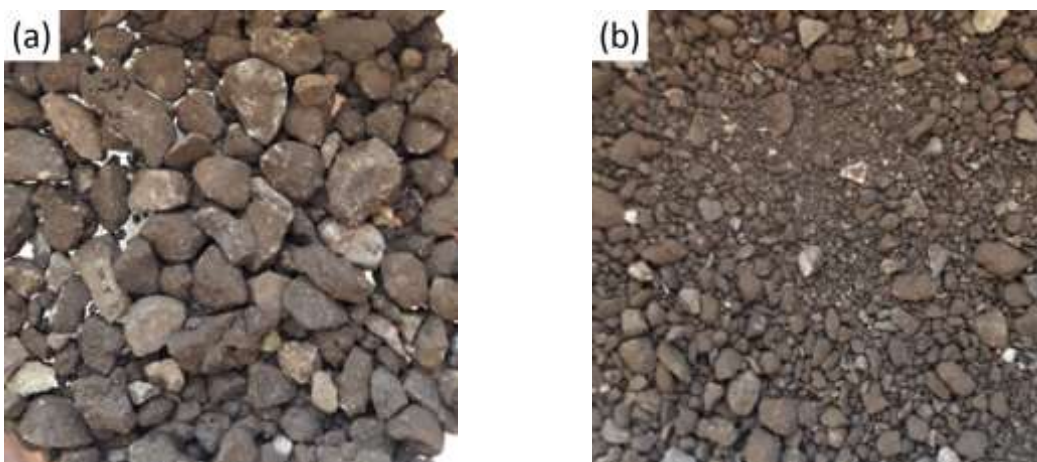


Figura 3-2 Áridos de RAP: (a) RAP 3/4" y (b) RAP 3/8"

Tabla 3-1 Granulometría de áridos vírgenes y de RAP

| Tamiz | | Áridos vírgenes | | | RAP | |
|------------------|--------|-----------------|------|---------|------|------|
| mm | ISTM | 3/4" | 1/2" | P. roca | 3/4" | 3/8" |
| 25 | 1" | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 20 | 3/4" | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | 1/2" | 36 | 100 | 100 | 89 | 100 |
| 10 | 3/8" | 1 | 77 | 100 | 69 | 100 |
| 5 | N° 4 | 1 | 5 | 90 | 27 | 91 |
| 2.5 | N° 8 | 0 | 1 | 60 | 18 | 68 |
| 0.63 | N° 30 | 0 | 0 | 30 | 12 | 32 |
| 0.315 | N° 50 | 0 | 0 | 22 | 9 | 23 |
| 0.16 | N° 100 | 0 | 0 | 16 | 7 | 17 |
| 0.08 | N° 200 | 0 | 0 | 11 | 5.3 | 13.4 |
| % de C.A. en RAP | | - | - | - | 3.75 | 7.06 |

3.1.3 Cemento asfáltico

Para la confección de las mezclas asfálticas se utilizó un cemento asfáltico CA-24, la caracterización de este puede verse en el Anexo B, de acuerdo a lo requerido por el manual de carreteras (MOP, 2016b). Para cada probeta Marshall se consideró un contenido de cemento asfáltico de 5.2 [%], correspondiente a 57.2 [gr] por probeta. Esta cantidad de cemento asfáltico corresponde al total utilizado para cada probeta, considerando tanto el cemento asfáltico virgen como al cemento asfáltico aportado por el RAP. Las cantidades de cemento asfáltico virgen y cemento asfáltico aportado por el RAP para cada tipo de mezcla se presentan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Procedencia de cemento asfáltico según porcentaje de RAP en la mezcla

| Procedencia del CA | Contenido de RAP [%] | | | |
|--------------------|----------------------|------|------|------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 |
| RAP [gr] | 0.0 | 6.3 | 12.6 | 18.9 |
| C.A. virgen [gr] | 57.2 | 50.9 | 44.6 | 38.3 |

3.1.4 Agregados metálicos

Dos tipos de agregados metálicos fueron utilizados en las mezclas: fibras de lana de acero (Figura 3-3(a)) y virutas metálicas (Figura 3-3(b)). Las características físicas de estos agregados se presentan en la Tabla 3-3 (las características presentadas de las FLA son las mismas que en las investigaciones de Norambuena-Contreras et al. (2016), Norambuena-Contreras y Concha (2016) y Norambuena-

Contreras y García (2016), debido a que fueron obtenidas por José Norambuena-Contreras y aportadas por él a la investigación).

Tabla 3-3 Características físicas de los agregados metálicos

| | Fibras de lana de acero | Virutas metálicas |
|------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Composición | Acero bajo en carbono | Acero inoxidable ferrítico |
| Densidad [gr/cm ³] | 7.180 | 7.980 |
| Diámetro medio [mm] | 0.133 | - |
| Ancho medio [mm] | - | 1.310 |
| Rango de longitudes iniciales [mm] | 2-14 | 3-21 |
| Relación de aspecto | 44 | - |

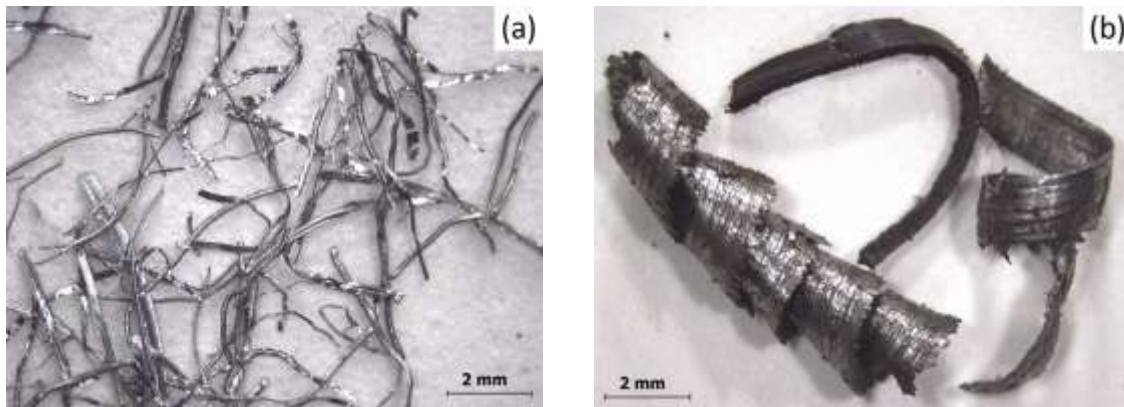


Figura 3-3 Imágenes ópticas de (a) fibras de lana de acero y (b) virutas metálicas

Las mezclas asfálticas confeccionadas cuentan con 0, 1, 2, 4 y 6 [%] de fibras o virutas (este último valor presente solo en mezclas sin RAP), porcentajes en volumen respecto al volumen de cemento asfáltico. La Tabla 3-4 presenta las diferentes cantidades en peso de fibras de lana de acero y virutas metálicas utilizadas según el porcentaje de agregado metálico en las mezclas. Estos valores de contenidos de agregados metálicos son considerados debido a que el valor óptimo de fibras de lana de acero es 2 [%], como puede verse en la sección 2.2.7 y para considerar mezclas sin agregados metálicos y valores inferiores y superiores al óptimo de mezclas sin RAP, ya que el valor óptimo puede variar al variar las características de las mezclas (contenido de RAP y otro tipo de agregado metálico).

Tabla 3-4 Porcentajes, volúmenes y masas de agregados metálicos utilizados.

| Porcentaje de agregados metálicos en volumen en relación al asfalto | Volumen de agregados metálicos [cm ³] | Masa [gr] | |
|---|---|-------------------------|-----------------|
| | | Fibras de lana de acero | Viruta metálica |
| 1 | 0.6 | 4.0 | 4.4 |
| 2 | 1.1 | 7.9 | 8.8 |
| 4 | 2.2 | 15.8 | 17.6 |
| 6 | 3.3 | 23.7 | 26.4 |

3.2 Confección de muestras

Las probetas fueron confeccionadas con las granulometrías mostradas en la Tabla 3-6 contenidas en la banda granulométrica IV-A-12 (MOP, 2016a), como puede verse en la Figura 3-4. Los áridos fueron combinados de manera que las mezclas entre áridos vírgenes y áridos de RAP son iguales independiente del contenido de RAP de las probetas, pero debido a que las granulometrías de áridos vírgenes y de RAP no son iguales, las mezclas finales presentan leves diferencias entre sí. En total se confeccionaron sesenta probetas Marshall; teniéndose dos probetas Marshall por cada tipo de mezcla, con treinta tipos de mezclas diferentes debido a las combinaciones posibles de los niveles considerados para cada factor, como lo muestra la Tabla 3-5.

Tabla 3-5 Factores y niveles a evaluar

| Contenidos de RAP [%] | Tipo de agregado metálico | Contenido de agregado metálico [%] |
|-----------------------|---------------------------|------------------------------------|
| 0 | Fibras de lana de acero | 0, 1, 2, 4 y 6 |
| | Virutas metálicas | |
| 10, 20 y 30 | Fibras de lana de acero | 0, 1, 2 y 4 |
| | Virutas metálicas | |

Tabla 3-6 Granulometría a utilizar por tipo de mezcla, de acuerdo al porcentaje de RAP considerado

| Tamiz | | Granulometrías por contenido de RAP en mezcla | | | |
|-------|------|---|--------|--------|--------|
| mm | ISTM | 0 [%] | 10 [%] | 20 [%] | 30 [%] |
| 25 | 1" | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 20 | 3/4" | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | 1/2" | 87 | 88 | 89 | 90 |
| 10 | 3/8" | 76 | 77 | 78 | 79 |
| 5 | 4 | 55 | 56 | 57 | 58 |
| 2.5 | 8 | 36 | 37 | 39 | 40 |
| 0.63 | 30 | 18 | 19 | 19 | 20 |
| 0.315 | 50 | 13 | 14 | 14 | 14 |
| 0.16 | 100 | 10 | 10 | 10 | 11 |
| 0.08 | 200 | 7 | 7 | 7 | 8 |

3.2.1 Mezclado y compactación

El mezclado es realizado de forma manual, manteniendo la temperatura de la mezcla entre 148 y 158 [°C], de acuerdo a la caracterización del cemento asfáltico presentada en el Anexo B; este fue

realizado en el siguiente orden: en el caso de las probetas con virutas metálicas, en un recipiente que contiene la cantidad necesaria de cemento asfáltico virgen se agregan las virutas metálicas y se revuelve; luego se agregan los áridos, de los más gruesos a los más finos procurando que estos queden completamente cubiertos de cemento asfáltico antes de agregar los siguientes áridos; en el caso de las probetas con fibras de lana de acero, se sigue el mismo procedimiento pero agregando solo una porción de las fibras al comienzo (aproximadamente el equivalente a 1 [%]) y el resto entre áridos separado en porciones de aproximadamente 1 [%], esto debido a la tendencia que presentan las fibras a agruparse y generar racimos y una mala distribución de estas al interior de la mezcla, en el caso que se incorporen todas juntas². En los casos de las probetas con RAP, estos áridos fueron agregados simultáneamente con los áridos vírgenes, sin alterar el orden de mezclado. Las probetas fueron compactadas a temperaturas entre 135 y 150 [°C], de acuerdo a la caracterización del cemento asfáltico presentada en el Anexo B, utilizando el martillo Marshall, dando 75 golpes por cada lado a la probeta, obteniéndose probetas cilíndricas Marshall de dimensiones aproximadas de 60 [mm] de alto y 100 [mm] de diámetro, de acuerdo a lo indicado por (MOP, 2016c).

3.2.2 Geometría de probetas para ciclos de autorreparación

La geometría de las probetas utilizadas para los ciclos de autorreparación es similar a la utilizada por Norambuena-Contreras y Concha (2016), que puede verse en la sección 2.2.6.

Para la realización de los ciclos de autorreparación, las probetas Marshall son cortadas en cuartos, como muestra la Figura 3-5, primero se realiza un corte a lo largo de un diámetro, para obtener probetas semicilíndricas y luego un corte a la mitad de la altura, para tener probetas de menor espesor. Las dimensiones mostradas en la figura son aproximadas, de acuerdo a las dimensiones originales de las probetas; con esto, las probetas obtenidas para los ciclos de flexión-reparación son semicirculares de radio 50 [mm] y largo 30 [mm], aproximadamente. Además, a cada cuarto se le hizo una hendidura en el centro de la cara plana de aproximadamente 10 [mm] de alto y 3 [mm] de ancho.

² Desde el punto de vista de la confección de las probetas, resulta más fácil revolver las mezclas con virutas metálicas que las mezclas con fibras de lana de acero, debido a que las virutas no se aglomeran. Si se considera la confección de mezclas a mayor escala, esto facilita la producción de mezclas asfálticas con agregados metálicos.

Granulometrías por contenido de RAP en mezclas

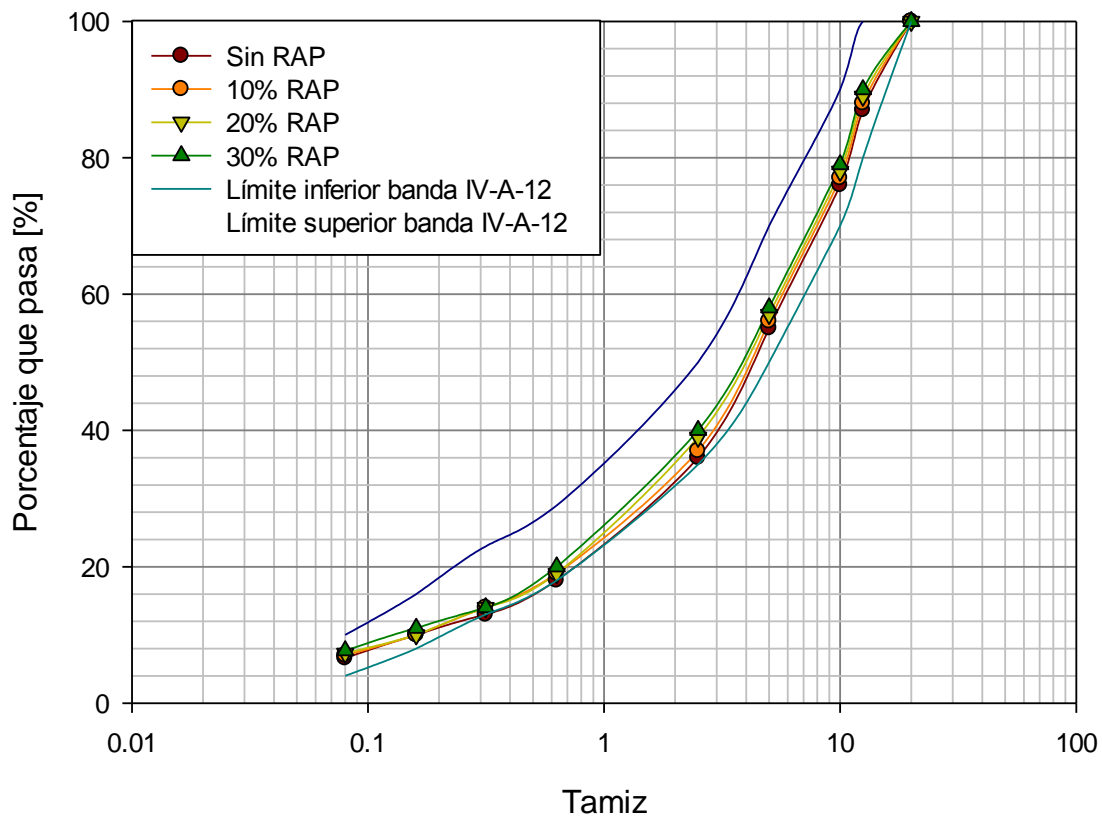


Figura 3-4 Granulometrías utilizadas en la confección de probetas



Figura 3-5 Probetas cortadas en cuartos y con hendidura para ciclos de flexión-reparación

3.3 Metodología

En esta sección se detallan los pasos seguidos y las fórmulas utilizadas dentro de las diferentes evaluaciones realizadas: densidad aparente y contenido de vacíos de aire, módulo de rigidez a tracción indirecta, y evaluación de la autorreparación de mezclas asfálticas.

3.3.1 Densidad aparente y contenido de vacíos de aire

Con el objetivo de evaluar los efectos de la adición de los diferentes elementos agregados (RAP y agregados metálicos) en las propiedades físicas de las mezclas asfálticas, se midió la densidad aparente de seis cuartos de probeta Marshall por cada tipo de mezcla realizada.

El contenido de vacíos de aire se determina como muestra la Ecuación 3-1.

$$CVA(\%) = \frac{\rho_{m\acute{a}x} - \rho_{aparente}}{\rho_{m\acute{a}x}} \cdot 100\% \quad \text{Ecuación 3-1}$$

Donde $\rho_{aparente}$ es la densidad aparente y $\rho_{m\acute{a}x}$ es la densidad máxima teórica, determinada de acuerdo al aporte porcentual de masa de cada componente de la mezcla como se muestra en la Ecuación 3-2.

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{\sum((masa\ de\ componente)_i \cdot (volumen\ de\ componente)_i)}{Volumen\ total^2} \quad \text{Ecuación 3-2}$$

Donde los componentes son: tres tipos de áridos vírgenes, dos tipos de RAP (en las mezclas con RAP), cemento asfáltico virgen y el agregado metálico (fibras de lana de acero o virutas metálicas en las mezclas que las contienen).

3.3.2 Módulo de rigidez a tracción indirecta (*ITSM*)

La rigidez de las mezclas asfálticas fue medida con la prueba de módulo de rigidez a tracción indirecta (*Indirect Tensile Stiffness Modulus - ITSM*) para ver la influencia del tipo de agregado metálico y el contenido de RAP sobre el comportamiento mecánico de las mezclas. Esta fue medida de acuerdo a la norma European Standard UNE-EN 12697-26:2006 Anexo C (CSN, 2012). En la prueba, una carga cíclica vertical es diametralmente aplicada a la probeta Marshall hasta alcanzar deformaciones horizontales de $50\ \mu\epsilon$, medidas utilizando dos transductores. Diez pulsos de carga son aplicados verticalmente en dos diámetros ortogonales; la carga corresponde a un pulso haversiano con periodos de descanso entre cargas, donde el periodo de cada carga es de 3,0 [s] con

periodos de descanso, la Figura 3-6 muestra esquemáticamente la forma del pulso de carga. El valor de la rigidez es calculado aplicando la Ecuación 3-3.

$$SM = \frac{P \cdot (\nu + 0.27)}{(d \cdot t)} \quad \text{Ecuación 3-3}$$

Donde SM es el módulo de rigidez medido en [MPa], P es la máxima carga vertical aplicada diametralmente en [N], ν es el coeficiente de Poisson (valor adoptado de 0.35), d es la deformación horizontal máxima en [mm] y t es el espesor de la probeta en [mm]. Este ensayo se realizó en probetas con 2 [%] de agregados metálicos (todos los niveles de RAP) y también en las probetas sin agregados metálicos y sin RAP. Las mediciones de módulo de rigidez se realizaron a temperaturas de 10, 20, 30 y 40 [°C]. En total se ensayaron nueve tipos de mezclas asfálticas, equivalente a dieciocho probetas. Estas mediciones fueron realizadas a las probetas antes de ser cortadas para los ensayos de autorreparación.

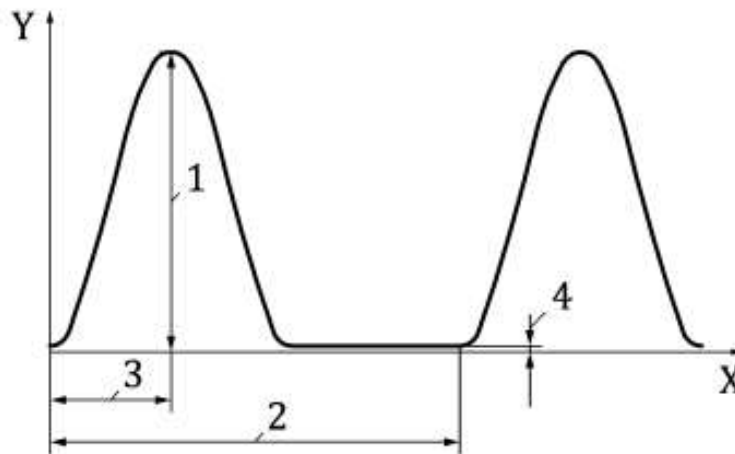


Figura 3-6 Forma esquemática del pulso de carga (CSN, 2012)

Donde:

- X: coordenada correspondiente a tiempo;
- Y: coordenada correspondiente a fuerza;
- 1: carga máxima;
- 2: periodo del pulso, correspondiente a 3.0 [s];
- 3: tiempo de carga, correspondiente a 125 [ms]; y
- 4: carga mínima.

3.3.3 Ciclos flexión-reparación y medición de la autorreparación

Cada ciclo efectuado para medir el nivel de autorreparación consta de los siguientes pasos, que se muestran en la Figura 3-7:

- Reparación de la probeta por exposición a microondas,
- Descanso para alcanzar temperatura ambiente³,
- Congelamiento de la probeta a -20 [°C],
- Corte de cinta en hendidura y ensayo a flexión de la probeta hasta la rotura, y
- Descanso para alcanzar temperatura ambiente y colocación de cinta en probetas.

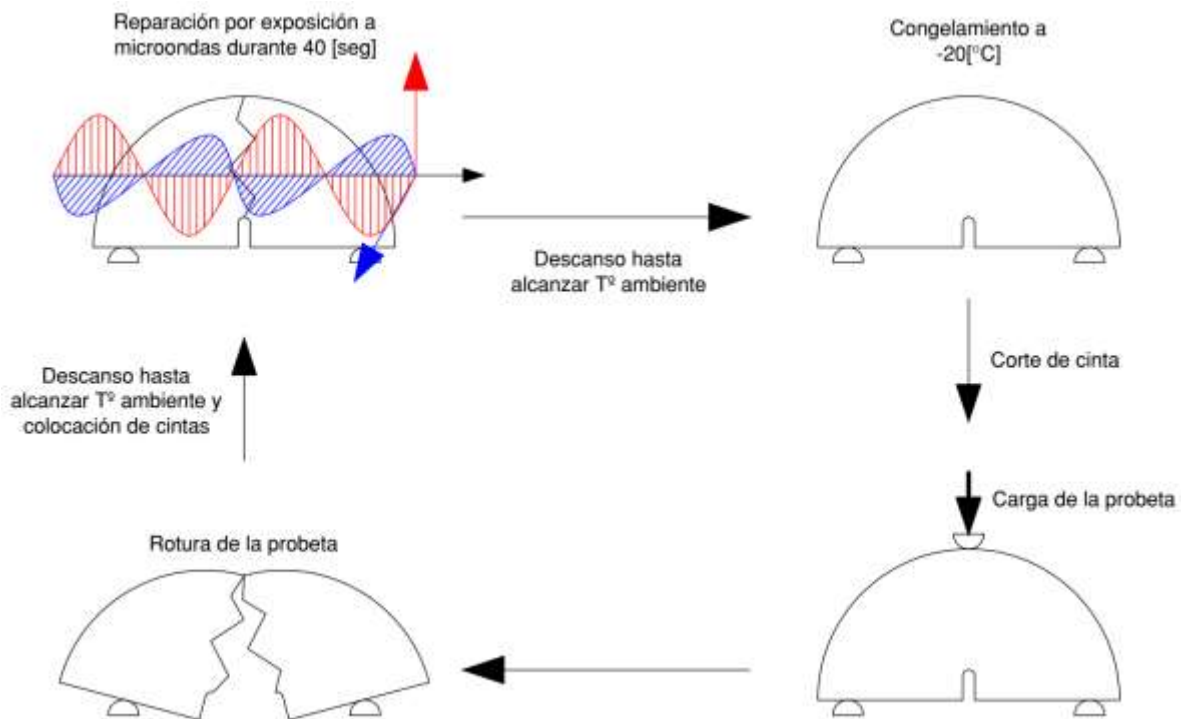


Figura 3-7 Etapas de ciclos flexión-reparación

Previo a la realización del primer ciclo de reparación y medición, se mide la resistencia inicial de las probetas, para lo que se deben realizar los siguientes pasos:

- Colocación de cinta inicial a probetas, que se corta en la zona de la hendidura antes de realizar el ensayo a flexión (esta primera cinta se usa solo para evitar la completa separación de los dos trozos de la probeta y el posible daño por golpes),

³ Esta temperatura sirve como temperatura intermedia entre reparaciones por exposición a microondas y ensayos a flexión a -20 [°C] por lo que no debería influir en los ensayos realizados.

- Congelamiento de las probetas a -20 [°C], y
- Ensayo a flexión de probetas hasta la rotura; el valor obtenido en esta primera medición corresponde al valor de referencia R_0 .

Para la correcta realización de la reparación, las probetas deben encontrarse a temperatura ambiente y secas, por lo que se dejan descansar en un ambiente ventilado durante aproximadamente 24 horas entre los ensayos de flexión y el calentamiento; durante este periodo las probetas deben ser afirmadas con una cinta con el propósito de asegurar el contacto entre las dos partes de las probetas, como muestra la Figura 3-8.

El proceso de reparación de las probetas de mezclas asfálticas consiste en la exposición de las probetas a 40 segundos de radiación de microondas en un horno microondas, periodo que corresponde al óptimo para mezclas con fibra de lana de acero y sin RAP, como se indica en la sección 2.2.7; el horno microondas cuenta con potencia de 700 [W] y frecuencia de trabajo de 2.45 [GHz], que corresponde a una longitud de onda aproximada de 120 [mm].

Posterior a cada calentamiento, las probetas deben volver a temperatura ambiente – correspondiente a la temperatura al interior del laboratorio, la cual no es controlada- antes ser enfriadas.



Figura 3-8 Detalles de cinta para afirmar probetas durante exposición a microondas

Luego, las probetas son enfriadas hasta una temperatura aproximada de -20 [°C] durante 20 horas. Se utiliza esta temperatura por tres razones: con una temperatura baja se tiene una falla frágil de la probeta al realizar el ensayo a flexión; se busca simular condiciones de bajas temperaturas en

terreno; y para mantener las condiciones de los ensayos realizados por Norambuena-Contreras y García (2016).

Para el ensayo a flexión de tres puntos, se aplica una carga monotónica a las probetas semicirculares en el centro de estas hasta la falla, con los dos apoyos con una separación de 80 [mm], como puede verse en la Figura 3-9. El equipo de carga es una máquina de pruebas universal Zwick/Roell con capacidad de 20 [kN], como muestra la Figura 3-10. La velocidad de la carga es ajustada a 0.5 [mm/min]. La carga aplicada es medida usando una célula de carga montada en el equipo. Antes de la realización del ensayo a flexión, la cinta utilizada para asegurar el contacto de las dos partes de la probeta durante la reparación es cortada en la zona de la hendidura de la probeta para que la cinta no genere un aumento de la resistencia de la probeta; pero no se quita de esta, para evitar la completa separación y el posible daño por golpes.

Finalmente, el valor del nivel de reparación, $NR_{i,j}$, de un ciclo i de la probeta j se mide como la razón entre la resistencia a flexión a tres puntos después de la reparación i , $R_{i,j}$, y la resistencia inicial de la misma probeta, $R_{0,j}$, como muestra la Ecuación 3-4.

$$NR_{i,j} = \frac{R_{i,j}}{R_{0,j}}$$

Ecuación 3-4

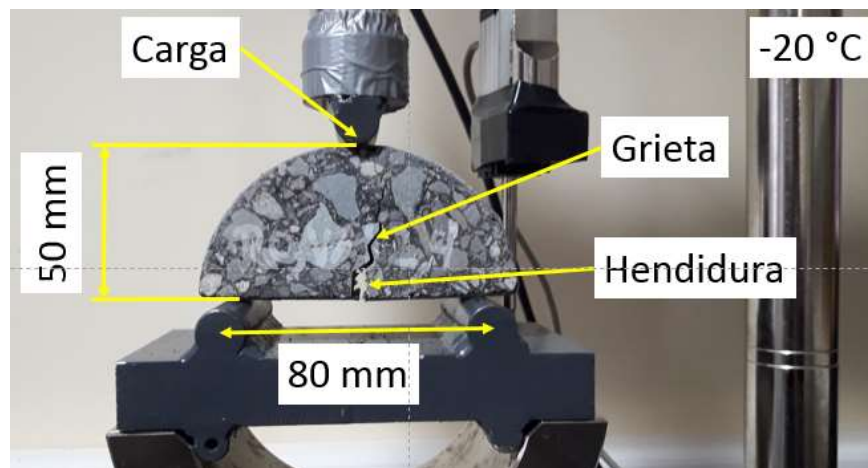


Figura 3-9 Disposición de probeta para ensayo a flexión

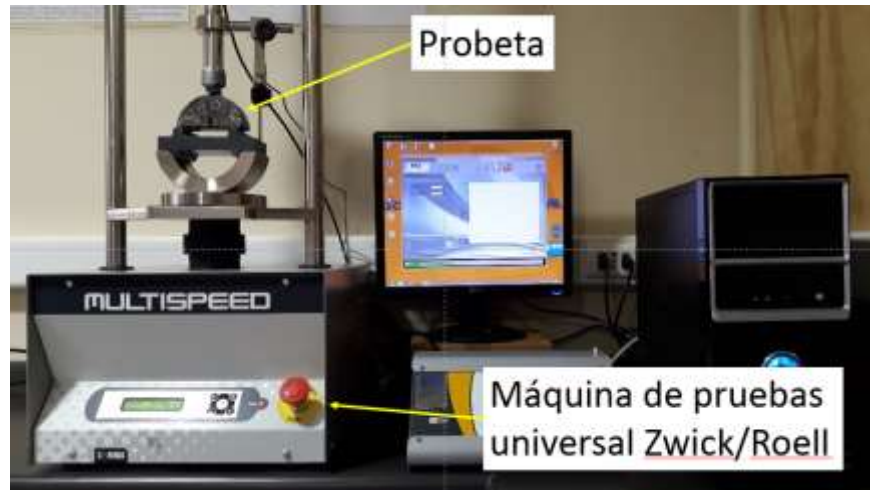


Figura 3-10 Medición de resistencia a flexión

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de los ensayos realizados, entregándolos en las siguientes secciones: densidad aparente y contenido de vacíos de aire, módulo de rigidez a tracción indirecta (*ITSM*) y evaluación de la reparación de mezclas asfálticas.

Algunos de estos resultados, junto con otros posteriores han sido utilizados para publicaciones y congresos. Las publicaciones realizadas se entregan en el Anexo F, el Anexo G, el Anexo H y el Anexo I.

4.1 Densidad aparente y contenido de vacíos de aire

La Figura 4-1 presenta la densidad y el contenido de vacíos de aire promedios de las mezclas con fibras de lana de acero (Figura 4-1(a) y Figura 4-1(b)) y con virutas metálicas (Figura 4-1(c) y Figura 4-1(d)), estas figuras se presentan con mayor tamaño en el Anexo C. Las secciones “Efecto del contenido de RAP” y “Efecto del contenido y tipo de agregado metálico” detallan cómo cada factor evaluado afecta la densidad aparente y el contenido de vacíos de aire de las mezclas asfálticas.

4.1.1 Efecto del contenido de RAP

El efecto del contenido de RAP sobre la densidad aparente y el contenido de vacíos de aire de las mezclas asfálticas se presenta en la Tabla 4-1 y en la Tabla 4-2, respectivamente. Los resultados de densidad aparente no presentan una tendencia clara que la relacione con el contenido de RAP, contrario a lo indicado en la sección 2.1.3. Se observa una posible tendencia de disminución del contenido de vacíos de aire al aumentar el contenido de RAP, si se consideran solo las mezclas con 0, 20 y 30 [%] de RAP, resultado contrario a lo indicado en la sección 2.1.3.

La relación existente entre las densidades de los materiales que componen las mezclas realizadas podría explicar esta tendencia, ya que el uso de materiales más densos en la mezcla aumenta el CVA. Si bien la caracterización entregada del RAP por el proveedor indica una menor densidad de los áridos provenientes del RAP que de los áridos vírgenes, el RAP proviene de distintas fuentes y es mezclado en los depósitos, pudiendo tenerse una variabilidad considerable en la densidad de los áridos de este y haberse utilizado áridos provenientes de RAP más densos que los caracterizados.

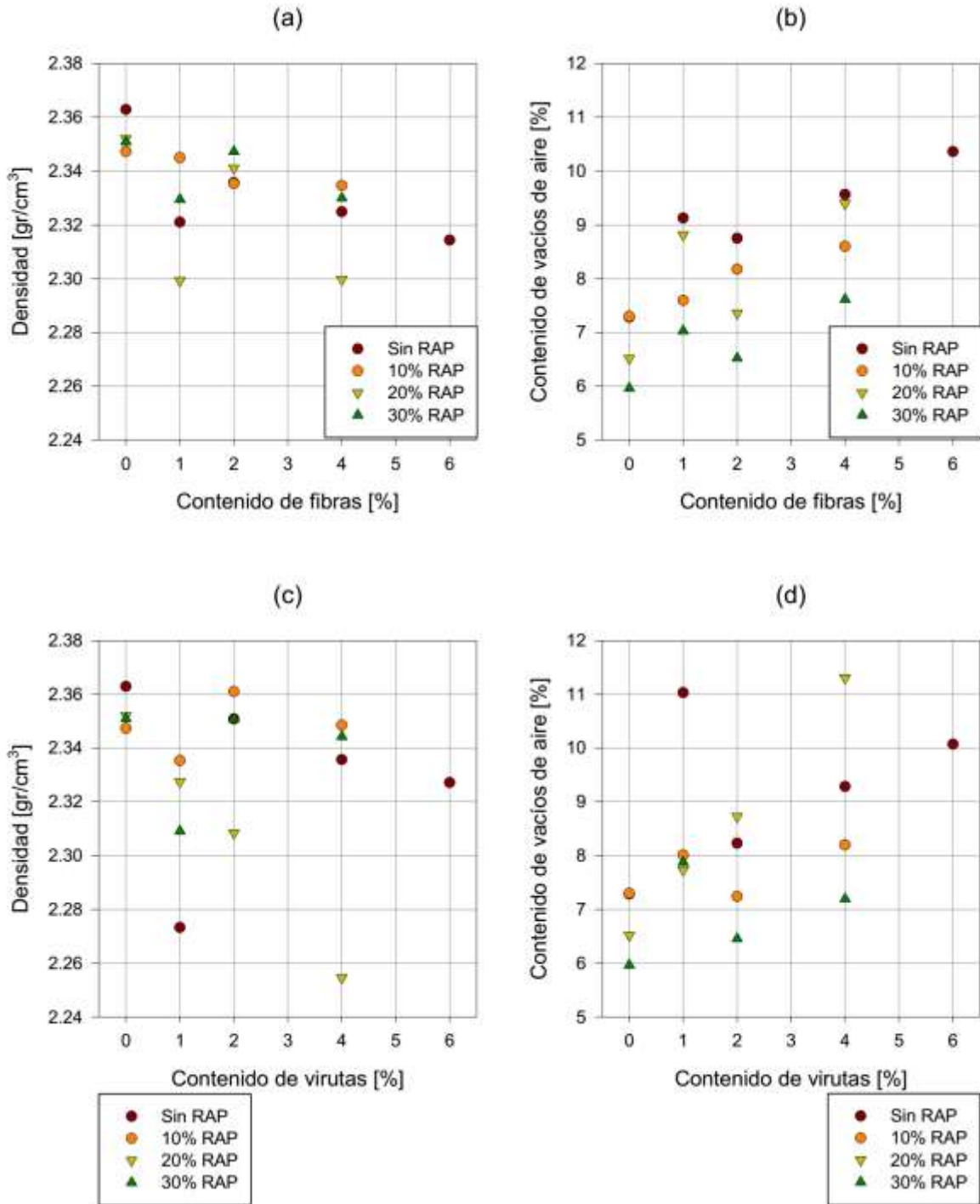


Figura 4-1 Densidad y Contenido de Vacíos de Aire promedios de probetas: mezclas con (a) y (b) FLA y (c) y (d) VM

De la misma forma, no se observan tendencias entre las desviaciones estándar de la densidad aparente y del contenido de vacíos de aire y el contenido de RAP, por lo que no puede indicarse que el contenido de RAP genere una tendencia a aumentar la variabilidad de los valores de densidad y

de contenido de vacíos de aire en las mezclas asfálticas con agregados metálicos. Además, se realizó un estudio ANOVA, con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el cual se obtuvo un valor-F de 18.36 y un valor- $p<0.001$ para la densidad aparente y un valor de F de 42.84 y un valor- $p<0.001$ para el contenido de vacíos de aire, indicando que la adición de RAP tiene un efecto significativo en la densidad aparente y el contenido de vacíos de aire de las mezclas asfálticas.

Tabla 4-1 Densidad aparente de mezclas asfálticas en función de su contenido de RAP

| Contenido de RAP | Densidad aparente [g/cm ³] | Desv. Est. [g/cm ³] | N |
|------------------|--|---------------------------------|----|
| 0 | 2.327 | 0.032 | 54 |
| 10 | 2.344 | 0.022 | 42 |
| 20 | 2.312 | 0.044 | 42 |
| 30 | 2.337 | 0.024 | 42 |

Tabla 4-2 Contenido de vacíos de aire de mezclas asfálticas en función de su contenido de RAP

| Contenido de RAP | Contenido de Vacíos de Aire [%] | Desv. Est. [%] | N |
|------------------|---------------------------------|----------------|----|
| 0 | 9.301 | 1.364 | 54 |
| 10 | 7.875 | 0.938 | 42 |
| 20 | 8.550 | 1.933 | 42 |
| 30 | 6.951 | 1.011 | 42 |

4.1.2 Efecto del contenido y tipo de agregado metálico

4.1.2.1 Efecto del tipo de agregado metálico

El efecto del tipo de agregado metálico sobre la densidad aparente y el contenido de vacíos de aire de las mezclas asfálticas se presenta en la Tabla 4-3 y en la Tabla 4-4, respectivamente. Los resultados muestran diferencias de 1,6 [%] a 1,8 [%] del promedio de contenido de vacíos de aire entre las mezclas sin agregados y las mezclas con agregados metálicos, siendo mayor el valor en estas últimas. Esto puede explicarse debido a la generación de racimos de fibras de lana de acero y debido a la forma de las virutas, lo que dificulta que el cemento asfáltico y los áridos llenen los espacios de racimos y el “interior” de las virutas, además de dificultar la compactación de las mezclas. Por el contrario, la densidad aparente de las mezclas sin metal es mayor a la densidad aparente de las mezclas asfálticas con fibras y virutas; si bien podría pensarse que la mayor densidad de las fibras y las virutas en comparación con los áridos y el cemento asfáltico generaría un aumento

de la densidad aparente, esta disminución se explica con lo ya mencionado, el aumento del contenido de vacíos de aire producto de la adición de estas mismas, ya que la cantidad de fibras o virutas es muy baja como para compensar dicho efecto; esto fue demostrado por González et al (2018a) y González et al (2018b) realizando un análisis de la distribución espacial de las fibras en la mezcla mediante un análisis CT-Scan.

Además, en la Tabla 4-4 se observa que el uso de agregados metálicos genera un aumento en la desviación estándar del contenido de vacíos de aire (aumentos de 77 [%] y 38 [%], en las mezclas con FLA y VM respecto a las mezclas sin metal, respectivamente).

Además, se realizó un estudio ANOVA, con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el cual se obtuvo un valor-F de 29.57 y un valor- $p<0.001$ para la densidad aparente y un valor de F de 57.84 y un valor- $p<0.001$ para el contenido de vacíos de aire, indicando que el tipo de agregado metálico tiene un efecto significativo en la densidad aparente y el contenido de vacíos de aire de las mezclas asfálticas.

Tabla 4-3 Densidad aparente de mezclas asfálticas en función del tipo de agregado metálico

| Tipo de agregado metálico | Densidad aparente [g/cm ³] | Desv. Est. [g/cm ³] | N |
|---------------------------|--|---------------------------------|----|
| Sin Metal | 2.353 | 0.021 | 24 |
| FLA | 2.328 | 0.026 | 78 |
| VM | 2.325 | 0.040 | 78 |

Tabla 4-4 Contenido de vacíos de aire de mezclas asfálticas en función del tipo de agregado metálico

| Tipo de agregado metálico | Contenido de Vacíos de Aire [%] | Desv. Est. [%] | N |
|---------------------------|---------------------------------|----------------|----|
| Sin Metal | 6.765 | 0.996 | 24 |
| FLA | 8.379 | 1.374 | 78 |
| VM | 8.566 | 1.765 | 78 |

4.1.2.2 Efecto del contenido de agregado metálico

El efecto del contenido de agregados metálicos sobre la densidad aparente y el contenido de vacíos de aire se presenta en la Tabla 4-5 y en la Tabla 4-6, respectivamente.

A excepción de las mezclas con un 1 [%] de agregados metálicos, se tiene una relación decreciente entre la densidad aparente y el contenido de agregado metálico, mismo resultado que el presentado en la sección 2.2.4.1; y, a excepción de las mezclas con un 2 [%] de agregados metálicos, se tiene una relación creciente entre contenido de vacíos de aire y el contenido de agregado metálico.

Estas relaciones se pueden explicar con lo mencionado en la sección 4.1.2.1, la adición de fibras y virutas genera un aumento del contenido de vacíos de aire; ahora, este aumento es proporcional a la cantidad de fibras o virutas agregadas.

Además, se realizó un estudio ANOVA, con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el cual se obtuvo un valor-F de 38.08 y un valor- $p<0.001$ para la densidad aparente y un valor de F de 58.93 y un valor- $p<0.001$ para el contenido de vacíos de aire, indicando que el contenido de agregado metálico tiene un efecto significativo en la densidad aparente y el contenido de vacíos de aire de las mezclas asfálticas.

Tabla 4-5 Densidad aparente de mezclas asfálticas en función del contenido de agregado metálico

| Contenido de agregado metálico | Densidad aparente [g/cm ³] | Desv. Est. [g/cm ³] | N |
|--------------------------------|--|---------------------------------|----|
| 0 | 2.353 | 0.021 | 24 |
| 1 | 2.317 | 0.031 | 48 |
| 2 | 2.341 | 0.029 | 48 |
| 4 | 2.322 | 0.040 | 48 |
| 6 | 2.321 | 0.023 | 12 |

Tabla 4-6 Contenido de vacíos de aire de mezclas asfálticas en función del contenido de agregado metálico

| Contenido de agregado metálico | Contenido de Vacíos de Aire [%] | Desv. Est. [%] | N |
|--------------------------------|---------------------------------|----------------|----|
| 0 | 6.765 | 0.996 | 24 |
| 1 | 8.403 | 1.461 | 48 |
| 2 | 7.682 | 1.303 | 48 |
| 4 | 8.896 | 1.616 | 48 |
| 6 | 10.220 | 0.864 | 12 |

4.2 Módulo de rigidez a tracción indirecta (*ITSM*)

En esta sección se presenta un análisis del efecto del contenido de RAP sobre el valor del módulo de rigidez a tracción indirecta (*ITSM* por su sigla en inglés), sin considerar las mezclas sin RAP ni agregados metálicos, un análisis del efecto del tipo de agregado metálico en la mezcla, y un análisis en que se considera la interacción de los factores RAP, tipo y contenido de agregado metálico (mezclas sin agregados metálicos y con 2 [%] de agregados metálicos). Además, todos los valores medidos se entregan en el Anexo D.

4.2.1 Efecto del uso de RAP

La Tabla 4-7 presenta los valores medios del *ITSM* obtenido por contenido de RAP y por temperatura a la que se realiza la medición. En esta puede verse que –independiente de la temperatura de ensayo- la presencia de RAP en las mezclas asfálticas genera un aumento del módulo de rigidez de la mezcla (solo con una temperatura de 10 [°C] se observa una disminución entre los valores obtenidos con 10 [%] y 20 [%] de RAP), como señalan Colbert & You (2012); lo que se debe al endurecimiento del cemento asfáltico producto del envejecimiento inicial que este presenta. Este aumento de la rigidez en función del contenido porcentual de RAP se debe al aumento en la presencia de cemento asfáltico envejecido. El aumento porcentual del valor de *ITSM* varía entre 25 [%] y 57 [%] en las mezclas con 10 [%] de RAP respecto a las mezclas sin RAP; las mezclas con 20 [%] presentan un aumento entre 22 [%] y 64 [%] y las mezclas con 30 [%] presentan un aumento entre 45 [%] y 133 [%], respecto a las mezclas sin RAP.

Tabla 4-7 Valores medios y desviación estándar del *ITSM* en función del contenido de RAP

| Contenido de RAP [%] | Temperatura [°C] | | | | | | | |
|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| | 10 | | 20 | | 30 | | 40 | |
| | Valor medio [MPa] | Desv. Est. [MPa] | Valor medio [MPa] | Desv. Est. [MPa] | Valor medio [MPa] | Desv. Est. [MPa] | Valor medio [MPa] | Desv. Est. [MPa] |
| 0 | 8223 | 1170 | 2628 | 344 | 1235 | 297 | 438 | 63 |
| 10 | 10327 | 1537 | 4127 | 657 | 1608 | 228 | 549 | 64 |
| 20 | 10010 | 594 | 4322 | 373 | 1694 | 284 | 687 | 98 |
| 30 | 11891 | 1097 | 4944 | 113 | 2372 | 209 | 1020 | 90 |

4.2.2 Efecto del tipo de agregado metálico

Debido a que el contenido de RAP genera un aumento del módulo de rigidez a tracción indirecta de las mezclas, el análisis del efecto del tipo de agregado metálico se realiza considerando los resultados obtenidos en mezclas sin RAP. La Tabla 4-8 muestra los valores promedios obtenidos de ITSM; en estos puede observarse que la adición de agregados metálicos genera una disminución del módulo de rigidez, obteniéndose los menores valores en mezclas con fibras de lana de acero: las mezclas con FLA presentan una disminución del ITSM entre 23 [%] y 33 [%] respecto a las mezclas sin agregados metálicos y las mezclas con VM presentan una disminución entre 9 [%] y 26 [%] respecto a las mezclas sin agregados metálicos. Esto puede deberse al aumento de contenido de vacíos de aire en las mezclas producto de la adición de agregados metálicos, como se expone en la sección 4.1.2.

Tabla 4-8 Valores medios del ITSM en función del tipo de agregado metálico en mezclas sin RAP

| Tipo de agregado metálico | Temperatura [°C] | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| | 10 | | 20 | | 30 | | 40 | |
| | Valor medio [MPa] | Desv. Est. [MPa] | Valor medio [MPa] | Desv. Est. [MPa] | Valor medio [MPa] | Desv. Est. [MPa] | Valor medio [MPa] | Desv. Est. [MPa] |
| Sin agregado metálico | 9970 | 195 | 3732 | 103 | 1520 | 82 | 590 | 38 |
| Fibras de lana de acero | 7677 | 265 | 2499 | 256 | 1063 | 136 | 410 | 50 |
| Virutas metálicas | 8768 | 1399 | 2757 | 364 | 1389 | 310 | 469 | 57 |

La Tabla 4-9 presenta los efectos promedios del tipo de agregado metálico, independiente del contenido de RAP en la mezcla. Estos valores presentados indican que el valor del módulo de rigidez de las mezclas con virutas metálicas es mayor al valor de las mezclas con fibras de lana de acero, lo que puede deberse a un mayor valor del módulo de rigidez de las virutas metálicas, resultados que concuerdan con los resultados de mezclas sin RAP; las mezclas con VM presentan valores 2 [%] mayores a las mezclas con FLA a una temperatura de 10 [°C], un aumento de 14 [%] a una temperatura de 20 [°C] y un aumento de 20 [%] a temperaturas de 30 [°C] y 40 [°C], teniendo un aumento porcentual del valor de ITSM de mezclas con virutas respecto a mezclas con fibras que aumenta con el aumento de la temperatura y tiende a un valor constante.

Tabla 4-9 Valores medios del ITSM en función del tipo de agregado metálico

| Tipo de agregado metálico | Temperatura [°C] | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| | 10 | | 20 | | 30 | | 40 | |
| | Valor medio [MPa] | Desv. Est. [MPa] | Valor medio [MPa] | Desv. Est. [MPa] | Valor medio [MPa] | Desv. Est. [MPa] | Valor medio [MPa] | Desv. Est. [MPa] |
| Fibras de lana de acero | 10006 | 1589 | 3735 | 814 | 1551 | 434 | 607 | 207 |
| Virutas metálicas | 10220 | 2028 | 4276 | 1166 | 1861 | 569 | 727 | 290 |

4.2.3 Interacción entre factores

Los efectos que genera la interacción entre contenido de RAP, tipo de metal agregado a la mezcla y temperatura de ensayo, en el módulo de rigidez de las probetas se presentan en la Tabla 4-10 y en la Figura 4-2. En esta tabla se observa que, en general, son mayores los valores de módulo de rigidez en mezclas con virutas metálicas que en mezclas con fibras de lana de acero (los casos en que esto ocurre se encuentran destacados con negrita, y los casos en que no ocurre se muestran en rojo y con cursiva). La Figura 4-2(a) muestra los resultados obtenidos en mezclas asfálticas con FLA y la Figura 4-2(b) muestra los resultados obtenidos en mezclas asfálticas con VM; en ambas figuras se incluyen los resultados obtenidos en las probetas de referencia (sin RAP ni agregados metálicos).

Tabla 4-10 Valores medios de módulos de rigidez [MPa]

| Contenido de RAP [%] | Tipo de agregado metálico | Temperatura [°C] | | | |
|----------------------|---------------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 10 | 20 | 30 | 40 |
| 0 | Sin agregado metálico | 9970 | 3732 | 1525 | 591 |
| | Fibras de lana de acero | 7677 | 2499 | 1063 | 410 |
| | Virutas metálicas | 8768 | 2757 | 1389 | 469 |
| 10 | Fibras de lana de acero | 10781 | 3806 | 1380 | 483 |
| | Virutas metálicas | <i>9873</i> | 4449 | 1758 | 599 |
| 20 | Fibras de lana de acero | 10845 | 4272 | 1722 | 673 |
| | Virutas metálicas | <i>9175</i> | 4372 | <i>1622</i> | 680 |
| 30 | Fibras de lana de acero | 10719 | 4361 | 2038 | 864 |
| | Virutas metálicas | 13062 | 5526 | 2675 | 1159 |

Los datos entregados en la Tabla 4-10 y en la Figura 4-2, presentan una relación aproximadamente lineal decreciente entre el logaritmo del módulo de rigidez y la temperatura a la cual se realiza el ensayo para el mismo tipo de mezcla, es decir, de la forma que muestra la Ecuación 4-1:

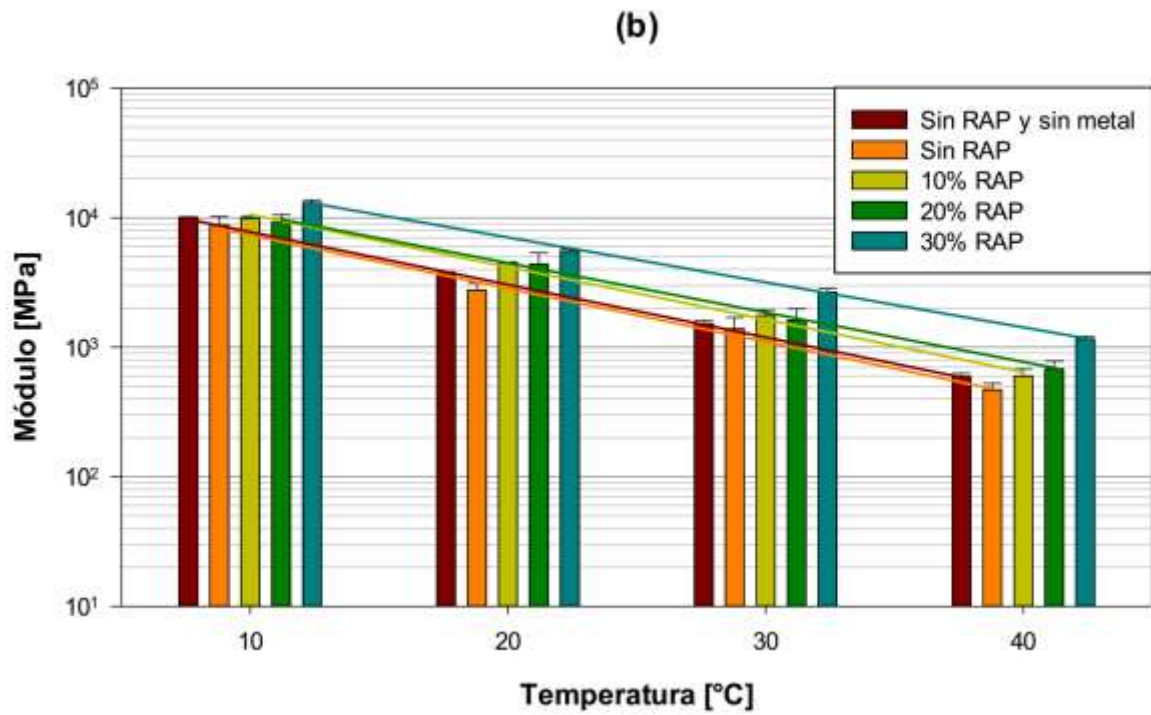
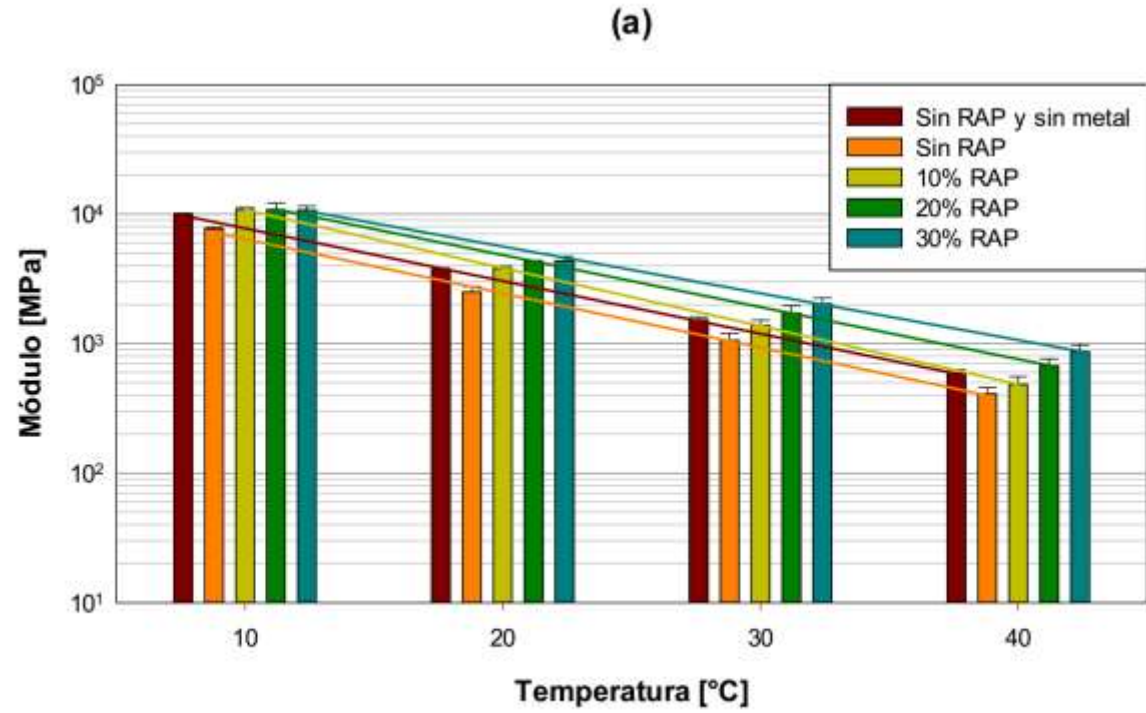


Figura 4-2 Módulo de rigidez a tracción indirecta de probetas con (a) fibras de lana de acero y (b) virutas metálicas

$$\log(\text{Módulo [MPa]}) = -a \cdot T[^\circ\text{C}] + b \quad \text{Ecuación 4-1}$$

Siendo a y b valores positivos. La Tabla 4-11 muestra los valores de a y b junto con la ecuación resultante.

Tabla 4-11 Ecuaciones para los valores del Módulo a tracción indirecta como función de la temperatura

| Contenido de RAP | Tipo de agregado metálico | a | b | Relación entre ITSM y temperatura ITSM en MPa y temperatura en $^\circ\text{C}$ |
|------------------|---------------------------|----------|--------|--|
| 0 | Sin metal | 0.04077 | 4.3997 | $\log(ITSM) = -0.04077 \cdot T + 4.3997$ |
| | Fibras de lana de acero | 0.04190 | 4.2774 | $\log(ITSM) = -0.04190 \cdot T + 4.2774$ |
| | Virutas metálicas | 0.04120 | 4.3251 | $\log(ITSM) = -0.04120 \cdot T + 4.3251$ |
| 10 | Fibras de lana de acero | 0.04457 | 4.4796 | $\log(ITSM) = -0.04457 \cdot T + 4.4796$ |
| | Virutas metálicas | 0.04027 | 4.4274 | $\log(ITSM) = -0.04027 \cdot T + 4.4274$ |
| 20 | Fibras de lana de acero | 0.04001 | 4.4329 | $\log(ITSM) = -0.04001 \cdot T + 4.4329$ |
| | Virutas metálicas | 0.03793 | 4.3577 | $\log(ITSM) = -0.03793 \cdot T + 4.3577$ |
| 30 | Fibras de lana de acero | 0.03603 | 4.3804 | $\log(ITSM) = -0.03603 \cdot T + 4.3804$ |
| | Virutas metálicas | 0.034605 | 4.4533 | $\log(ITSM) = -0.034605 \cdot T + 4.4533$ |

4.2.4 Isotropía de mezclas asfálticas con agregados metálicos

La Figura 4-3 muestra los valores de todos los módulos de rigidez medidos en dos direcciones longitudinales perpendiculares entre sí, graficando en cada punto los dos valores obtenidos (los valores indicados en A corresponden a los que primero se midieron en cada probeta y los valores indicados como B a los segundos valores medidos). Como puede verse, la adición de fibras de lana de acero o virutas metálicas y la adición de RAP no generan anisotropía en las probetas, lo que concuerda con lo presentado por Norambuena-Contreras et al. (2016) para mezclas con fibras de lana de acero y sin RAP. Esto se debe a que estos agregados no presentan una tendencia a orientarse en un sentido y logran una distribución globalmente homogénea al interior de la mezcla asfáltica (si bien existe una tendencia de las fibras a agruparse y formar racimos, esta tendencia es a pequeña escala, teniéndose una buena distribución al considerar la probeta completa). Estos valores presentan un coeficiente de determinación R^2 igual a 0.9947 respecto a la recta $y = x$, es decir, una correlación positiva casi perfecta.

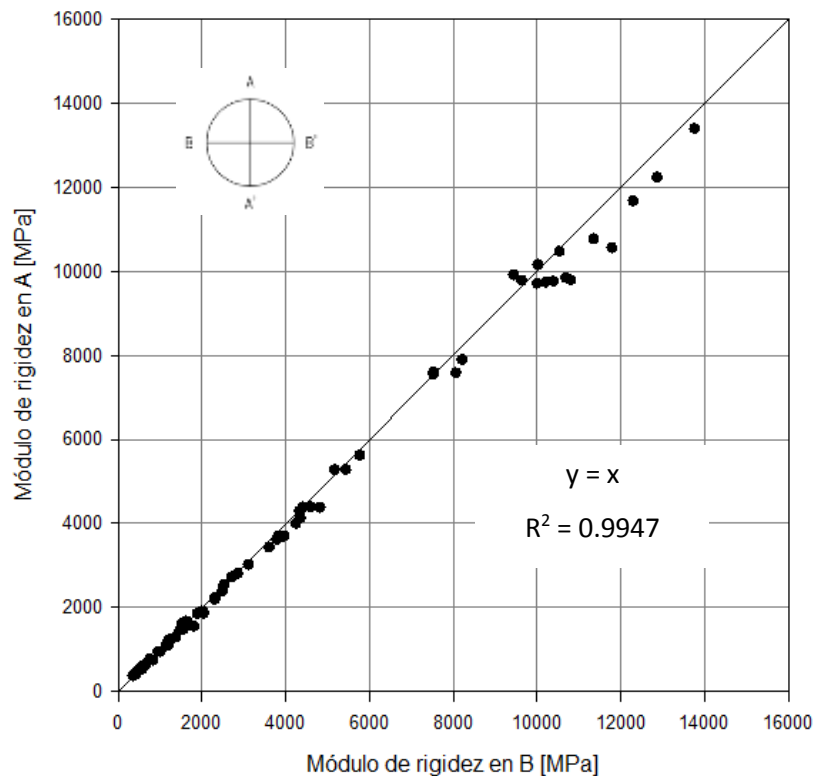


Figura 4-3 Relación entre módulos de rigidez de las probetas medidos en forma longitudinal y perpendicular a esta

4.3 Evaluación de la reparación de mezclas asfálticas

La medición de la autorreparación de mezclas asfálticas se realiza considerando un total de siete ciclos y cinco probetas semicilíndricas por tipo de mezcla; debido a las variaciones en los resultados obtenidos, se lleva a cabo un filtro de los datos para eliminar los valores extremos que pueden distorsionar los resultados.

Para la realización del filtro de datos, se considera el valor medio y la desviación estándar de cada tipo de mezcla y cada ciclo (treinta tipos de mezcla y siete ciclos). De acuerdo a lo indicado por Lin & Sherman (2007), se consideran en el análisis los valores pertenecientes al rango:

$$[prom._i - 1.5 \cdot desv. est._i, prom._i + 1.5 \cdot desv. est._i]$$

Donde:

- $prom._i$ es el promedio de los cinco valores obtenidos en cada tipo de mezcla en el ciclo i ; y
- $desv. est._i$ es la desviación estándar de los cinco valores obtenidos en cada tipo de mezcla y en el ciclo i .

Todos los valores medidos de resistencia a flexión de las probetas semicilíndricas se presentan en el Anexo E.

El análisis del efecto de los diferentes agregados en la reparación alcanzada por las mezclas asfálticas se entrega de la siguiente forma:

- **Efecto del contenido de RAP** (sobre el nivel de reparación): este análisis considera todas las mezclas, sin diferenciar entre ciclos ni por tipo de agregado metálico, pero sin considerar los valores obtenidos en mezclas sin RAP y con 6 [%] de agregados metálicos, ya que no se confeccionaron mezclas con RAP y 6 [%] de agregados metálicos.
- **Efecto del contenido de fibras de lana de acero**: se analiza el efecto de los diferentes contenidos de fibras de lana de acero, sin diferenciar entre diferentes ciclos ni contenidos de RAP. El análisis de mezclas sin RAP y con diferentes contenidos de FLA ya se ha realizado en otras investigaciones, por lo que en esta investigación se realiza como base para evaluar el efecto del contenido de RAP en mezclas con FLA y como base en mezclas con VM, con y sin RAP.
- **Efecto del contenido de virutas metálicas**: se analiza el efecto de los diferentes contenidos de virutas metálicas, sin diferenciar entre los diferentes ciclos ni contenidos de RAP.

- **Efecto del tipo de agregado metálico e interacción entre tipo y contenido de agregado metálico:** se comparan los resultados obtenidos entre mezclas sin agregados metálicos y con fibras de lana de acero y virutas metálicas; primero a nivel general, sin diferenciar entre distintos contenidos de metal, y luego considerando los diferentes contenidos de agregados metálicos, correspondiendo a un análisis de interacción entre tipo y contenido de agregado metálico.
- **Efecto de la cantidad de ciclos:** se analiza el efecto de la cantidad de ciclos sobre el nivel de reparación y la forma en que estos resultados varían con cada ciclo.
- **Interacción entre factores:** Análisis comparativo de todos los tipos de mezclas, considerando contenido de RAP y tipo y contenido de agregado metálico, como indicador de mezclas con mejores resultados.

4.3.1 Efecto del contenido de RAP

El análisis del efecto del contenido de RAP en el nivel de reparación de mezclas asfálticas solo considera las mezclas con 0 [%], 1 [%], 2 [%] y 4 [%], y no considera los resultados obtenidos en mezclas sin RAP y con 6 [%] de agregado metálico, debido a que solo se tiene este porcentaje de agregado metálico en mezclas sin RAP; por lo que, de incluirse, distorsionarían los valores, mostrando una mayor diferencia entre mezclas sin y con RAP.

La Tabla 4-12 muestra los valores obtenidos del nivel medio y de desviación estándar junto con la cantidad de mediciones de reparación consideradas y la Figura 4-4 muestra los valores medios alcanzados del nivel de reparación de mezclas con distintos contenidos de RAP, con barras de error correspondiente a +1 desviación estándar. Los datos obtenidos muestran que las mezclas sin RAP presentan un valor medio de reparación igual 0,57, mientras que los valores medios de las mezclas con RAP son menores a 0,50, teniéndose una diferencia entre los niveles de reparación de por lo menos 0,08 entre mezclas sin y con RAP (equivalente a un 14 [%] respecto al valor obtenido en mezclas sin RAP); por otro lado, puede verse que no existe una variación amplia en los valores de niveles de reparación entre mezclas con diferentes contenidos de RAP, teniéndose una variación de 0,01 entre mezclas con 10 [%] y 20 [%] de RAP, equivalente a un 2 [%] respecto al valor obtenido en mezclas con 10 [%] de RAP. Además, se realizó un estudio ANOVA, con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el cual se obtuvo un valor-F de 28.82 y un valor- $p<0.001$, indicando que el contenido de RAP tiene un efecto significativo en el nivel de autorreparación de las mezclas asfálticas, generando disminución del nivel de reparación.

Tabla 4-12 Resumen del nivel de reparación en función del contenido de RAP

| Contenido de RAP [%] | Nivel medio de reparación [-] | Desviación estándar [-] | N° mediciones |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------|
| 0 | 0.5716 | 0.1113 | 225 |
| 10 | 0.4909 | 0.1052 | 227 |
| 20 | 0.4812 | 0.1340 | 228 |
| 30 | 0.4831 | 0.1333 | 224 |

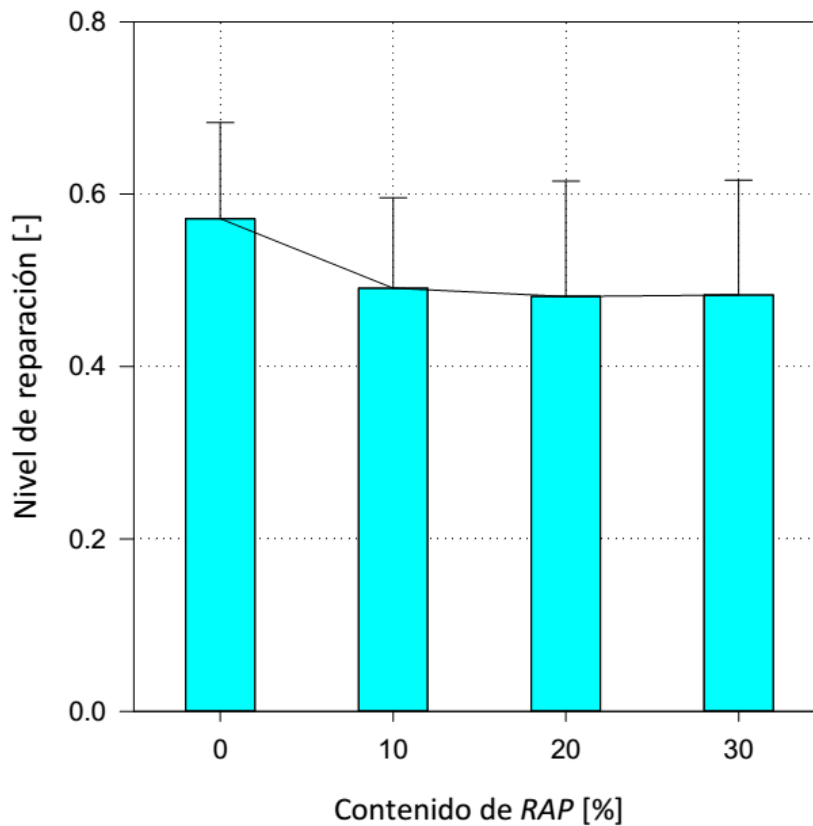


Figura 4-4 Nivel de reparación en función del contenido de RAP

Además, los valores de desviación estándar obtenidos indican que las reparaciones son más homogéneas en mezclas sin RAP, con un valor igual a 0.1113, disminuyendo levemente en mezclas con 10 [%] de RAP, y aumentando en mezclas con 20 [%] y 30 [%] de RAP, donde el valor es casi el mismo.

La disminución del nivel de reparación obtenido con el aumento de RAP puede deberse a que este contiene cemento asfáltico envejecido desde un principio (que es proporcional a la cantidad de RAP

utilizado), por lo que presenta en todos los ciclos una mayor viscosidad y, con esto, una menor capacidad de fluir a altas temperaturas y cerrar las grietas generadas al romper la probeta.

Otra posible razón para la disminución del nivel de reparación y el aumento de la desviación estándar, es que el cemento asfáltico aportado por el RAP no se mezcla en su totalidad con el cemento asfáltico virgen, teniéndose “áridos compuesto por el árido mismo y una capa de cemento asfáltico envejecido” –como puede verse en la sección 2.1.2- por lo que la cantidad de cemento asfáltico útil que puede fluir y cerrar las grietas disminuye con la cantidad de RAP.

Además, el aumento en el valor de la desviación estándar puede deberse a una distribución diferente de la mezcla entre mezclas sin RAP y mezclas con RAP, es decir, en mezclas sin RAP la grieta se genera a través de cemento asfáltico virgen, mientras que en mezclas con RAP, la grieta puede generarse tanto por cemento asfáltico virgen como por cemento asfáltico reutilizado o por ambos, presentando una mayor variación en la capacidad de fluir del cemento asfáltico.

4.3.2 Efecto del contenido de fibras de lana de acero

La Tabla 4-13 muestra los valores obtenidos del nivel medio y de desviación estándar junto con la cantidad de mediciones de reparación consideradas. La Figura 4-5 muestra los valores medios alcanzados del nivel de reparación de mezclas con fibras de lana de acero, con barras de error correspondiente a +1 desviación estándar.

El nivel de reparación medio de mezclas sin fibras es de aproximadamente 0.46, mientras que los valores obtenidos en mezclas con 1 [%], 2 [%] y 4 [%] de fibras están entre 0.49 y 0.51, presentando solo una leve diferencia en el nivel de reparación alcanzado. Los resultados presentan una leve disminución del nivel de reparación al aumentar el contenido de fibras de 1 [%] a 2 [%], pero un aumento del nivel de reparación al tener 4 [%] de fibras de lana de acero, teniéndose como óptimo general un 4 [%] de FLA.

Estos resultados no coinciden con los presentados por investigaciones anteriores (Norambuena-Contreras & García, 2016), donde se obtiene que el contenido óptimo de FLA es de 2 [%]; esto se debe a que los resultados obtenidos en esta investigación consideran el uso de RAP, mientras que la investigación realizada por Norambuena-Contreras & García (2016) consideró solo mezclas asfálticas con materiales vírgenes.

Además, se realizó un estudio ANOVA, con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el cual se obtuvo un valor-F de 2.62 y un valor-p de 0.050, indicando que la adición de fibras de lana de acero tiene un efecto significativo en el nivel de autorreparación de las mezclas asfálticas.

Tabla 4-13 Valores principales del nivel de reparación de mezclas con diferentes porcentajes de fibra de lana de acero

| Contenido de FLA [%] | Nivel medio de reparación [-] | Desviación estándar [-] | N° mediciones |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------|
| 0 | 0.4647 | 0.1369 | 128 |
| 1 | 0.4913 | 0.08553 | 123 |
| 2 | 0.4897 | 0.1689 | 137 |
| 4 | 0.5097 | 0.1087 | 132 |

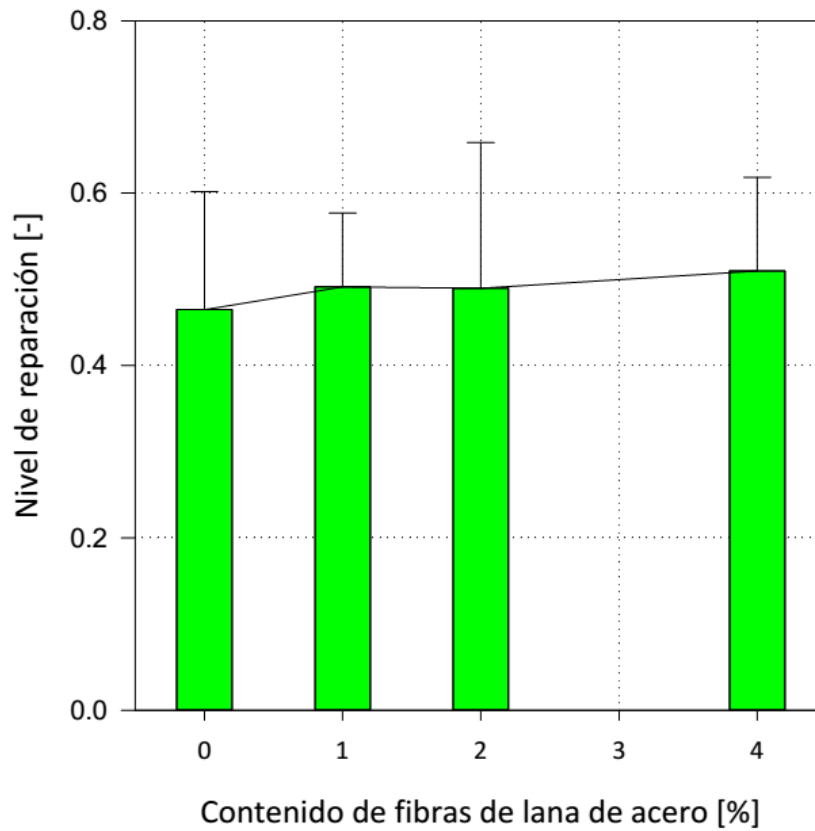


Figura 4-5 Nivel de reparación en función del contenido de fibras de lana de acero

4.3.3 Efecto del contenido de virutas metálicas

La Tabla 4-14 muestra los valores obtenidos del nivel medio y de desviación estándar junto con la cantidad de mediciones de reparación consideradas. La Figura 4-6 muestra los valores medios alcanzados del nivel de reparación de mezclas con VM, con barras de error correspondiente a +1 desviación estándar.

Tabla 4-14 Valores principales del nivel de reparación de mezclas con diferentes porcentajes de virutas metálicas

| Contenido de VM [%] | Nivel medio de reparación [-] | Desviación estándar [-] | N° mediciones |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------|
| 0 | 0.4647 | 0.1369 | 128 |
| 1 | 0.5861 | 0.0934 | 126 |
| 2 | 0.5298 | 0.1001 | 130 |
| 4 | 0.4762 | 0.1324 | 128 |

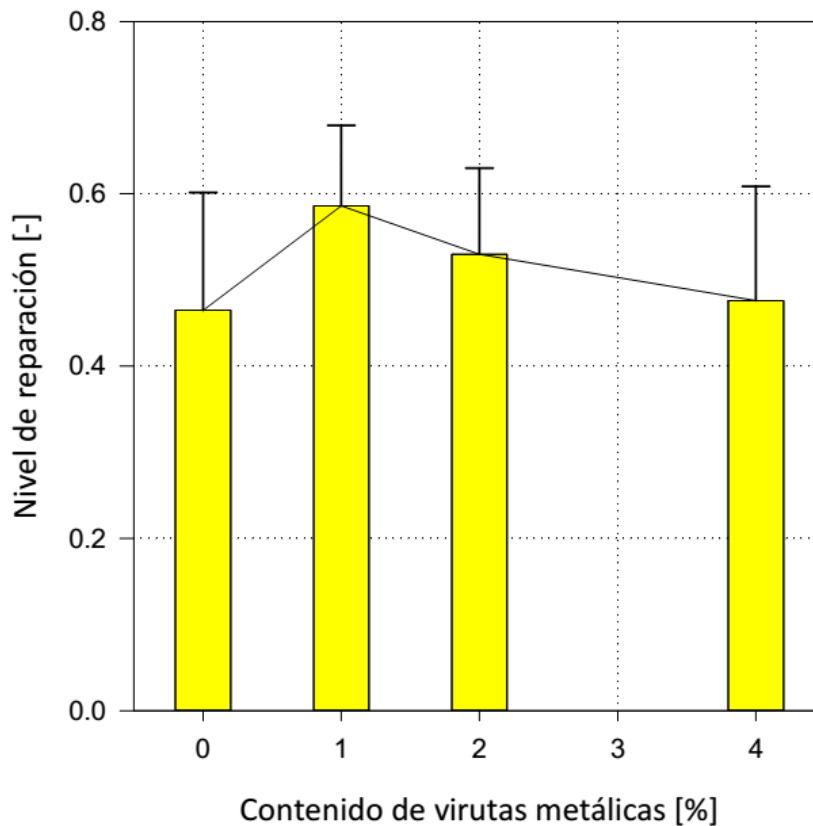


Figura 4-6 Nivel de reparación en función del contenido de virutas metálicas

El nivel de reparación medio de mezclas sin virutas metálicas es de aproximadamente 0.46 y que los valores obtenidos en mezclas con 1 [%] y 2 [%] de VM corresponden a 0.59 y 0.53, respectivamente, mientras que en mezclas con 4 [%] de VM se obtiene un nivel de reparación de 0,48 [%], es decir, los resultados muestran que la adición de 1 y 2 [%] de VM genera un aumento en el nivel de reparación, mientras que la adición de 4 [%] genera aumento no significativo del nivel de reparación. Además, el mayor nivel de reparación medio se obtiene con un 1 [%] de VM, que representa un aumento de 26 [%] respecto a las mezclas sin agregados metálicos.

Junto con esto, se observa una relación entre el nivel de reparación de la mezcla y la desviación estándar de esta: a mayor nivel de reparación, menor valor de desviación estándar, es decir, las mezclas que presentan mejores niveles de reparación también presentan una reparación más homogénea, las mezclas con un 1 [%] de VM presentan una disminución equivalente a 32 [%] de la desviación estándar en comparación a las mezclas sin agregados metálicos.

Además, se realizó un estudio ANOVA, con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el cual se obtuvo un valor-F de 28.60 y un valor- $p<0.001$, indicando que la adición de virutas metálicas tiene un efecto significativo en el nivel de autorreparación de las mezclas asfálticas. Si bien se obtiene un valor- p bajo, la variabilidad de los resultados obtenidos con 4 [%] de VM es similar a la obtenida en mezclas sin VM; este alto valor de la variabilidad puede deberse a la ausencia de confinamiento en las probetas, lo que generó desprendimiento de material durante los ciclos y disminuciones y aumentos de algunas secciones de probetas.

4.3.4 Efecto del tipo de agregado metálico e interacción entre tipo y contenido de agregado metálico

La Tabla 4-15 muestra los valores obtenidos del nivel medio de reparación y de desviación estándar junto con la cantidad de mediciones de reparación consideradas. La Figura 4-7 muestra los valores medios alcanzados del nivel de reparación dependiendo del tipo de agregado metálico incorporado a las mezclas asfálticas, con barras de error correspondiente a +1 desviación estándar.

Como muestran los resultados, el efecto promedio de la incorporación de metal en la mezclas es un aumento del nivel de reparación, correspondientes a 7 [%] y 14 [%] de aumento respecto a las mezclas sin agregados metálicos, para FLA y VM respectivamente. Junto con esto, la incorporación de fibras o virutas genera una disminución de la desviación estándar del nivel de reparación, que puede deberse a que el calor se concentra en las zonas donde hay presencia de metal, al momento

de exponer las mezclas a microondas, mientras que las mezclas sin agregado metálico no tienen elementos que absorban con facilidad el calor entregado por las ondas electromagnéticas.

Tabla 4-15 Resumen del nivel de reparación en función del tipo de agregado metálico

| Tipo de agregado metálico | Nivel medio de reparación [-] | Desviación estándar [-] | N° mediciones |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------|
| Sin agregado metálico | 0.4647 | 0.1369 | 128 |
| Fibras de lana de acero | 0.4969 | 0.1275 | 392 |
| Virutas metálicas | 0.5304 | 0.1185 | 384 |

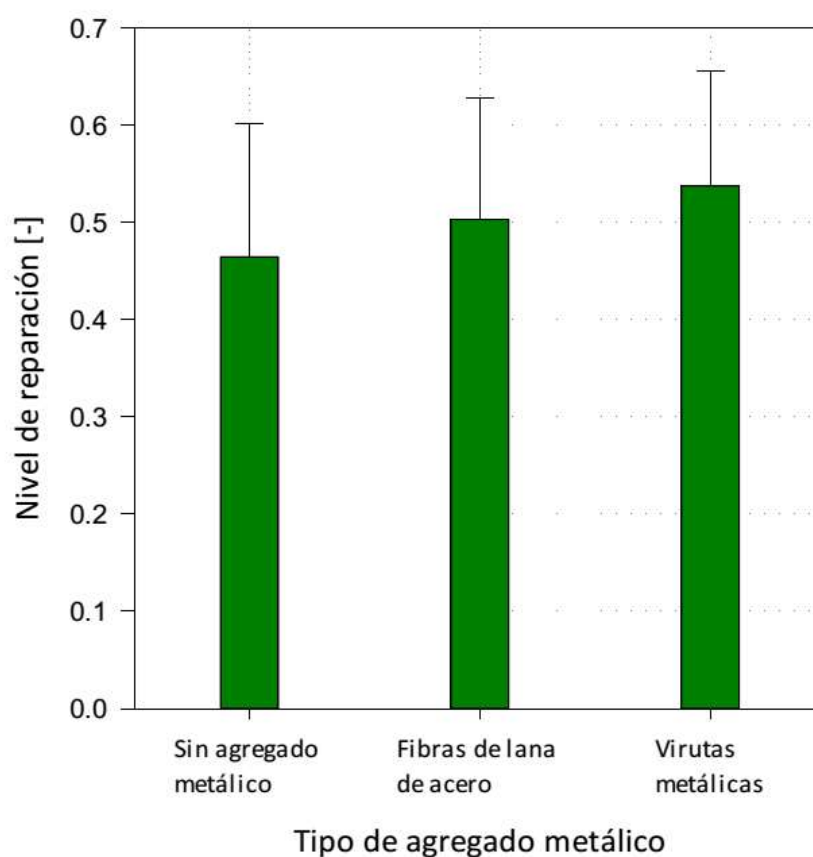


Figura 4-7 Nivel de reparación en función del tipo del agregado metálico

Los valores presentados en la Tabla 4-15 muestran que las mezclas con mejores niveles de reparación presentan menores niveles de desviación estándar, presentando reparación más homogéneas, es decir, la adición de agregados metálicos, y especialmente de virutas metálicas, no solo aumenta los niveles de reparación de las mezclas asfálticas, sino que también hace que estas reparaciones sean más homogéneas.

Además, se realizó un estudio ANOVA, con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el cual se obtuvo un valor-F de 15.29 y un valor-p<0.001, indicando que el tipo de agregado metálico tiene un efecto significativo en el nivel de autorreparación de las mezclas asfálticas.

4.3.4.1 Interacción entre tipo y contenido de agregado metálico

En esta sección se comparan los resultados presentados en las secciones 4.3.2 y 4.3.3. La Figura 4-8 muestra los valores presentados en las dos secciones mencionadas con el fin de poder comparar los valores obtenidos entre los tipos de agregados metálicos: mezclas sin agregados metálicos o mezclas de referencia -0 [%]- y mezclas con diferentes contenidos de FLA y VM.

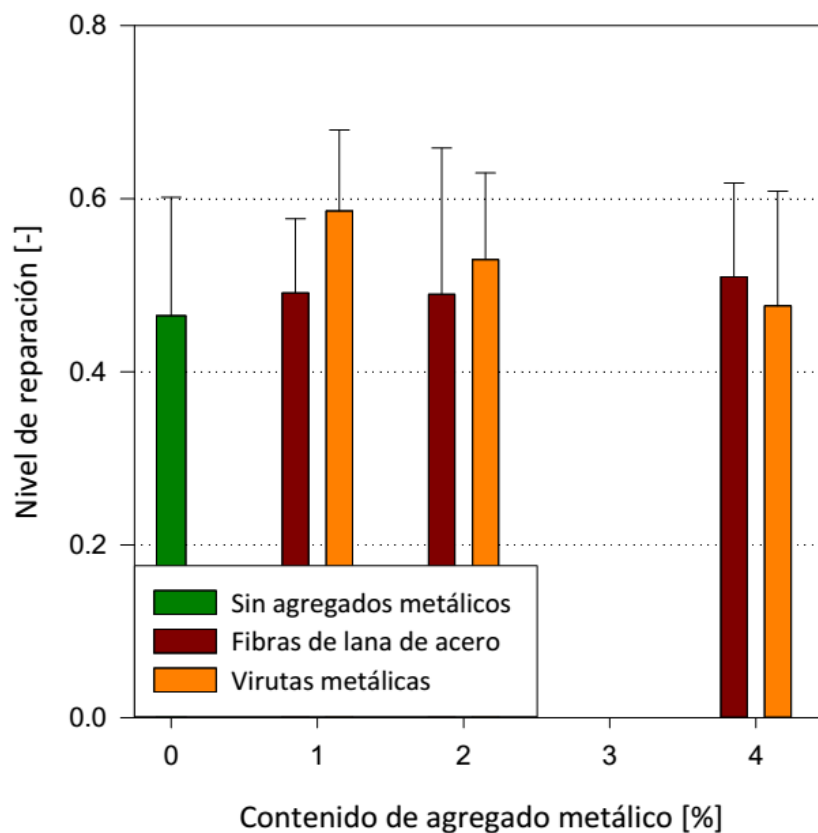


Figura 4-8 Niveles de reparación en función de la interacción tipo y contenido de agregado metálico

Si bien los resultados generales indican un mayor nivel de reparación en mezclas con VM que con FLA, al observar la interacción con el contenido de metal, se observa que este comportamiento se debe a los resultados de mezclas con 1 [%] y 2 [%] de agregados metálicos. A nivel general, se observa que el mayor nivel de reparación se obtiene en mezclas con un 1 [%] de VM; en mezclas

con 2 [%] de agregados metálicos se tiene un mejor nivel de reparación en mezclas con VM y solo en las mezclas con 4 [%] de agregados metálicos se obtuvieron mejores resultados con FLA.

Esta interacción entre tipo y contenido de agregado metálico considera los resultados de todos los niveles de RAP, por lo que excluye los resultados obtenidos en mezclas sin RAP y con 6 [%] de agregados metálicos. Los resultados obtenidos en mezclas sin RAP y con 6 [%] de agregados metálicos se presentan en la sección 4.3.6.

Debido a la capacidad de fluir del cemento asfáltico producto de la reparación y a la ausencia de confinamiento lateral y en la hendidura, en algunas probetas se produjo flujo de mezcla asfáltica hacia fuera de la probeta y hacia la hendidura de esta; estos flujos pueden generar una disminución de la sección de falla –al tener flujo hacia fuera, o desprendimiento como muestra la Figura 4-9- disminuyendo la resistencia a flexión, como también generar un aumento de la sección de falla de la probeta –al tener flujo hacia la hendidura- pudiendo aumentar la resistencia a flexión. La ausencia de este confinamiento genera una mayor variabilidad en los resultados luego de las reparaciones, pudiendo ser causa importante de los niveles de desviación estándar obtenidos.



Figura 4-9 Movimiento de material por ausencia de confinamiento

4.3.5 Efecto de la cantidad de ciclos

La Tabla 4-16 muestra los valores medios y valores de desviación estándar junto con la cantidad de mediciones de reparación considerada. La Figura 4-10 muestra los valores medios alcanzados del nivel de reparación en función de la cantidad de ciclos, con barras de error correspondiente a ± 1 desviación estándar. En estas puede verse que el nivel medio de reparación aumenta entre el primer y el segundo ciclo de reparación y también entre el segundo y tercer ciclo, pero en menor medida. Luego del tercer ciclo, el nivel de reparación disminuye con cada ciclo. El aumento en el nivel de reparación entre el primer y el tercer ciclo es de aproximadamente 7.9 [%] y la disminución entre el tercer y el séptimo ciclo es de 11.6 [%] aproximadamente, teniéndose una disminución aproximada entre el primer y el séptimo ciclo de 4.6 [%].

Tabla 4-16 Valores principales del nivel de reparación de mezclas con el paso de los ciclos

| Ciclo | Nivel medio de reparación [-] | Desviación estándar [-] | Nº mediciones |
|-------|-------------------------------|-------------------------|---------------|
| 1 | 0.5031 | 0.1630 | 141 |
| 2 | 0.5405 | 0.1385 | 139 |
| 3 | 0.5429 | 0.1203 | 142 |
| 4 | 0.5238 | 0.1070 | 135 |
| 5 | 0.5179 | 0.1066 | 134 |
| 6 | 0.4833 | 0.1132 | 138 |
| 7 | 0.4799 | 0.1111 | 137 |

Los valores de desviación estándar del nivel de reparación alcanzado muestran una disminución entre el primer y el cuarto ciclo aproximadamente igual a 0.56, que luego se mantiene relativamente constante en torno a un valor de 0.11. Esto indica que en los primeros ciclos, y principalmente en el primero, se tiene mayor variabilidad –indicado por los valores de desviación estándar- en el nivel de reparación alcanzado entre las distintas probetas, y una reparación más homogénea al avanzar en la cantidad de ciclos, aunque de menor valor.

El aumento en el nivel de reparación que se observa entre los tres primeros ciclos puede deberse a:

- La alta capacidad del cemento asfáltico a fluir al ser expuestos a microondas, que generó cierres parciales de las hendiduras de algunas probetas, aumentando la sección transversal de la probeta por donde pasa la grieta; y

- Un efecto de confinamiento entregado por las cintas que aseguran el contacto de las dos partes de cada probeta al estar expuesta a microondas (este efecto puede haber sido bajo en la primera medición de reparación debido a que las probetas solo tenían una capa de cinta).

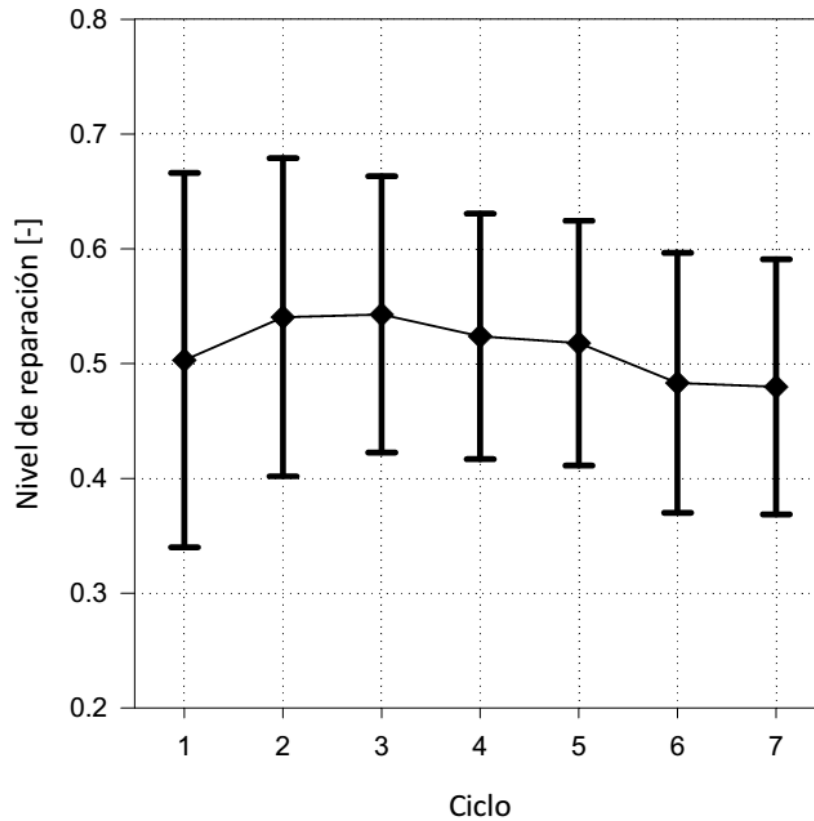


Figura 4-10 Nivel de reparación en función del ciclo

Por otro lado, la disminución del nivel de reparación a partir del tercer ciclo puede deberse al envejecimiento del cemento asfáltico, envejecimiento que se produce desde la primera reparación, pero que presentaría mayor relevancia a partir del tercer ciclo.

Además, al comparar los valores de reparación de las mezclas de referencia (mezclas sin agregado metálico y sin RAP) presentados en esta investigación con los de investigaciones anteriores, puede

verse que los valores de nivel de reparación presentados son diferentes en esta investigación⁴. Esto puede deberse a diferentes razones, como:

- Diferencias en los métodos de mezclado (manual o en mezcladora);
- La procedencia de los materiales utilizados: las investigaciones anteriores son principalmente extranjeras y las investigaciones chilenas se hicieron en Concepción, por lo que los materiales utilizados son distintos, pudiendo variar también la composición química de estos (solo las fibras de lana de acero son las mismas que las utilizadas por Norambuena-Contreras en todas sus publicaciones); y
- La granulometría utilizada en las mezclas de cada investigación, entre otras.

4.3.6 Interacción entre factores

4.3.6.1 *Efecto del contenido de agregado metálico en mezclas sin RAP*

Como se dijo en secciones anteriores, esta investigación utiliza como referencia resultados obtenidos en mezclas solo con materiales vírgenes para el tiempo de exposición a microondas y contenido óptimo de fibras de lana de acero, por lo que a continuación se presenta una comparación entre los resultados obtenidos en mezclas sin RAP.

La Tabla 4-17 y la Figura 4-11 presentan los valores medios y los valores de desviación estándar del nivel de reparación por tipo de mezcla. En estas puede verse que el nivel de reparación más alto se obtiene en mezclas con un 1% de virutas metálicas, alcanzando un nivel medio entre todos los ciclos de 0.66, seguido por las mezclas con 6 [%] de VM con un valor medio de 0.64, y las mezclas sin agregados metálicos, con un nivel de reparación de 0.60.

En las mezclas con fibras de lana de acero se observa que el nivel de reparación más alto se obtiene con 2 [%] de fibras, con un valor aproximado de 0.59, comportamiento que coincide con lo expuesto en la sección 2.2.7; sin embargo, las mezclas con fibras de lana de acero presentan valores medios de reparación menores al nivel de reparación medio obtenido sin agregados metálicos.

⁴ Durante la investigación inicial para realizar la memoria, se vio la posibilidad de que esto ocurriera, por lo que se decidió realizar probetas de referencia propias (mezclas sin RAP, y sin agregados metálicos) para tener referencias de comparación que se hayan obtenido bajo las mismas condiciones que los valores obtenidos en mezclas con RAP y/o agregados metálicos.

Tabla 4-17 Interacción entre tipo y contenido de agregado metálico en mezclas sin RAP

| Tipo de agregado metálico | Contenido de agregado metálico [%] | Nivel de reparación [-] | Desviación estándar | N° mediciones |
|---------------------------|------------------------------------|-------------------------|---------------------|---------------|
| Sin metal | 0 | 0.6034 | 0.0883 | 30 |
| Fibra de lana de acero | 1 | 0.5364 | 0.0405 | 30 |
| | 2 | 0.5889 | 0.1283 | 34 |
| | 4 | 0.5253 | 0.1250 | 35 |
| | 6 | 0.5832 | 0.0473 | 33 |
| Viruta metálica | 1 | 0.6600 | 0.0883 | 33 |
| | 2 | 0.5762 | 0.0917 | 32 |
| | 4 | 0.5095 | 0.1134 | 31 |
| | 6 | 0.6371 | 0.0630 | 29 |

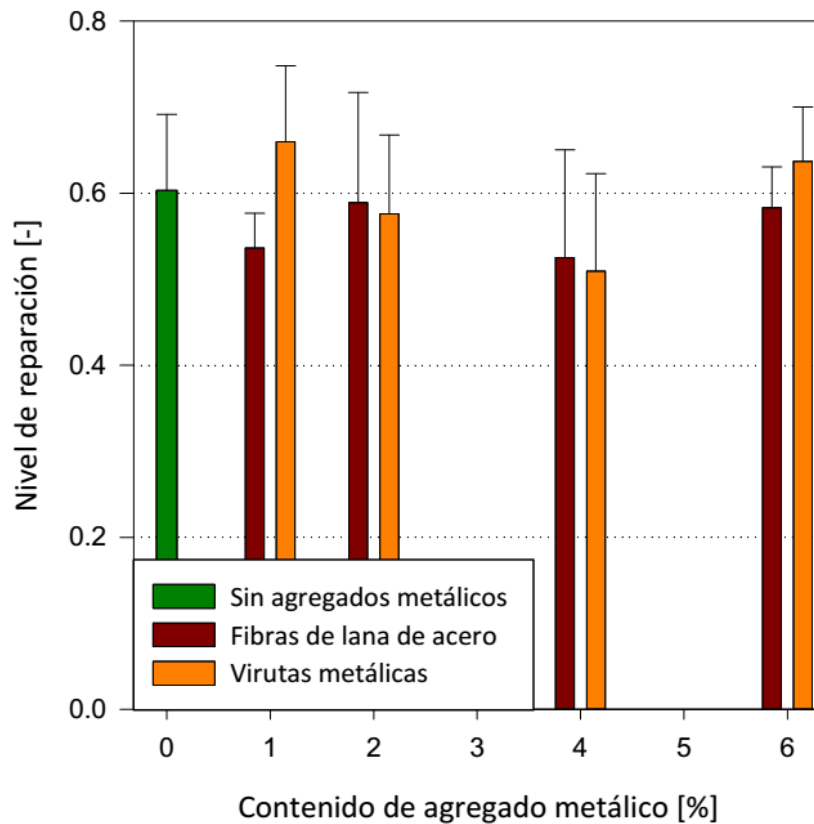


Figura 4-11 Niveles de reparación en función de la interacción tipo y contenido de agregado metálico, en mezclas sin RAP

La variabilidad en los niveles de reparación obtenidos y la ausencia de una tendencia clara pueden deberse a las siguientes razones:

- Al aumentar la cantidad de agregados metálicos, se tienen mayores temperaturas durante la exposición a microondas, siendo algunas cercanas o mayores a la temperatura de inflamación, siendo causa de las disminuciones en el nivel de reparación alcanzado; y
- El aumento de temperatura de las mezclas genera flujo de mezcla asfáltica hacia fuera de la probeta y hacia la hendidura de esta; estos flujos pueden generar una disminución de la sección de falla –al tener flujo hacia fuera, o desprendimiento como muestra la Figura 4-9- disminuyendo la resistencia a flexión, como también generar un aumento de la sección de falla de la probeta –al tener flujo hacia la hendidura- pudiendo aumentar la resistencia a flexión. La ausencia de este confinamiento genera una mayor variabilidad en los resultados luego de las reparaciones.

Al comparar los resultados de mezclas con el mismo contenido de agregados metálicos pueden verse las siguientes variaciones respecto a los niveles de reparación de las mezclas con fibras:

- En mezclas con un 1 [%] de agregados metálicos, se observa que las mezclas con VM presentan un nivel de reparación un 23.0 [%] mayor que las mezclas con FLA;
- En mezclas con un 2 [%] de agregados metálicos, se observa que las mezclas con VM presentan un nivel de reparación un 2.2 [%] menor que las mezclas con FLA;
- En mezclas con un 4 [%] de agregados metálicos, se observa que las mezclas con VM presentan un nivel de reparación un 3.0 [%] menor que las mezclas con FLA; y
- En mezclas con un 6 [%] de agregados metálicos, se observa que las mezclas con VM presentan un nivel de reparación un 9.2 [%] mayor que las mezclas con FLA.

En resumen, en las mezclas que las FLA presentan un mayor nivel de reparación, esta diferencia es menor o igual a 3 [%], mientras que en las mezclas en que las VM presentan un mayor nivel de reparación, esta diferencia asciende hasta un 23 [%].

4.3.6.2 Interacción entre todos los factores evaluados: contenido de RAP y tipo y contenido de agregado metálico

La Tabla 4-18 muestra el valor promedio del nivel de reparación obtenido para cada tipo de mezcla en cada uno de los siete ciclos realizados, indicando en degradación de verde a rojo los valores de reparación desde los más altos a los más bajos, teniéndose como valor medio en esta escala un nivel

de reparación de 0.5142; las figuras: Figura 4-12, Figura 4-13, Figura 4-14, Figura 4-15, Figura 4-16, Figura 4-17, Figura 4-18 y Figura 4-19 muestran los ciclos de reparación obtenidos, separados por contenido de RAP y tipo de agregado metálico, donde la barra de error representa +1 desv. est.

Tabla 4-18 Niveles medios de reparación por tipo de mezcla y ciclo.

| Cont. de RAP | Tipo de Metal | % de metal | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|
| 0 | - | 0 | 0.651 | 0.636 | 0.649 | 0.613 | 0.567 | 0.546 | 0.541 | |
| | | Fibras de Lana de Acero | 1 | 0.526 | 0.579 | 0.536 | 0.503 | 0.550 | 0.544 | 0.519 |
| | | | 2 | 0.492 | 0.625 | 0.631 | 0.561 | 0.622 | 0.610 | 0.588 |
| | | | 4 | 0.545 | 0.544 | 0.543 | 0.527 | 0.523 | 0.508 | 0.487 |
| | | | 6 | 0.635 | 0.619 | 0.596 | 0.587 | 0.567 | 0.538 | 0.532 |
| | Virutas Metálicas | 1 | 0.661 | 0.735 | 0.714 | 0.657 | 0.650 | 0.609 | 0.609 | |
| | | 2 | 0.620 | 0.608 | 0.597 | 0.575 | 0.521 | 0.524 | 0.590 | |
| | | 4 | 0.598 | 0.565 | 0.513 | 0.473 | 0.474 | 0.436 | 0.490 | |
| | | 6 | 0.643 | 0.669 | 0.630 | 0.675 | 0.633 | 0.600 | 0.611 | |
| | | 10 | 0 | 0.438 | 0.486 | 0.489 | 0.499 | 0.507 | 0.409 | 0.418 |
| 10 | Fibras de Lana de Acero | 1 | 0.510 | 0.546 | 0.407 | 0.454 | 0.463 | 0.411 | 0.436 | |
| | | 2 | 0.540 | 0.574 | 0.548 | 0.535 | 0.556 | 0.515 | 0.558 | |
| | | 4 | 0.464 | 0.466 | 0.469 | 0.482 | 0.433 | 0.433 | 0.403 | |
| | | 1 | 0.619 | 0.633 | 0.594 | 0.582 | 0.570 | 0.536 | 0.520 | |
| | Virutas Metálicas | 2 | 0.559 | 0.602 | 0.552 | 0.562 | 0.543 | 0.499 | 0.486 | |
| | | 4 | 0.334 | 0.387 | 0.423 | 0.418 | 0.422 | 0.402 | 0.386 | |
| | | 20 | 0 | 0.266 | 0.331 | 0.482 | 0.429 | 0.399 | 0.341 | 0.336 |
| 20 | Fibras de Lana de Acero | 1 | 0.469 | 0.529 | 0.525 | 0.510 | 0.411 | 0.332 | 0.447 | |
| | | 2 | 0.326 | 0.390 | 0.398 | 0.328 | 0.348 | 0.303 | 0.306 | |
| | | 4 | 0.681 | 0.678 | 0.628 | 0.599 | 0.594 | 0.481 | 0.465 | |
| | | 1 | 0.490 | 0.529 | 0.490 | 0.475 | 0.510 | 0.484 | 0.447 | |
| | Virutas Metálicas | 2 | 0.480 | 0.620 | 0.628 | 0.615 | 0.597 | 0.550 | 0.538 | |
| | | 4 | 0.555 | 0.616 | 0.578 | 0.560 | 0.522 | 0.475 | 0.491 | |
| | | 30 | 0 | 0.359 | 0.446 | 0.490 | 0.464 | 0.474 | 0.485 | 0.346 |
| | | 30 | Fibras de Lana de Acero | 1 | 0.494 | 0.513 | 0.526 | 0.488 | 0.539 | 0.510 |
| 2 | 0.442 | | | 0.479 | 0.482 | 0.469 | 0.492 | 0.491 | 0.466 | |
| 4 | 0.510 | | | 0.516 | 0.504 | 0.470 | 0.486 | 0.437 | 0.462 | |
| 1 | 0.666 | | | 0.619 | 0.666 | 0.607 | 0.565 | 0.529 | 0.588 | |
| Virutas Metálicas | 2 | | 0.313 | 0.428 | 0.435 | 0.440 | 0.463 | 0.445 | 0.459 | |
| | 4 | | 0.315 | 0.388 | 0.509 | 0.520 | 0.527 | 0.522 | 0.495 | |

Gracias a los valores, y colores mostrados, puede apreciarse que los mayores niveles de reparación se tienen en mezclas sin RAP y, dentro de estas mezclas, los mayores resultados se obtienen en las mezclas con un 1 [%] de virutas metálicas. Por otro lado, la menor cantidad de recuadros verdes – menores niveles de reparación obtenidos- se ve en mezclas con 30 [%] de RAP (muestra de la disminución de los niveles de reparación con el aumento de la cantidad de RAP en las mezclas), pero los niveles más bajos obtenidos por una mezcla en un ciclo se tienen en las mezclas con 20 [%] de RAP. Además, se observa gran diferencia en los niveles de reparación obtenidos en mezclas sin RAP y con 10 [%] de RAP, en comparación a las mezclas con 20 [%] y 30 [%] de RAP, observándose una notoria disminución de los niveles de reparación entre mezclas con 10 [%] y 20 [%] de RAP.

Además, en la tabla se destaca con letra en negrita el tipo de agregado metálico que genera mayores niveles de reparación media para cada contenido de RAP y el contenido de agregado metálico con el que se obtienen los mejores niveles de reparación. Puede observarse que solo en mezclas con 30 [%] de RAP el valor promedio de reparación es mayor en mezclas con fibras de lana de acero que con virutas metálicas, como se indica en la sección 4.3.4.1, pero el mejor nivel de reparación se obtiene en mezclas con un 1 [%] de virutas metálicas.

En resumen, los mejores niveles de reparación por tipo de contenido de RAP se obtuvieron con:

- 1 [%] de virutas metálicas en mezclas sin RAP;
- 1 [%] de virutas metálicas en mezclas con 10 [%] de RAP;
- 4 [%] de fibras de lana de acero en mezclas con 20 [%] de RAP; y
- 1 [%] de virutas metálicas en mezclas con 30 [%] de RAP.

Como comentario final, no se observa una tendencia clara, e.g. lineal, al observar la interacción entre los factores (no se puede generar una grilla con el contenido de RAP en un sentido y el contenido de uno de los agregado metálico en el otro sentido y realizar una interpolación entre valores extremos); esto puede deberse a factores de la confección, como variaciones debido a tener un mezclado manual, diferencias de temperatura ambiental al momento de la confección de las probetas, variación en la cantidad y distribución de racimos (en el caso de las fibras); y a factores de realización de los ciclos de reparación, como el ancho de la grieta de la probeta en cada ciclo de flexión (qué tanto tiempo se dejó la probeta sometida a carga una vez alcanzada la carga máxima), la presión ejercida por las cintas (utilizadas para asegurar el contacto de las superficies de las grietas)

al momento de exponer las probetas a microondas, entre otros. Sin embargo, se demuestra que las mezclas asfálticas con materiales reciclados tienen la capacidad de autorrepararse.

Mezclas sin RAP y con fibras de lana de acero

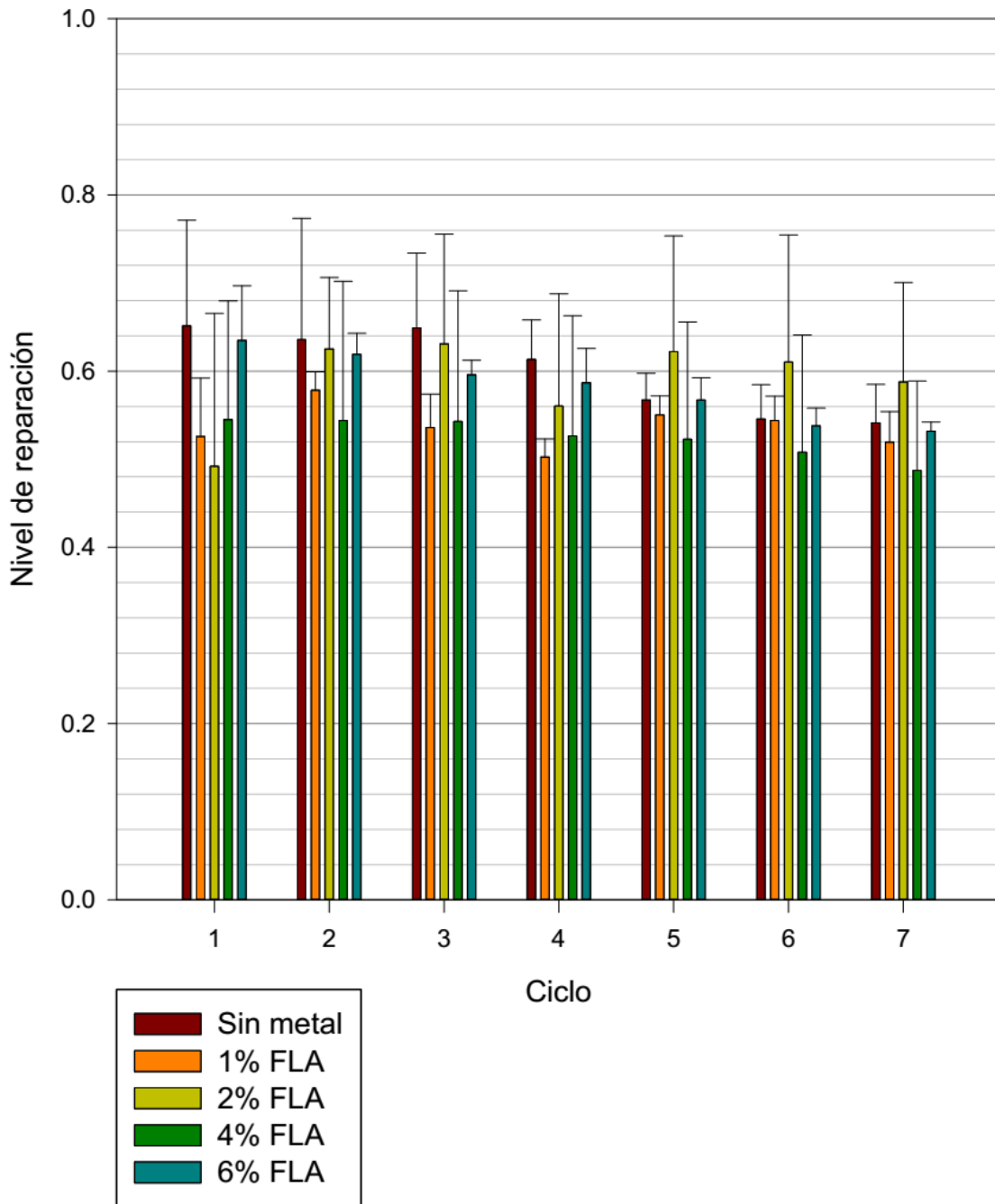


Figura 4-12 Ciclos de reparación de mezclas sin RAP y con FLA

Mezclas sin RAP y con virutas metálicas

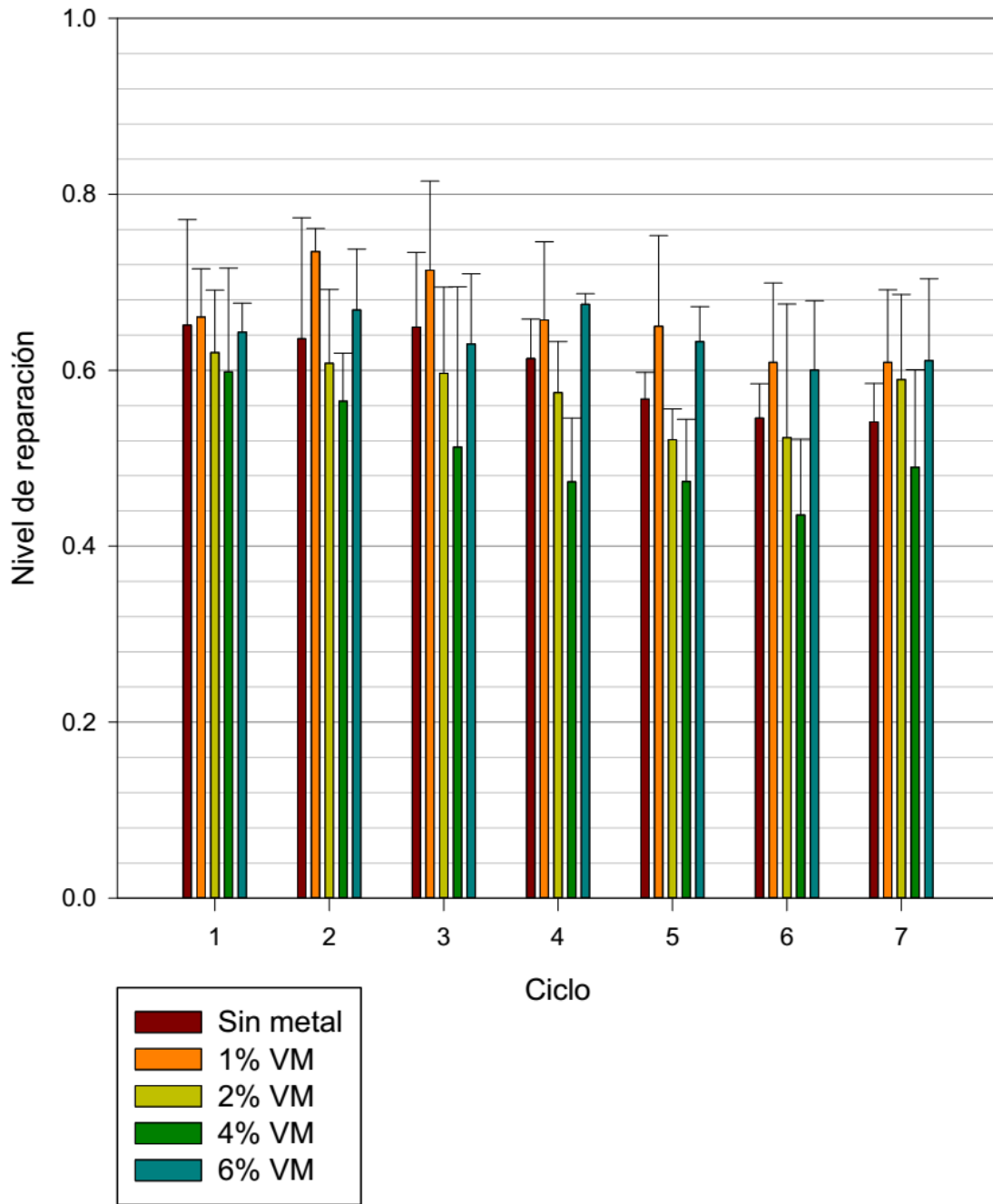


Figura 4-13 Ciclos de reparación de mezclas sin RAP y con VM

Mezclas con 10% RAP y con fibras de lana de acero

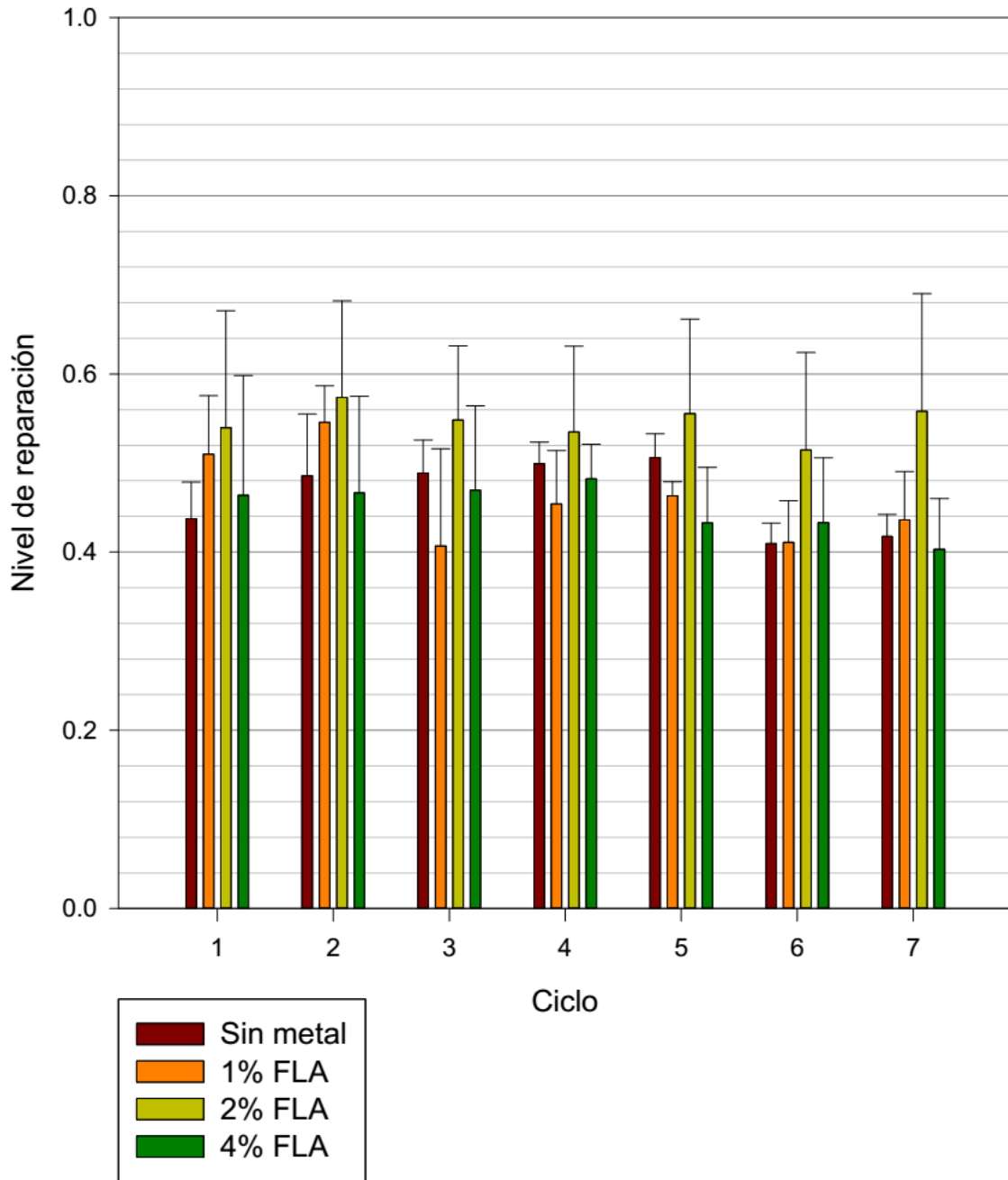


Figura 4-14 Ciclos de reparación de mezclas con 10% de RAP y con FLA

Mezclas con 10% RAP y virutas metálicas

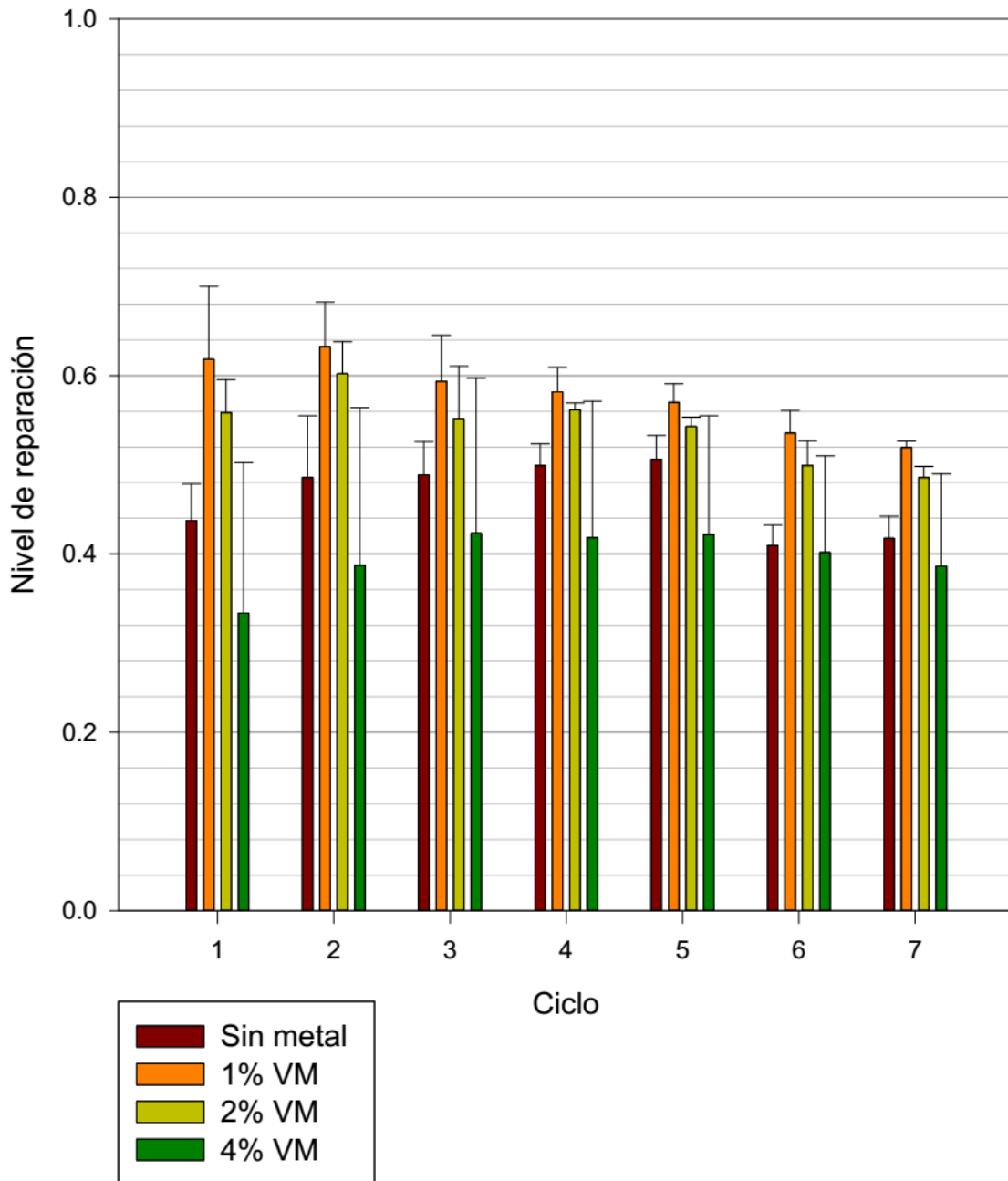


Figura 4-15 Ciclos de reparación de mezclas con 10% de RAP y con VM

Mezclas con 20% RAP y fibras de lana de acero

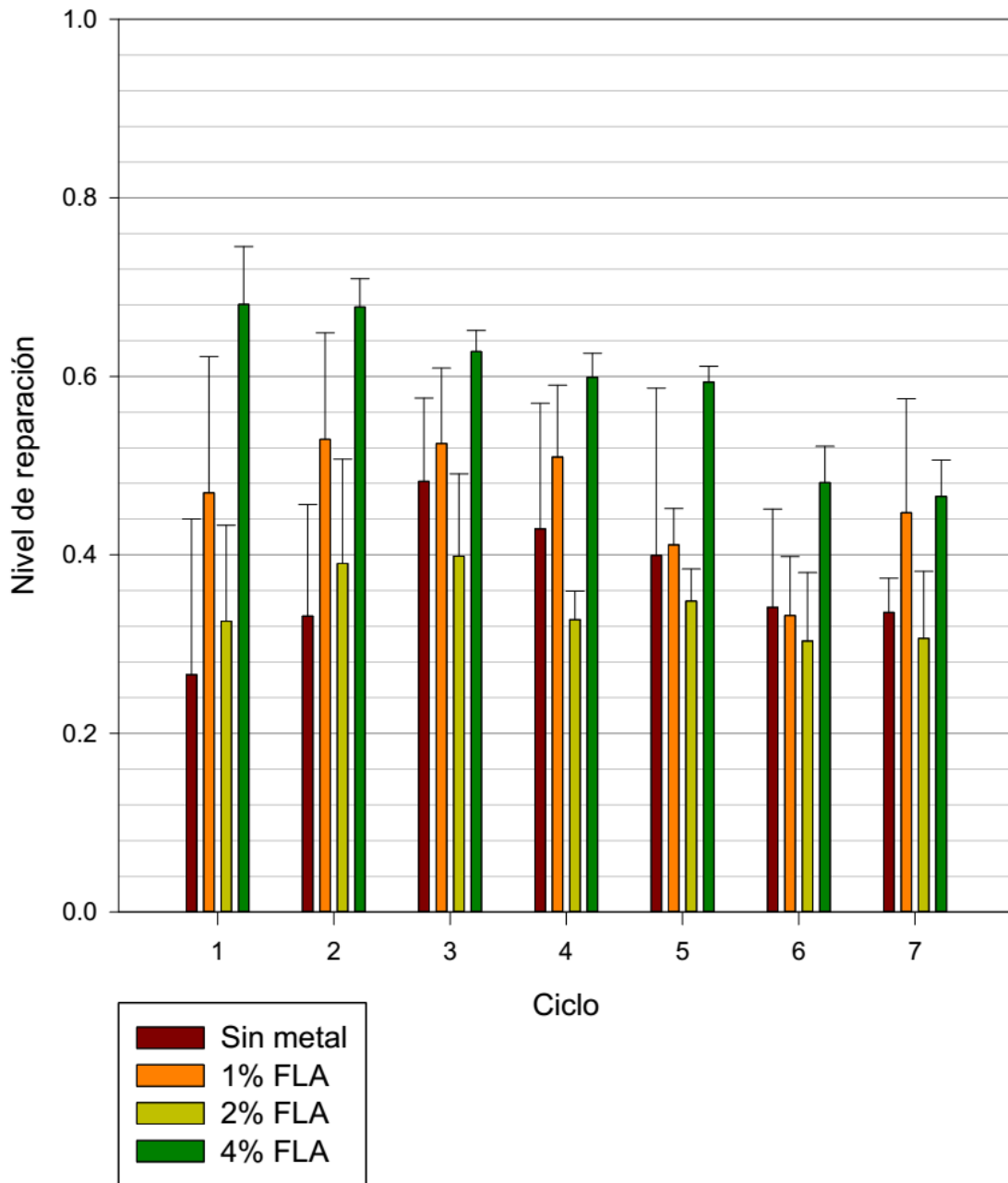


Figura 4-16 Ciclos de reparación de mezclas con 20% de RAP y con FLA

Mezclas con 20% RAP y virutas metálicas

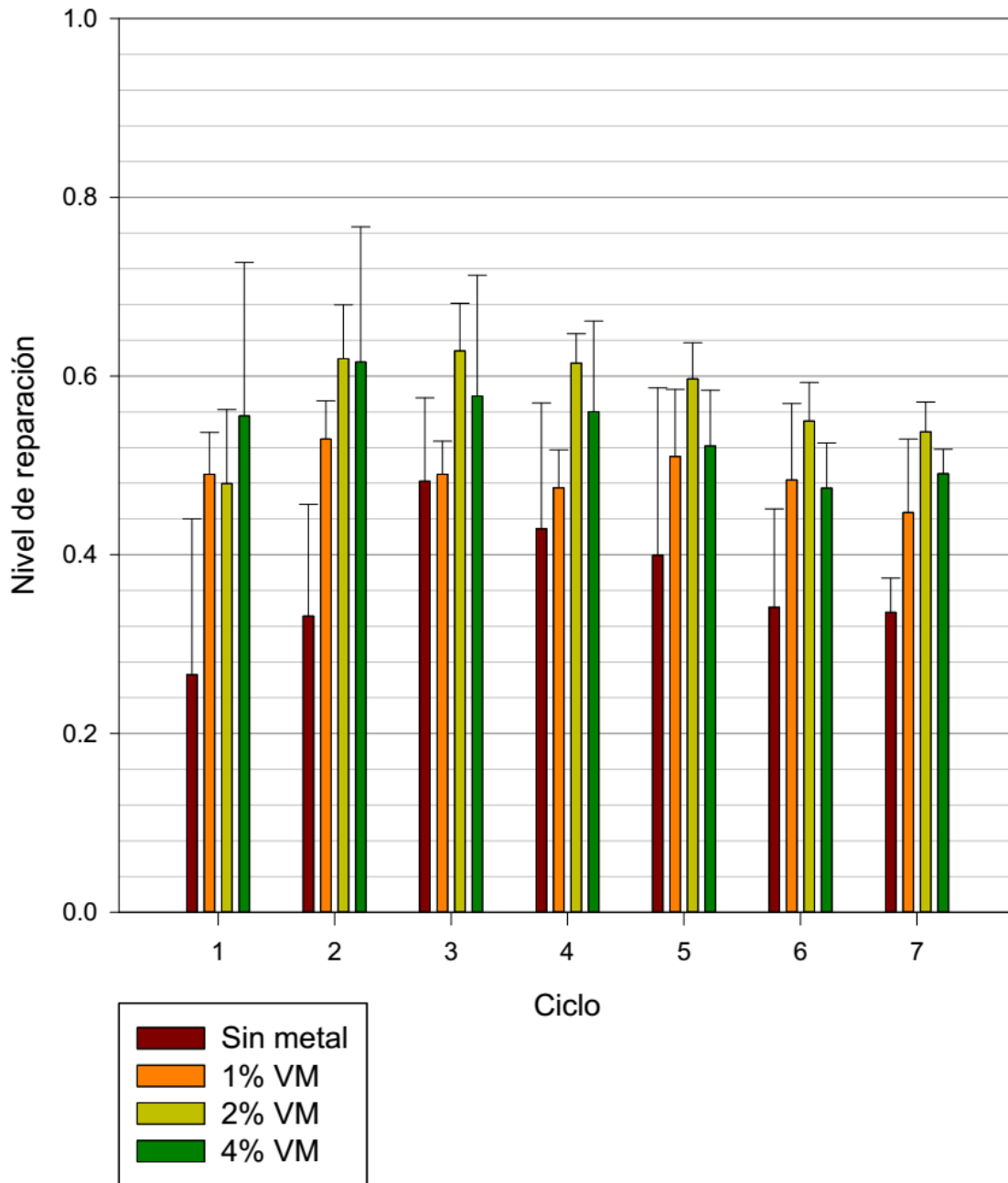


Figura 4-17 Ciclos de reparación de mezclas con 20% de RAP y con VM

Mezclas con 30% RAP y fibras de lana de acero

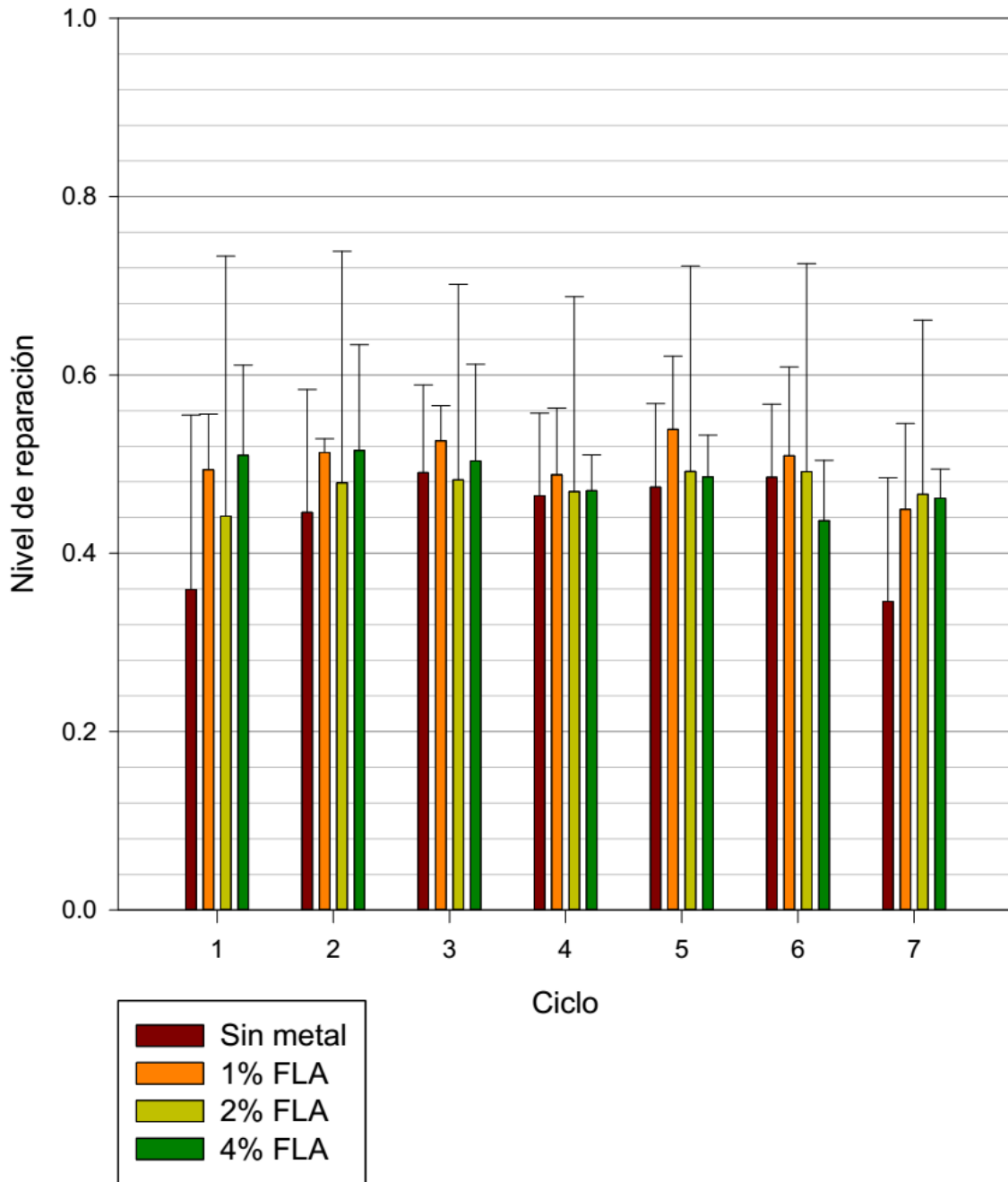


Figura 4-18 Ciclos de reparación de mezclas con 30% de RAP y con FLA

Mezclas con 30% RAP y virutas metálicas

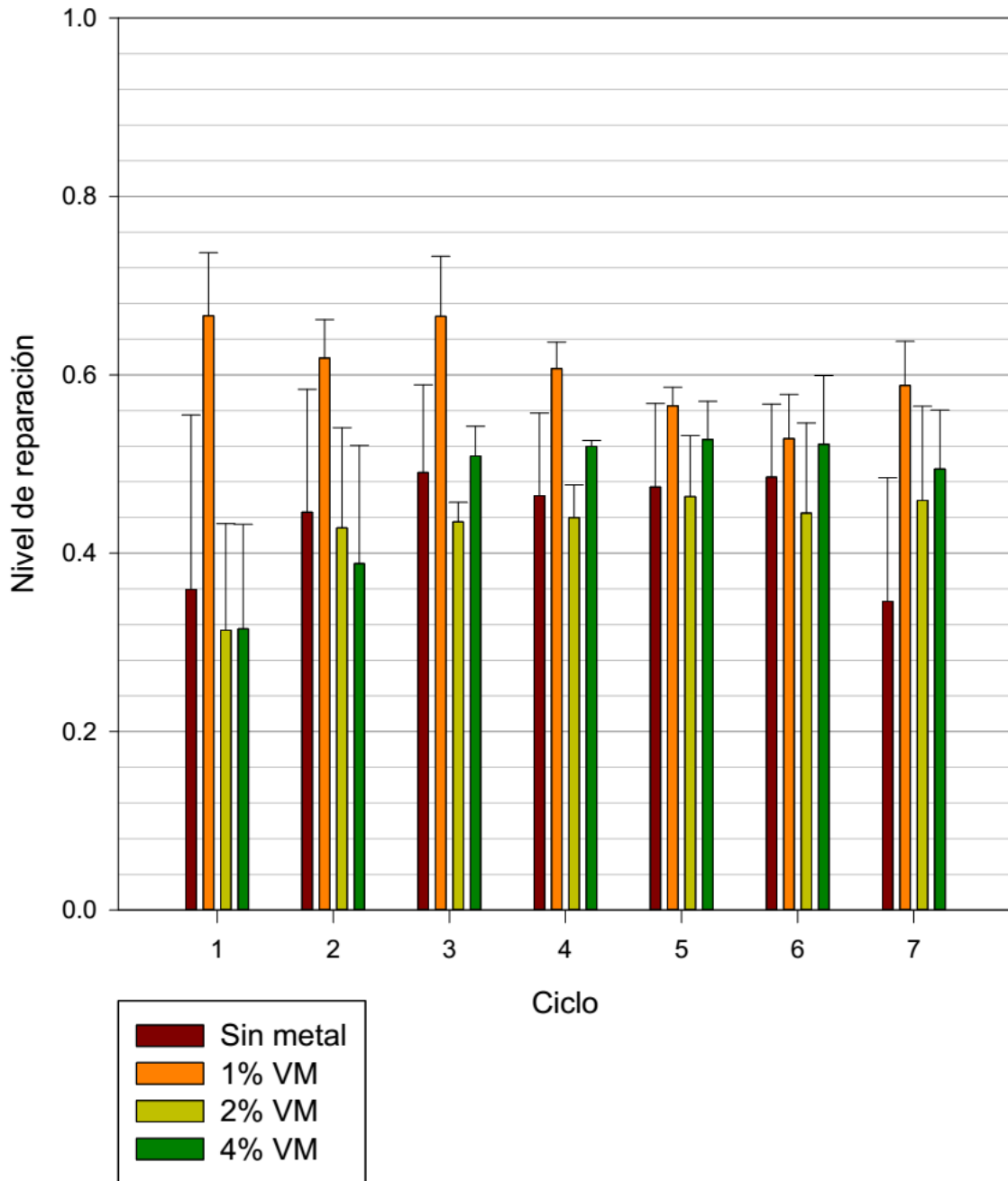


Figura 4-19 Ciclos de reparación de mezclas con 30% de RAP y con VM

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Esta investigación ha analizado los efectos de la adición de cemento asfáltico reciclado, fibras de lana de acero y virutas metálicas sobre propiedades físicas y mecánicas y sobre la capacidad de autorreparación en mezclas asfálticas. A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas:

- El uso de RAP en las mezclas asfálticas no presenta un efecto claro sobre la densidad aparente y muestra una tendencia a disminuir el contenido de vacíos de aire de mezclas asfálticas.
- El uso de fibras de lana de acero y virutas metálicas genera una disminución de la densidad aparente y un aumento del contenido de vacíos de aire, variaciones que son proporcionales a la cantidad de agregado metálico utilizado. Este aumento del contenido de vacíos de aire podría generar problemas de desempeño.
- En mezclas con virutas metálicas se tienen menores valores de densidad aparente y mayores valores de contenido de vacíos de aire que en mezclas con fibras de lana de acero.
- La adición de RAP a las mezclas asfálticas genera un aumento de la rigidez de las mezclas, producto del envejecimiento del cemento asfáltico.
- La adición de fibras de lana de acero y virutas metálicas genera una disminución de la rigidez de las mezclas asfálticas, teniéndose menores valores del módulo de rigidez en mezclas con fibras de lana de acero que con virutas metálicas.
- La adición de fibras de lana de acero y virutas metálicas a las mezclas asfálticas no modifica el comportamiento isotrópico de estas.
- La adición de RAP genera una disminución de los niveles de reparación de las mezclas asfálticas, además de una reparación menos homogénea.
- En mezclas con fibras de lana de acero, se obtienen los mayores valores de reparación en mezclas con 1 [%] y 4 [%] de agregado metálico, teniéndose una reparación más homogénea en mezclas con 1 [%] de agregado.
- En mezclas con virutas metálicas, la cantidad óptima de virutas metálicas es 1 [%], ya que entrega mayores valores de reparación junto con reparaciones más homogéneas.

- La adición de agregados metálicos –fibras de lana de acero y virutas metálicas- genera mayores valores de reparación en las mezclas asfálticas, junto con reparaciones más homogéneas a nivel global; las mezclas con virutas metálicas entregan mejores resultados de reparación que las mezclas con fibras de lana de acero.
- La capacidad de autorreparación de las mezclas asfálticas aumenta en los dos primeros ciclos y disminuye a partir del tercer ciclo; la reparación de las mezclas se hace más homogénea con el paso de cada ciclo.
- Por contenido de RAP, en las mezclas asfálticas sin RAP y con 10 [%] y 30 [%] de RAP el mejor nivel de reparación se obtiene en mezclas con un 1 [%] de virutas metálicas; mientras que el mejor nivel de reparación en mezclas con 20 [%] de RAP se obtiene en mezclas con 4 [%] de fibras de lana de acero, seguido por las mezclas con 2 [%] y 4 [%] de virutas metálicas.
- En mezclas sin RAP, solo se obtuvo valores medios de reparación mayores a las mezclas sin agregados metálicos en las mezclas asfálticas con 1 [%] y 6 [%] de virutas metálicas.
- De forma global, la mezcla con la que se obtiene el mejor nivel de reparación es la que contiene un 1 [%] de virutas metálicas y no contiene RAP, con un nivel de reparación medio de 0,66.
- La capacidad de autorreparación se ve mejorada con una pequeña cantidad de agregados metálicos, debido a que esta capacidad depende del contenido de vacíos de aire de las mezclas, el cual aumenta con el aumento del metal agregado.
- Finalmente, puede concluirse que sí es posible realizar mezclas con materiales reutilizados que tengan la capacidad de autorrepararse: se obtienen mejores resultados con las virutas metálicas (metal reutilizado), y buenos resultados al utilizar bajos niveles de RAP.

5.2 Recomendaciones

- En mezclas con contenidos de FLA mayores a 1%, estas se aglomeran considerablemente si se agregan todas juntas al cemento asfáltico, por lo que se deben agregar las fibras de manera paulatina, a medida que se mezcla el cemento asfáltico con los áridos.
- Desde el punto de vista de la confección de las probetas, resulta más fácil realizar las mezclas con virutas metálicas que las mezclas con fibras de lana de acero, debido a que las virutas no se aglomeran y se pueden agregar todas al comenzar a mezclar, independiente del contenido de virutas, en vez de agregarlas por partes. Si se considera la confección de

mezclas a mayor nivel, esto facilitaría la producción de mezclas asfálticas con agregados metálicos.

- La presencia de la hendidura central genera diferentes variaciones en las probetas al realizar los ciclos. Algunas probetas quedaron con la hendidura tapada –parcial y completamente– debido a flujo de cemento asfáltico, mientras que otras permanecieron con la hendidura sin variaciones, pudiendo generar diferencias en los valores de reparación obtenidos, debido al cambio en la sección transversal. Esto no ocurriría en vías reales, ya que no se tendrían estas hendiduras.
- Debido al flujo del cemento asfáltico por los costados de las probetas y por la hendidura, se podría evaluar la reparación en probetas que no tengan la opción de deformarse hacia los lados (simulando confinamiento), como puede verse en la Figura 4-9, con el propósito de evaluar si los ciclos de flexión-reparación generan una deformación superficial de las mezclas. Además, podría evaluarse el nivel de reparación sin la hendidura central, para simular las condiciones reales en que no se tiene hendiduras iniciales en las mezclas y para no generar una zona débil en la probeta.
- Debido a la influencia de las densidades de los materiales utilizados en las mezclas en el contenido de vacíos de aire (CVA), se recomienda tener un control adecuado de estos en siguientes investigaciones.

6 REFERENCIAS

- Ayar, P., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. (2016). The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review. *Journal of Cleaner Production*(113), 28-40. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.034>
- Cámara Chilena de la Construcción. (2016). *Infraestructura crítica para el desarrollo. Bases para un Chile sostenible 2016-2025*.
- Colbert, B., & You, Z. (2012). The properties of asphalt binder blended with variable quantities of recycled asphalt using short term and long term aging simulations. *Construction and Building Materials*(26), 552-557. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.057
- CSN. (2012). Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Stiffness.
- D'Angelo, M. (7 de mayo de 2018). *Self-Healing Asphalt Still Trying to Crack Into the World's Infrastructure Systems*. Recuperado el 19 de agosto de 2019, de www.business.com: <https://www.business.com/articles/self-healing-potholes-road-highway-asphalt/>
- Delgadillo S., R. (Septiembre de 2014). Apunte de clase de Laboratorio Vial: química del betún asfáltico. Valparaíso.
- Dirección de Aeropuertos. (2014). Especificaciones técnicas generales para pavimentos bituminosos tipo mezcla en planta. Ministerio de Obras Públicas, Departamento de Ingeniería.
- Dirección de Vialidad. (2014). *Red Vial Nacional Dimensionamiento y Características*. Ministerio de Obras Públicas, Departamento de Gestión Vial, Subdirección de Desarrollo.
- EAPA, E. A. (5 de Noviembre de 2017). Obtenido de <http://www.eapa.org/asphalt.php>
- García, Á. (2012). Self-healing of open cracks in asphalt mastic. *Fuel*, 264-272. doi:10.1016/j.fuel.2011.09.009
- García, A., Schlangen, E., & Van de Ven, M. (2009). Two Ways of Closing Cracks on Asphalt Concrete Pavements: Microcapsules and Induction Heating. *Key Ingeneering Materials*, 573-576.
- García, Á., Schlangen, E., & van de Ven, M. (2011). Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Fuel*, 583-591. doi:doi:10.1016/j.fuel.2010.09.033
- Gizmodo. (11 de julio de 2017). Obtenido de <http://gizmodo.com/what-actually-happens-when-you-put-metal-in-a-microwave-1569906393>
- Gómez-Meijide, B., Ajam, H., Lastra-González, P., & García, Á. (2018). Effect of ageing and RAP content on the induction healing properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 468-476. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.121>
- González, Á., Norambuena-Contreras, J., Storey, L., & Schlangen, E. (2018a). Effect of RAP and fibers addition on asphalt mixtures with self-healing properties gained by microwave radiation heating. *Construction and Building Materials*, 164-174. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.070>

- González, Á., Norambuena-Contreras, J., Storey, L., & Schlangen, E. (2018b). Self-healing properties of recycled asphalt mixtures containing metal waste: An approach through microwave radiation heating. *Journal of Environmental Management*, 242-251. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.001>
- Guthrie, W., Cooley, D., & Eggett, D. (2007). Effects of Reclaimed Asphalt Pavement on Mechanical Properties of Base Materials. *Journal of the Transportation Research Board*, 44-52.
- Huang, B., Li, G., Vukosavljevic, D., Shu, X., & Egan, B. (2005). Laboratory investigation of mixing hot-mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record(1929)*, 37-45. doi:<http://dx.doi.org/10.3141/1929-05>
- Laboratorio Nacional de Vialidad. (2016). Mezcla asfáltica en caliente con pavimento asfáltico recuperado RAP. Chile: Ministerio de Obras Públicas.
- Lin, L., & Sherman, P. (2007). Cleaning Data the Chauvenet Way. *SESUG 2007: The Proceedings of the Southeast SAS User Group*.
- Liu, Q., García, Á., Schlangen, E., & Van de Ven, M. (2011). Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials(25)*, 3746-3752. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.016
- Menozi, A., Garcia, A., Partl, M. N., Tebaldi, G., & Schuetz, P. (2015). Induction Healing of fatigue damage in asphalt test samples. *Construction and Building Materials*, 162-168.
- Micaelo, R., Al-Mansoori, T., & García, Á. (2016). Effect of capsules containing sunflower oil on the mechanical behaviour of aged asphalt mixture.
- MOP. (2016a). Manual de carreteras, volumen 5, Especificaciones Técnicas Generales de Construcción - 5.408 Mezclas Asfálticas en Caliente.
- MOP. (2016b). Manual de carreteras, volumen 8, Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control, 8.301.1 Asfaltos: especificaciones para cementos asfálticos según grado de viscosidad. Santiago.
- MOP. (2016c). Manual de carreteras, volumen 8, Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control, 8.302.47 Asfaltos: Método de diseño Marshall. Santiago.
- Norambuena-Contreras, J., & Concha, J. (2016). Self-Healing Of Asphalt Mixtures via Microwave Heating.
- Norambuena-Contreras, J., & García, Á. (2016). Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. *Materials and Design*, 404-4014.
- Norambuena-Contreras, J., & González-Torre, I. (2017). Influence of the Microwave Heating Time on the Self-Healing Properties of Asphalt Mixtures. *Applied sciences*.
- Norambuena-Contreras, J., Serpell, R., Valdés Vidal, G., González, Á., & 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*, 369-382. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.005>

- Pradyumna, T. A., Mittal, A., & Jain, P. K. (2013). Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 1149-1157. doi:doi: 10.1016/j.sbspro.2013.11.211
- Riffo, M. (2016). *Evaluación del comportamiento mecánico y de auto-reparación de mezclas asfálticas reforzadas con fibras metálicas*. Concepción.
- Schlangen, E., & Sangadji, S. (2013). Addressing infrastructure durability and sustainability by self healing mechanisms - Recent advances in self healing concrete and asphalt. *Procedia Engineering*, 54, 39-57. doi:10.1016/j.proeng.2013.03.005
- U. S. Department of Transportation. (2011a). *Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: state of the practice*. USA.
- U.S. Department of Transportation. (2011b). Advisory Circular No 150/5370-10F - Standards for Specifying Construction of Airports.

ANEXOS

ANEXO A

CARACTERIZACIÓN DE ÁRIDOS VÍRGENES Y ÁRIDOS PROVENIENTES DEL RAP

Caracterización de fracción gruesa de áridos vírgenes y áridos del RAP.

| Característica | Áridos vírgenes | | RAP 3/4" |
|---|-----------------|--------------|--------------|
| | Grava 3/4" | Grava 1/2" | |
| Densidad real seca [kg/m ³] | 2.690 | 2.680 | 2.547 |
| Densidad aparente suelta [kg/m ³] | 1.470 | 1.445 | 1.370 |
| Densidad real neta [kg/m ³] | 2.760 | 2.770 | 2.601 |
| Partículas chancadas [%] | 99 | 100 | 99 |
| Partículas lajeadas [%] | 1 | 1 | 1 |
| Desgaste de Los Ángeles [%] | 16 (grado 5) | 15 (grado 6) | 15 (grado 6) |
| Desintegración en sulfato de sodio | 0.9 | 0.9 | 0.8 |
| Adherencia método estático | +95 | +95 | +95 |
| Adherencia método dinámico | +95 | +95 | +95 |

Caracterización de fracción fina de áridos vírgenes y áridos del RAP.

| Característica | Polvo Roca | RAP 3/8" |
|---|----------------|--------------|
| Densidad real seca [kg/m ³] | 2.646 | 2.461 |
| Densidad aparente suelta [kg/m ³] | 1.620 | 1.290 |
| Densidad real neta [kg/m ³] | 2.750 | 2.545 |
| Partículas chancadas [%] | 100 | 100 |
| Partículas lajeadas [%] | 0 | 1 |
| Adherencia Riedel-Weber | 2-7 | - |
| Sales solubles [%] | No se detectan | - |
| Desintegración en sulfato de sodio | 1.2 | - |
| Equivalente de arena [%] | 61 | - |
| Desgaste de Los Ángeles [%] | 18 (grado 7) | 16 (grado 7) |
| Índice de plasticidad | NP | NP |

ANEXO B

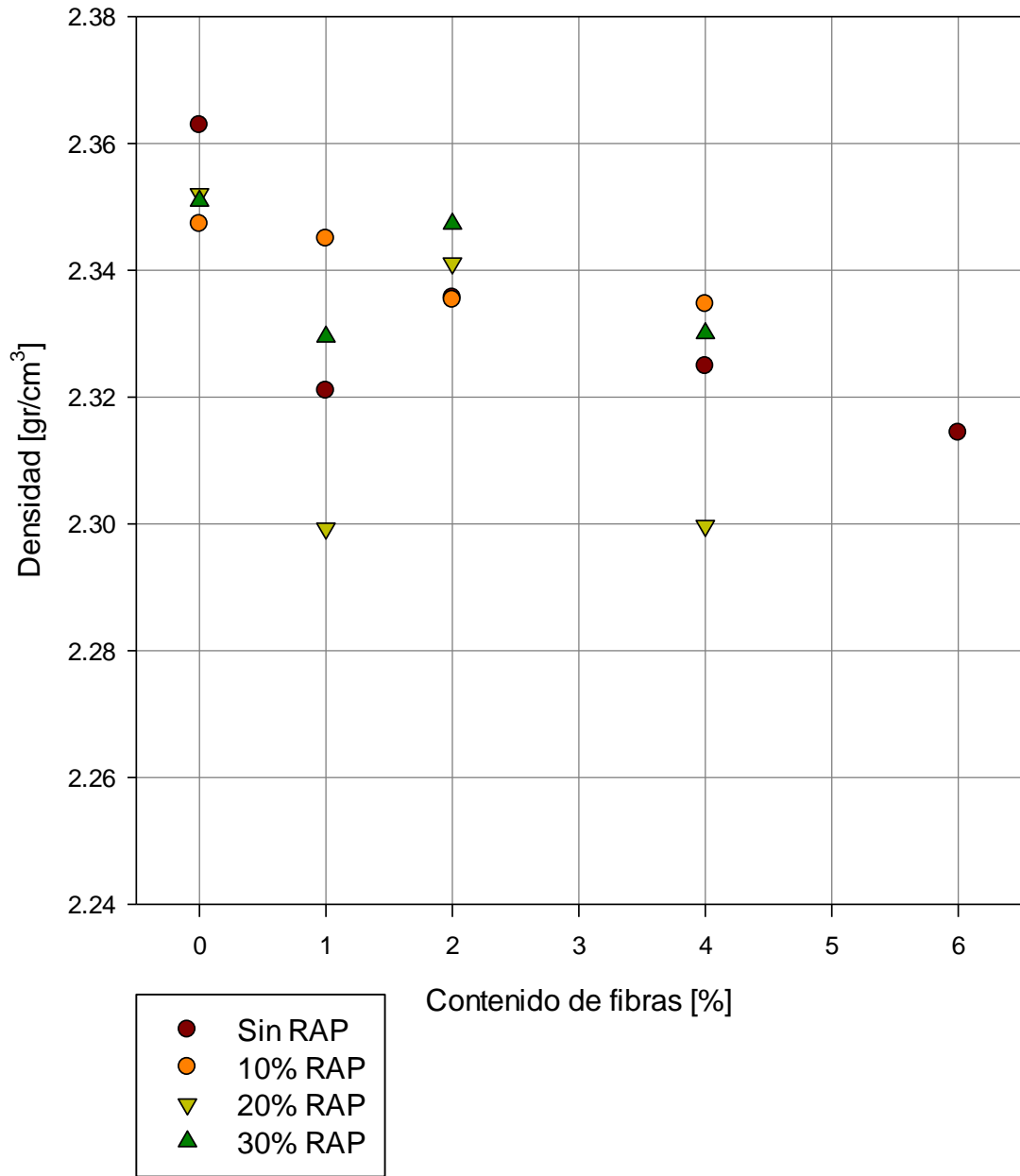
CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁTICO VIRGEN

| Ensayo | RESULTADOS | ESPECIFICACIONES |
|--|-------------------|-------------------------|
| Viscosidad Absoluta a 60 °C [Poises] | 2960 | Mín. 2400 |
| Penetración 25 °C, 100g, 5s [0.1mm] | 64 | Mín. 40 |
| Punto de ablandamiento [°C] | 50.5 | Informar |
| Punto de inflamación [°C] | +232 | Mín. 232 |
| Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min. [cm] | +150 | Mín. 100 |
| Ensaye de la mancha [%, Xilol] | -25 | Máx. 30 |
| Solubilidad en Tricloroetileno [%] | +99 | Mín. 99 |
| Índice de penetración | -0.2 | -2.0 a +1.0 |
| Residuo después de Película Delgada Rotatoria | | |
| Pérdida por calentamiento [%] | -0.01 | Máx. 0.8 |
| Viscosidad Absoluta a 60 °C [Poises] | 8436 | Informar |
| Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min. [cm] | +150 | Mín. 100 |
| Índice de durabilidad | 2.85 | Máx. 4.0 |
| OTROS | | |
| Temperatura de Mezclado [°C] | 153+-5 | Informar |
| Temperatura de Compactación [°C] | 145+-10 | Informar |

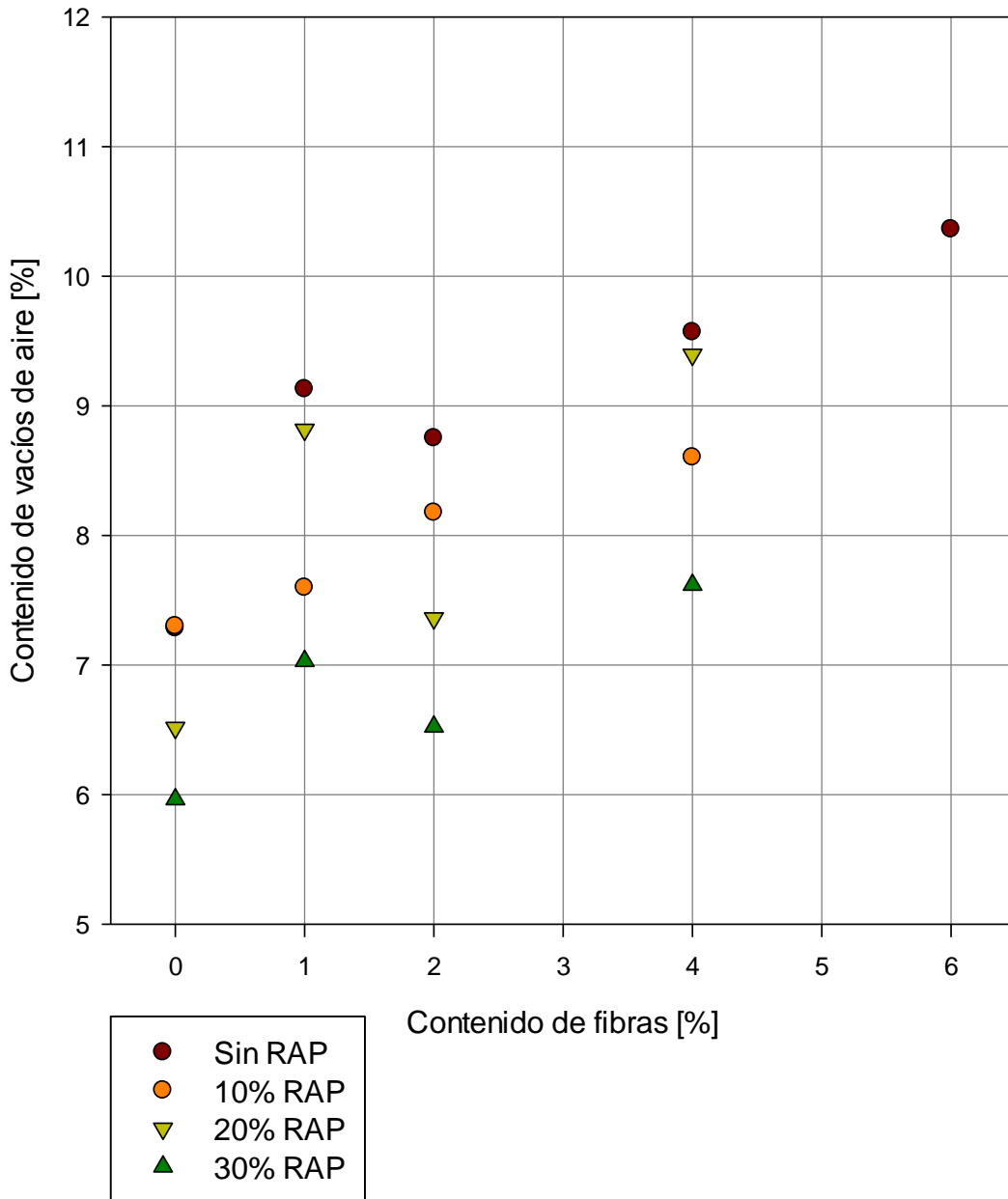
ANEXO C

GRÁFICOS DE CONTENIDOS DE VACÍOS DE AIRE Y DENSIDADES APARENTES

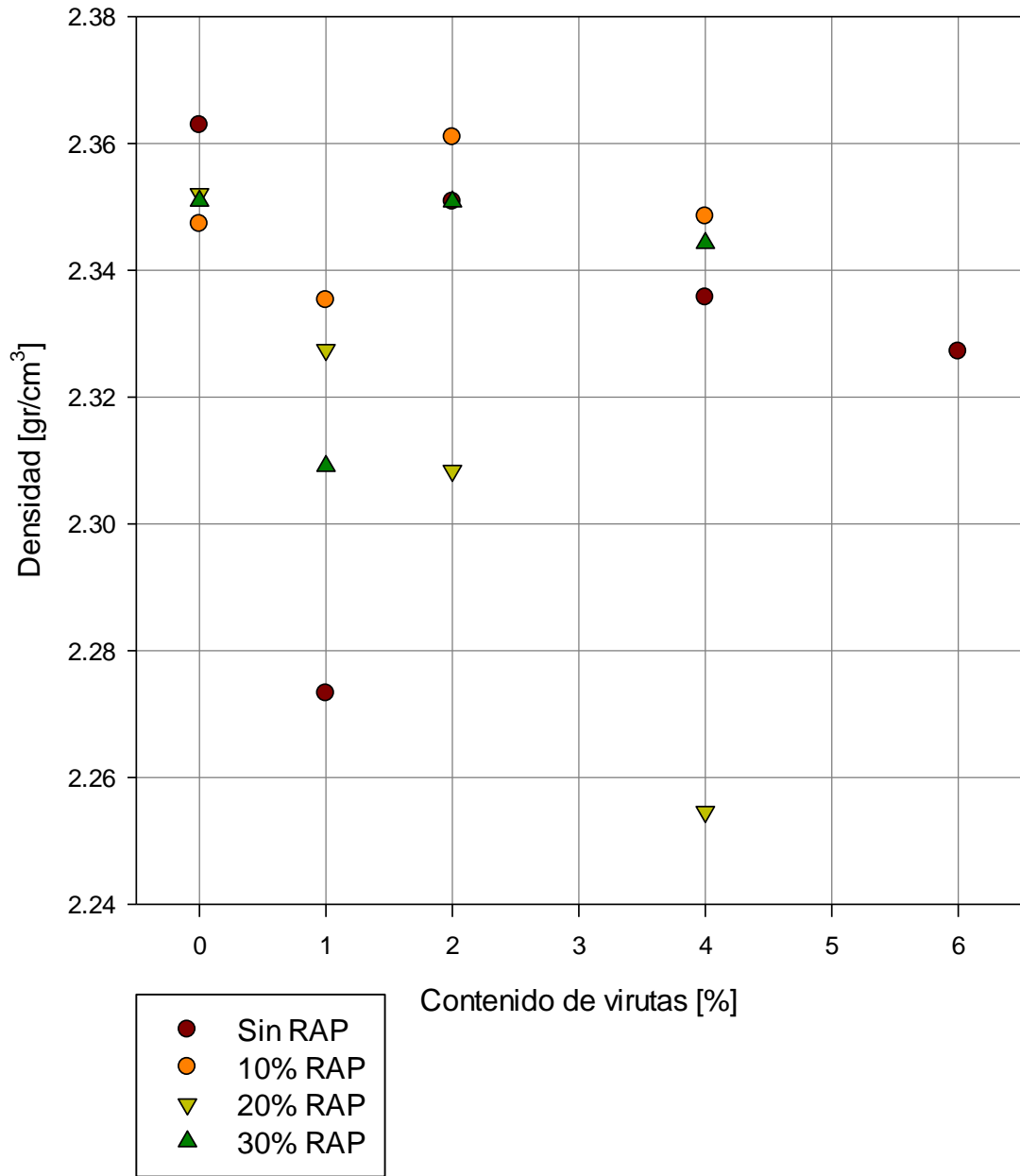
Densidad aparente de mezclas con fibras de lana de acero



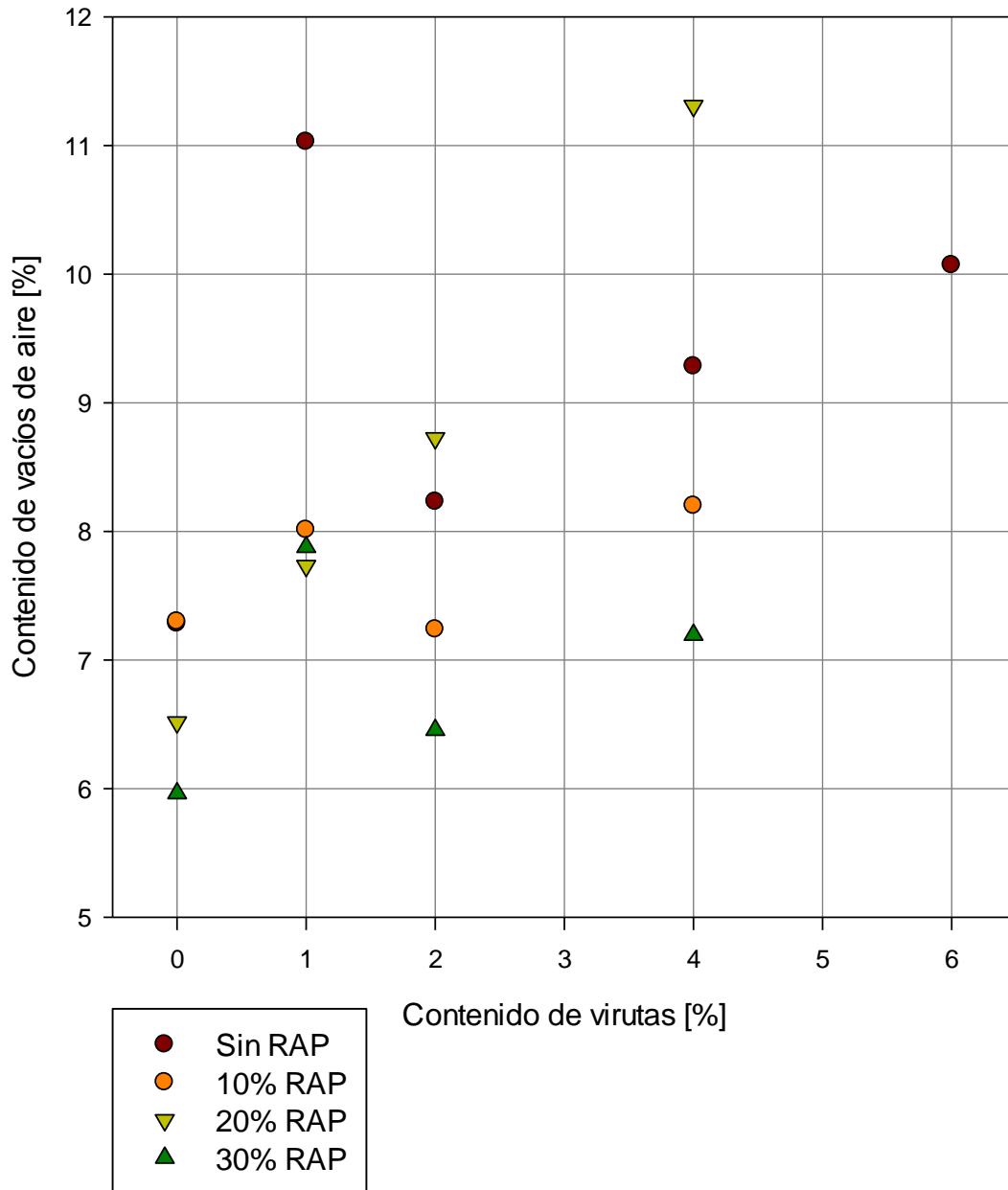
Contenido de Vacíos de Aire en mezclas con fibras de lana de acero



Densidad aparente de mezclas con virutas metálicas



Contenido de Vacíos de Aire en mezclas con virutas metálicas



ANEXO D

VALORES DE MÓDULOS DE RIGIDEZ A TRACCIÓN INDIRECTA

| Contenido de RAP | Tipo de agregado metálico | Número de probeta | Temperatura 10 [°C] | | Temperatura 20 [°C] | | Temperatura 30 [°C] | | Temperatura 40 [°C] | |
|------------------|---------------------------|-------------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|
| | | | Valor en eje 1 | Valor en eje 2 | Valor en eje 1 | Valor en eje 2 | Valor en eje 1 | Valor en eje 2 | Valor en eje 1 | Valor en eje 2 |
| 0 | Sin metal | 1 | 10013 | 9691 | 3834 | 3693 | 1541 | 1613 | 623 | 624 |
| | | 2 | 10030 | 10144 | 3795 | 3606 | 1480 | 1447 | 549 | 562 |
| | Fibras de lana de acero | 1 | 8074 | 7567 | 2721 | 2716 | 1212 | 1170 | 459 | 451 |
| | | 2 | 7537 | 7531 | 2329 | 2231 | 956 | 941 | 368 | 367 |
| | Virutas metálicas | 1 | 10212 | 9723 | 3123 | 3011 | 1641 | 1662 | 510 | 521 |
| | | 2 | 7549 | 7588 | 2506 | 2388 | 1202 | 1094 | 406 | 424 |
| 10 | Fibras de lana de acero | 1 | 10546 | 10456 | 3888 | 3674 | 1303 | 1252 | 451 | 410 |
| | | 2 | 11364 | 10757 | 3973 | 3689 | 1570 | 1469 | 551 | 544 |
| | Virutas metálicas | 1 | 9454 | 9899 | 4427 | 4377 | 1818 | 1542 | 574 | 521 |
| | | 2 | 10395 | 9745 | 4607 | 4383 | 2052 | 1856 | 681 | 659 |
| 20* | Fibras de lana de acero | 1 | 12312 | 11654 | 4338 | 4281 | 1996 | 1896 | 771 | 744 |
| | | 2 | 9650 | 9765 | 4359 | 4111 | 1536 | 1519 | 626 | 584 |
| | Virutas metálicas | 1 | 10817 | 9778 | 5177 | 5267 | 2031 | 1895 | 836 | 741 |
| | | 2 | 8224 | 7882 | 3617 | 3426 | 1390 | 1290 | 594 | 596 |
| 30 | Fibras de lana de acero | 1 | 10700 | 9832 | 4255 | 3987 | 1897 | 1845 | 766 | 768 |
| | | 2 | 11802 | 10542 | 4834 | 4369 | 2317 | 2185 | 1016 | 941 |
| | Virutas metálicas | 1 | 12876 | 12219 | 5446 | 5268 | 2539 | 2530 | 1158 | 1098 |
| | | 2 | 13779 | 13375 | 5781 | 5609 | 2863 | 2802 | 1209 | 1204 |

ANEXO E

VALORES DE RESISTENCIA A FLEXIÓN

| RAP en la mezcla [%] | Tipo de agregado metálico | Agregado metálico [%] | Número de probeta | R0 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 |
|----------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | Sin metal | - | 1 | 2.126 | 1.534 | 1.541 | 1.486 | 1.443 | 1.269 | 1.251 | 1.266 |
| | | | 2 | 2.434 | 1.837 | 1.974 | 1.823 | 1.858 | 1.810 | 1.632 | 1.644 |
| | | | 3 | 3.831 | 0.909 | 1.730 | 2.013 | 2.304 | 2.145 | 2.061 | 2.098 |
| | | | 4 | 3.398 | 2.187 | 2.034 | 2.092 | 1.964 | 1.987 | 1.904 | 1.811 |
| | | | 5 | 2.621 | 1.274 | 1.557 | 1.720 | 1.561 | 1.385 | 1.300 | 1.283 |
| | Fibra de lana de acero | 1 | 1 | 2.791 | 1.306 | 1.539 | 1.601 | 1.611 | 1.491 | 1.581 | 1.593 |
| | | | 2 | 3.075 | 1.406 | 1.445 | 1.497 | 1.465 | 1.388 | 1.361 | 1.087 |
| | | | 3 | 3.553 | 1.846 | 2.092 | 1.793 | 1.765 | 1.953 | 1.806 | 1.791 |
| | | | 4 | 2.709 | 1.566 | 1.555 | 1.510 | 1.414 | 1.452 | 1.452 | 1.378 |
| | | | 5 | 2.716 | 1.650 | 1.629 | 1.515 | 1.401 | 1.579 | 1.536 | 1.343 |
| | | 2 | 1 | 2.767 | 1.522 | 1.871 | 1.585 | 1.179 | 1.727 | 1.393 | 1.440 |
| | | | 2 | 2.647 | 1.131 | 1.463 | 2.058 | 1.865 | 2.159 | 2.154 | 1.929 |
| | | | 3 | 2.303 | 1.117 | 1.290 | 1.334 | 1.294 | 1.279 | 1.382 | 1.320 |
| | | | 4 | 2.864 | 2.110 | 2.041 | 2.128 | 1.917 | 1.876 | 1.955 | 1.918 |
| | | | 5 | 4.451 | 1.162 | 1.543 | 2.149 | 1.964 | 2.053 | 2.010 | 1.995 |
| | | 4 | 1 | 3.174 | 1.986 | 1.890 | 1.864 | 1.834 | 1.842 | 1.756 | 1.689 |
| | | | 2 | 2.728 | 1.190 | 1.062 | 1.093 | 1.063 | 1.064 | 1.103 | 1.076 |
| | | | 3 | 2.788 | 1.603 | 1.670 | 1.593 | 1.538 | 1.518 | 1.423 | 1.375 |
| | | | 4 | 2.632 | 1.863 | 1.985 | 1.987 | 1.884 | 1.854 | 1.853 | 1.659 |
| | | | 5 | 3.446 | 1.314 | 1.320 | 1.383 | 1.372 | 1.358 | 1.270 | 1.334 |
| | 6 | 1 | 2.965 | 1.881 | 1.899 | 1.751 | 1.651 | 1.632 | 1.574 | 1.542 | |
| | | 2 | 3.063 | 1.893 | 1.851 | 1.768 | 1.765 | 1.700 | 1.683 | 1.643 | |
| | | 3 | 2.632 | 1.705 | 1.669 | 1.779 | 1.697 | 1.529 | 1.404 | 1.386 | |
| | | 4 | 2.976 | 2.155 | 1.883 | 1.831 | 1.804 | 1.800 | 1.681 | 0.854 | |
| | | 5 | 3.568 | 1.968 | 2.085 | 2.146 | 1.964 | 1.944 | 1.829 | 1.942 | |

| RAP en la mezcla [%] | Tipo de agregado metálico | Agregado metálico [%] | Número de probeta | R0 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 |
|----------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | Viruta metálica | 1 | 1 | 2.657 | 1.882 | 1.708 | 1.621 | 1.460 | 1.409 | 1.339 | 1.343 |
| | | | 2 | 2.927 | 1.853 | 2.170 | 2.157 | 2.089 | 1.960 | 1.856 | 1.872 |
| | | | 3 | 2.411 | 1.698 | 1.797 | 1.807 | 1.639 | 1.623 | 1.460 | 1.476 |
| | | | 4 | 3.240 | 1.934 | 2.259 | 2.008 | 1.886 | 1.877 | 1.807 | 1.825 |
| | | | 5 | 2.260 | 1.930 | 1.710 | 1.929 | 1.720 | 1.805 | 1.682 | 1.639 |
| | | 2 | 1 | 3.032 | 1.751 | 1.804 | 1.804 | 1.815 | 1.729 | 1.742 | 1.759 |
| | | | 2 | 3.252 | 2.336 | 2.329 | 2.411 | 2.091 | 2.148 | 2.333 | 2.362 |
| | | | 3 | 3.619 | 1.255 | 1.760 | 1.716 | 1.811 | 1.815 | 1.918 | 1.994 |
| | | | 4 | 2.387 | 1.337 | 1.539 | 1.477 | 1.435 | 1.244 | 1.192 | 1.196 |
| | | | 5 | 2.440 | 1.525 | 1.461 | 1.353 | 1.292 | 1.199 | 0.724 | 0.505 |
| | | 4 | 1 | 2.850 | 2.125 | 2.177 | 2.125 | 2.113 | 1.956 | 1.980 | 1.844 |
| | | | 2 | 2.582 | 1.712 | 1.447 | 0.627 | 0.983 | 0.968 | 0.796 | 0.867 |
| | | | 3 | 3.030 | 1.298 | 1.505 | 1.424 | 1.387 | 1.437 | 1.391 | 1.428 |
| | | | 4 | 2.774 | 1.611 | 1.747 | 1.573 | 1.531 | 1.493 | 1.367 | 1.422 |
| | | | 5 | 2.979 | 1.709 | 1.707 | 1.604 | 1.497 | 1.510 | 1.437 | 1.436 |
| | | 6 | 1 | 3.429 | 2.178 | 2.541 | 2.545 | 2.338 | 2.357 | 2.423 | 2.564 |
| | | | 2 | 3.089 | 1.862 | 2.006 | 1.893 | 2.097 | 1.960 | 1.729 | 1.724 |
| | | | 3 | 3.089 | 1.638 | 1.798 | 1.604 | 1.659 | 1.546 | 1.107 | 0.936 |
| | | | 4 | 2.854 | 1.871 | 2.005 | 1.797 | 1.948 | 1.751 | 1.738 | 1.690 |
| | | | 5 | 2.300 | 1.565 | 2.088 | 1.486 | 1.512 | 1.369 | 1.208 | 1.257 |

| RAP en la mezcla [%] | Tipo de agregado metálico | Agregado metálico [%] | Número de probeta | R0 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 |
|----------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10 | Sin metal | - | 1 | 3.712 | 1.665 | 1.901 | 1.994 | 1.973 | 2.000 | 1.826 | 1.672 |
| | | | 2 | 2.586 | 1.230 | 1.370 | 1.285 | 1.328 | 1.344 | 1.113 | 1.051 |
| | | | 3 | 3.926 | 0.878 | 1.540 | 1.730 | 1.852 | 1.956 | 1.626 | 1.549 |
| | | | 4 | 2.969 | 1.326 | 1.659 | 1.497 | 1.482 | 1.509 | 1.237 | 1.186 |
| | | | 5 | 3.238 | 1.229 | 1.409 | 1.507 | 1.556 | 1.515 | 1.220 | 1.415 |
| | Fibra de lana de acero | 1 | 1 | 2.970 | 1.738 | 1.466 | 1.108 | 1.208 | 1.309 | 1.223 | 1.205 |
| | | | 2 | 3.192 | 0.352 | 0.666 | 1.055 | 1.314 | 1.514 | 1.458 | 1.502 |
| | | | 3 | 2.922 | 1.400 | 1.631 | 1.662 | 1.567 | 1.389 | 1.251 | 1.438 |
| | | | 4 | 3.835 | 1.671 | 2.269 | 2.970 | 3.027 | 2.486 | 2.617 | 2.466 |
| | | | 5 | 3.409 | 1.839 | 1.842 | 1.212 | 1.573 | 1.573 | 1.182 | 1.281 |
| | | 2 | 1 | 3.151 | 1.990 | 2.118 | 2.064 | 2.074 | 2.180 | 2.083 | 2.314 |
| | | | 2 | 3.120 | 2.220 | 2.166 | 1.851 | 1.377 | 1.583 | 1.390 | 1.640 |
| | | | 3 | 3.344 | 1.367 | 1.819 | 1.721 | 1.981 | 2.094 | 1.986 | 2.177 |
| | | | 4 | 3.331 | 1.746 | 1.747 | 1.816 | 1.820 | 1.779 | 1.590 | 1.541 |
| | | | 5 | 3.900 | 1.652 | 1.694 | 1.690 | 1.701 | 1.633 | 1.545 | 1.626 |
| | | 4 | 1 | 3.598 | 2.182 | 1.947 | 1.879 | 1.679 | 1.551 | 1.565 | 1.414 |
| | | | 2 | 2.619 | 0.925 | 0.959 | 0.903 | 0.916 | 0.949 | 0.950 | 0.903 |
| | | | 3 | 3.167 | 1.946 | 1.901 | 1.884 | 1.696 | 1.588 | 1.683 | 1.428 |
| | | | 4 | 3.159 | 1.224 | 1.502 | 1.444 | 1.525 | 1.545 | 1.497 | 1.493 |
| | | | 5 | 3.478 | 1.243 | 1.214 | 1.488 | 1.542 | 1.320 | 1.257 | 1.232 |

| RAP en la mezcla [%] | Tipo de agregado metálico | Agregado metálico [%] | Número de probeta | R0 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 |
|----------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10 | Viruta metálica | 1 | 1 | 3.297 | 2.011 | 2.144 | 2.050 | 2.008 | 1.922 | 1.885 | 1.725 |
| | | | 2 | 3.015 | 1.766 | 1.746 | 1.574 | 1.664 | 1.526 | 1.175 | 1.095 |
| | | | 3 | 1.761 | 1.220 | 1.165 | 1.090 | 1.022 | 0.964 | 0.920 | 0.929 |
| | | | 4 | 2.443 | 1.712 | 1.687 | 1.582 | 1.491 | 1.447 | 1.259 | 1.250 |
| | | | 5 | 3.185 | 1.604 | 1.851 | 1.777 | 1.777 | 1.776 | 1.700 | 1.643 |
| | | 2 | 1 | 3.879 | 1.460 | 1.773 | 1.798 | 1.734 | 1.823 | 1.800 | 1.651 |
| | | | 2 | 3.190 | 1.666 | 1.787 | 1.695 | 1.795 | 1.737 | 1.543 | 1.539 |
| | | | 3 | 3.387 | 1.921 | 2.011 | 1.996 | 1.876 | 1.846 | 1.758 | 1.697 |
| | | | 4 | 2.914 | 1.768 | 1.884 | 1.797 | 1.666 | 1.541 | 1.448 | 1.373 |
| | | | 5 | 3.461 | 1.866 | 2.106 | 1.932 | 1.931 | 1.917 | 1.846 | 1.690 |
| | | 4 | 1 | 3.619 | 0.652 | 0.578 | 0.757 | 0.816 | 0.939 | 1.025 | 0.965 |
| | | | 2 | 4.213 | 1.551 | 2.019 | 2.245 | 2.118 | 1.852 | 1.814 | 1.700 |
| | | | 3 | 2.984 | 1.184 | 1.371 | 1.648 | 1.681 | 1.643 | 1.423 | 1.324 |
| | | | 4 | 2.260 | 1.281 | 1.332 | 1.273 | 1.171 | 1.237 | 1.183 | 1.171 |
| | | | 5 | 3.830 | 0.601 | 0.956 | 0.991 | 1.078 | 1.196 | 1.126 | 1.147 |

| RAP en la mezcla [%] | Tipo de agregado metálico | Agregado metálico [%] | Número de probeta | R0 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 |
|----------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20 | Sin metal | - | 1 | 2.851 | 0.925 | 1.338 | 1.722 | 1.807 | 1.801 | 1.362 | 0.177 |
| | | | 2 | 4.358 | 0.678 | 1.179 | 1.751 | 1.645 | 1.723 | 1.717 | 1.672 |
| | | | 3 | 3.483 | 1.794 | 1.451 | 1.765 | 1.608 | 1.797 | 0.661 | 1.211 |
| | | | 4 | 3.622 | 0.205 | 0.550 | 0.731 | 0.887 | 1.125 | 1.015 | 1.081 |
| | | | 5 | 3.871 | 1.075 | 1.348 | 1.613 | 1.655 | 0.557 | 1.411 | 1.209 |
| | Fibra de lana de acero | 1 | 1 | 2.656 | 1.375 | 1.764 | 1.591 | 1.157 | 0.957 | 0.997 | 1.094 |
| | | | 2 | 2.800 | 1.792 | 1.778 | 1.724 | 1.595 | 1.666 | 1.548 | 1.489 |
| | | | 3 | 3.559 | 1.232 | 1.422 | 1.501 | 1.480 | 1.520 | 1.108 | 1.245 |
| | | | 4 | 3.355 | 1.902 | 1.753 | 1.769 | 2.001 | 1.345 | 0.832 | 2.091 |
| | | | 5 | 3.238 | 0.892 | 1.380 | 1.491 | 1.721 | 1.477 | 1.273 | 1.033 |
| | | 2 | 1 | 3.916 | 0.891 | 1.449 | 1.513 | 1.165 | 1.220 | 0.913 | 0.809 |
| | | | 2 | 3.220 | 1.369 | 1.815 | 1.696 | 1.199 | 1.205 | 0.988 | 1.008 |
| | | | 3 | 3.632 | 1.531 | 1.392 | 1.458 | 1.168 | 1.393 | 0.809 | 1.222 |
| | | | 4 | 3.354 | 0.663 | 0.788 | 0.894 | 1.069 | 1.084 | 1.185 | 0.899 |
| | | | 5 | 3.148 | 1.124 | 1.258 | 1.295 | 1.367 | 1.488 | 1.263 | 1.283 |
| | | 4 | 1 | 2.702 | 1.601 | 1.462 | 1.469 | 1.350 | 1.401 | 1.275 | 1.172 |
| | | | 2 | 3.084 | 2.022 | 1.954 | 1.844 | 1.748 | 1.762 | 1.370 | 1.321 |
| | | | 3 | 3.306 | 2.201 | 2.255 | 2.088 | 1.995 | 2.025 | 1.737 | 1.669 |
| | | | 4 | 2.891 | 2.166 | 1.986 | 1.813 | 1.717 | 1.740 | 1.276 | 1.288 |
| | | | 5 | 3.458 | 2.559 | 2.451 | 2.265 | 2.186 | 2.035 | 1.805 | 1.780 |

| RAP en la mezcla [%] | Tipo de agregado metálico | Agregado metálico [%] | Número de probeta | R0 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 |
|----------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20 | Viruta metálica | 1 | 1 | 2.813 | 1.201 | 1.383 | 1.310 | 1.321 | 1.479 | 1.377 | 1.228 |
| | | | 2 | 2.604 | 1.403 | 1.808 | 1.695 | 1.623 | 1.592 | 1.535 | 1.427 |
| | | | 3 | 2.036 | 0.991 | 1.184 | 1.111 | 1.092 | 1.084 | 1.084 | 1.019 |
| | | | 4 | 2.906 | 0.705 | 1.444 | 1.376 | 1.313 | 1.371 | 1.282 | 1.215 |
| | | | 5 | 3.019 | 1.533 | 1.653 | 1.434 | 1.335 | 1.236 | 1.105 | 1.003 |
| | | 2 | 1 | 2.587 | 1.167 | 1.595 | 1.623 | 1.603 | 1.539 | 1.578 | 1.466 |
| | | | 2 | 2.790 | 1.551 | 1.936 | 1.827 | 1.813 | 1.810 | 1.454 | 1.467 |
| | | | 3 | 3.317 | 1.263 | 1.758 | 1.826 | 1.889 | 1.780 | 1.712 | 1.696 |
| | | | 4 | 2.776 | 1.209 | 1.801 | 1.927 | 1.650 | 1.648 | 1.614 | 1.609 |
| | | | 5 | 2.512 | 1.445 | 1.529 | 1.544 | 1.607 | 1.535 | 1.308 | 1.270 |
| | | 4 | 1 | 2.189 | 1.413 | 1.663 | 1.497 | 1.428 | 1.343 | 0.982 | 1.032 |
| | | | 2 | 2.797 | 1.453 | 1.526 | 1.440 | 1.359 | 1.418 | 1.206 | 1.415 |
| | | | 3 | 3.359 | 1.642 | 1.951 | 1.852 | 1.694 | 1.646 | 1.834 | 1.751 |
| | | | 4 | 2.462 | 1.945 | 1.909 | 1.817 | 1.692 | 1.761 | 1.672 | 1.620 |
| | | | 5 | 3.503 | 1.167 | 1.464 | 1.401 | 1.649 | 1.672 | 1.656 | 1.625 |

| RAP en la mezcla [%] | Tipo de agregado metálico | Agregado metálico [%] | Número de probeta | R0 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 |
|----------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 30 | Sin metal | - | 1 | 3.441 | 0.430 | 0.880 | 1.397 | 1.429 | 1.191 | 1.273 | 1.301 |
| | | | 2 | 3.284 | 1.199 | 1.575 | 1.867 | 0.098 | 0.349 | 0.645 | 0.714 |
| | | | 3 | 3.757 | 0.786 | 1.357 | 1.374 | 1.383 | 1.756 | 1.864 | 1.844 |
| | | | 4 | 2.583 | 1.303 | 1.363 | 1.354 | 1.277 | 1.347 | 1.318 | 1.183 |
| | | | 5 | 2.814 | 1.669 | 1.701 | 1.650 | 1.631 | 1.581 | 1.588 | 0.520 |
| | Fibra de lana de acero | 1 | 1 | 2.370 | 1.320 | 1.271 | 1.366 | 1.306 | 1.268 | 1.389 | 1.150 |
| | | | 2 | 3.313 | 1.701 | 1.676 | 1.595 | 1.466 | 1.506 | 1.323 | 1.098 |
| | | | 3 | 3.126 | 1.551 | 1.579 | 1.656 | 1.614 | 1.993 | 1.994 | 1.840 |
| | | | 4 | 2.655 | 1.085 | 1.341 | 1.376 | 1.461 | 1.607 | 1.277 | 1.173 |
| | | | 5 | 2.962 | 0.770 | 0.676 | 1.127 | 1.126 | 1.369 | 1.314 | 1.182 |
| | | 2 | 1 | 3.616 | 0.325 | 0.404 | 0.641 | 0.662 | 0.643 | 0.832 | 0.820 |
| | | | 2 | 3.858 | 0.760 | 1.206 | 1.273 | 1.259 | 1.317 | 1.241 | 1.313 |
| | | | 3 | 2.426 | 1.930 | 1.715 | 1.664 | 1.806 | 1.831 | 2.009 | 1.789 |
| | | | 4 | 2.842 | 1.697 | 1.611 | 1.632 | 1.626 | 1.606 | 1.651 | 1.536 |
| | | | 5 | 2.451 | 1.295 | 1.709 | 1.580 | 1.274 | 1.519 | 1.215 | 1.193 |
| | | 4 | 1 | 2.935 | 1.097 | 1.145 | 1.176 | 1.202 | 1.373 | 0.997 | 1.019 |
| | | | 2 | 3.038 | 1.705 | 1.859 | 1.858 | 1.888 | 1.929 | 1.222 | 1.299 |
| | | | 3 | 3.363 | 1.607 | 1.507 | 1.493 | 1.646 | 1.532 | 1.626 | 1.601 |
| | | | 4 | 3.825 | 1.884 | 1.756 | 1.649 | 1.891 | 1.773 | 1.708 | 1.694 |
| | | | 5 | 2.379 | 1.535 | 1.590 | 1.500 | 1.159 | 1.322 | 1.216 | 1.191 |

| RAP en la mezcla [%] | Tipo de agregado metálico | Agregado metálico [%] | Número de probeta | R0 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 |
|----------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 30 | Viruta metálica | 1 | 1 | 2.478 | 1.838 | 1.884 | 1.889 | 1.844 | 1.734 | 1.775 | 1.638 |
| | | | 2 | 3.225 | 1.917 | 1.853 | 1.923 | 1.852 | 1.738 | 1.479 | 1.210 |
| | | | 3 | 1.937 | 1.272 | 1.189 | 1.277 | 1.178 | 1.140 | 1.097 | 1.110 |
| | | | 4 | 2.356 | 1.735 | 1.597 | 1.645 | 1.522 | 1.351 | 1.321 | 1.336 |
| | | | 5 | 3.214 | 1.934 | 1.958 | 1.968 | 1.929 | 1.802 | 1.701 | 1.774 |
| | | 2 | 1 | 3.163 | 1.422 | 1.866 | 1.790 | 1.818 | 1.748 | 1.725 | 1.909 |
| | | | 2 | 3.696 | 0.540 | 1.011 | 1.691 | 1.635 | 1.479 | 1.823 | 1.552 |
| | | | 3 | 3.357 | 0.844 | 1.494 | 1.424 | 1.468 | 1.496 | 1.158 | 1.395 |
| | | | 4 | 2.933 | 1.164 | 1.205 | 1.202 | 1.158 | 1.179 | 0.957 | 0.975 |
| | | | 5 | 2.407 | 0.777 | 1.015 | 1.080 | 1.167 | 1.244 | 1.236 | 1.263 |
| | | 4 | 1 | 2.609 | 1.267 | 0.820 | 1.202 | 1.343 | 1.447 | 1.350 | 1.166 |
| | | | 2 | 3.302 | 0.539 | 0.640 | 0.618 | 0.677 | 0.662 | 0.650 | 0.644 |
| | | | 3 | 2.844 | 0.928 | 1.437 | 1.476 | 1.507 | 1.629 | 1.791 | 1.670 |
| | | | 4 | 2.522 | 0.843 | 1.251 | 1.354 | 1.305 | 1.257 | 1.243 | 1.253 |
| | | | 5 | 2.546 | 0.678 | 1.099 | 1.323 | 1.318 | 1.232 | 1.143 | 1.139 |

ANEXO F

ARTÍCULO: EFFECT OF RAP AND FIBERS ADDITION ON ASPHALT MIXTURES WITH SELF-HEALING PROPERTIES GAINED BY MICROWAVE RADIATION HEATING



Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Effect of RAP and fibers addition on asphalt mixtures with self-healing properties gained by microwave radiation heating

A. González ^{a,*}, J. Norambuena-Contreras ^b, L. Storey ^c, E. Schlangen ^d^a CIMAT, Faculty of Engineering, Universidad del Desarrollo, Santiago, Chile^b LabMAT, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bío, Concepción, Chile^c Department of Civil Engineering, University Federico Santa María, Valparaíso, Chile^d MicroLab, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft 2628 CN, The Netherlands

HIGHLIGHTS

- Microwave heating healed asphalt mixtures with RAP and metal fibers.
- The general effect of RAP was a decrease in the healing.
- The general effect of metallic fibers was an increase in the healing.
- CT-Scans showed clusters of fibers in the mixtures.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 September 2017

Received in revised form 12 October 2017

Accepted 16 October 2017

Keywords:

Asphalt mixture
Metallic fibers influence
Crack-healing
RAP addition
Microwave heating
X-ray microtomography

ABSTRACT

Microwave heating of asphalt mixtures containing metal fibers is a promising technology for asphalt pavement rehabilitation. The main characteristic of these types of mixtures is that they have the ability to self-heal their cracks when external microwave heating is applied. Prior to this study, the assessment of crack-healing has only been conducted in mixtures prepared with virgin aggregate materials. This paper, however, presents results of research in which the effect of adding reclaimed asphalt pavement (RAP) and metallic fibers was studied. The volumetric properties of the mixtures indicated that the air voids content increased with the fiber content. The indirect tensile stiffness modulus of the mixtures increased with the addition of RAP. Clusters of fibers were found in the mixtures by means of CT-Scan analysis. The general effect of RAP addition was a decrease in the healing of the mixtures, and the effect of fibers was an increase in the healing. Overall, it is concluded that asphalt mixtures with RAP and metal fibers have the potential for crack-healing via microwave heating.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Asphalt is the most common material used for road pavement construction. For example, of the 4.3 million kilometers of roads in the United States, 94% are surfaced with asphalt [1], while in the European Union more than 90% of the road network is surfaced with asphalt [2]. Asphalt mixtures are flexible and ductile [3], have viscoelastic properties [4] that provide a good response to vehicle dynamic loads [5], their cost is normally similar to that of other pavement alternatives [3], and asphalt roads can be opened to traffic shortly after construction [6].

Despite their robust characteristics as a paving material, the quality of asphalt mixtures deteriorate with traffic and

environmental factors. Cracking is one of the most common indications of asphalt pavement distress and is caused by cyclic loading (fatigue) [7], bitumen aging (oxidation) [8], and temperature variation (thermal) [9]. Cracking reduces the mechanical strength of asphalt pavements and their durability, especially when exposed to water infiltration [10]. Despite the distress associated with asphalt pavements, it is well known that asphalt mixtures have the capability of self-healing their cracks when exposed to high temperatures (e.g., during the summer season in most latitudes). This means that mixtures can close, seal, or heal the cracks independently [11] because the thermoplastic characteristic of bitumen reduces its viscosity with an increase in temperature. When asphalt pavements reach a temperature of 30–70 °C, bitumen can flow through open micro-cracks, similar to a capillary flow [12]. When pavement cools down to lower temperatures, the

* Corresponding author.

E-mail address: aagonzalez@ingenieros.udd.cl (A. González).

bitumen that sealed the crack increases its viscosity, healing or recovering the mechanical properties of the mixture [13].

The concept of self-healing asphalt mixtures by increasing the bitumen temperature was used to create an asphalt mixture with a small content of steel wool fibers that could repair cracks [14,15]. In these mixtures, steel wool fibers absorb and conduct more thermal energy than bitumen and aggregates, increasing the electrical conductivity of the mixtures [16]. To artificially heat and heal this type of asphalt mixture, an external electromagnetic field, such as those applied by microwave devices, increases the metal fiber temperature; the heat is then transferred to the mixture, reducing the bitumen viscosity and repairing opened cracks [13–17]. Microwave radiation is a heating technique by which asphalt materials are exposed to alternating electromagnetic fields, in the order of Megahertz [18]. Previous studies have shown that microwave heating has the potential to crack-heal asphalt mixtures [19] and polymeric composite materials [20] reinforced with steel wool fibers. Nevertheless, the work conducted on the healing of asphalt mixtures by microwave heating has only considered the use of virgin aggregates and bitumen. Only recently, has metallic waste been added to asphalt mixtures to absorb and conduct heating energy in order to achieve asphalt mixtures with healing purposes using microwave heating [21]. As a result of this research, there is a high interest for increasing the use of reclaimed asphalt pavements worldwide, using different construction techniques [22,23].

Pavement recycling has technical, environmental, and social advantages over traditional construction techniques, and it is a requirement for road construction in some countries [24,25]. Therefore, it is considered important to study the healing capabilities of asphalt mixtures prepared with various reclaimed asphalt pavement (RAP) contents. The healing of asphalt mixtures with RAP could be an auspicious technique in the future, whereby small quantities of metal fibers could be added to mixtures with RAP in

asphalt plants, retrofitting the mixture into one with healing capabilities by external heating. Fibers need to be added to improve the electrical and thermal conductivity of the mixtures with RAP, similarly to conventional asphalt mixtures with crack-healing properties using microwave heating.

This research aimed to evaluate the effect of adding RAP and metal fibers on the properties of asphalt mixtures with crack-healing capabilities by microwave radiation heating. With this purpose, an extensive experimental program was carried out to measure the influence of the factors mentioned above on: 1) the bulk density and air voids content, 2) the indirect tensile stiffness modulus, 3) the crack-healing properties, and 4) the volumetric distribution of fibers inside the mixtures.

2. Materials and methods

2.1. Aggregates, RAP, and bitumen

A standard dense asphalt mixture with different contents of RAP was used in the laboratory research. The RAP, aggregates, and bitumen were supplied by a local construction company in Chile. The aggregates and RAP were provided in three and two different fractions respectively (Table 1). The aggregates consisted of a 19 mm coarse gravel (Fig. 1a), a 12.5 mm gravel, and crushed dust. The RAP, in 19 mm (Fig. 1b) and 10 mm fractions, was obtained from standard pavement rehabilitation projects, where aged pavements were milled and replaced by new asphalt mixtures. The different fractions of aggregates and RAP were blended to achieve the particle size distribution of dense asphalt mixtures. The content of RAP in the mixture was 0%, 10%, 20%, and 30%, by mass. The penetration grade of the CA24 bitumen used for mixture preparation was 80/100 mm at 25 °C. A constant total bitumen of 5.2% by volume was targeted for all the asphalt mixtures. The aged bitumen content in the 19 mm and 12.5 mm RAP fractions was 3.75% and 7.06%, respectively.

2.2. Metal fibers

Steel wool fibers (Fig. 2), or simply in this paper “metal fibers” or “fibers”, composed of low-carbon steel with a density of 7.180 g/cm³ were added in small proportions to the mixtures. The metal fibers had an average diameter of 0.133 mm, with an average aspect ratio of 44 and an initial length range of 2–14 mm, which

Table 1
Particle size distribution of aggregates, RAP, and aggregates/RAP blends.

| Size (mm) | Aggregates fractions | | | RAP fractions | | Aggregate/RAP blends for different RAP contents | | | |
|-----------|----------------------|---------|------|---------------|---------|---|---------|---------|---------|
| | 19 mm | 12.5 mm | Dust | 19 mm | 12.5 mm | 0% RAP | 10% RAP | 20% RAP | 30% RAP |
| 19 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | 36 | 100 | 100 | 89 | 100 | 87 | 88 | 89 | 90 |
| 10 | 1 | 77 | 100 | 69 | 100 | 76 | 77 | 78 | 79 |
| 5 | 1 | 5 | 90 | 27 | 91 | 55 | 56 | 57 | 58 |
| 2.5 | 0 | 1 | 60 | 18 | 68 | 36 | 37 | 39 | 40 |
| 0.63 | 0 | 0 | 30 | 12 | 32 | 18 | 19 | 19 | 20 |
| 0.315 | 0 | 0 | 22 | 9 | 23 | 13 | 14 | 14 | 14 |
| 0.16 | 0 | 0 | 16 | 7 | 17 | 10 | 10 | 10 | 11 |
| 0.08 | 0 | 0 | 11 | 5.3 | 13.4 | 6.6 | 7 | 7.3 | 7.7 |



Fig. 1. The 19 mm fractions of (a) virgin aggregates and (b) RAP.



Fig. 2. Optical image of metallic fibers used in the study.

implies that both short and long metal fibers were added to the asphalt matrix. The fiber content by total volume of the bitumen were: 0%, 1%, 2%, and 4%. The mixtures without RAP were also prepared with 6% of metal fibers in order to learn the effect of a larger content of metal in mixtures with virgin materials only.

2.3. Preparation of asphalt specimens

The materials were heated for at least two hours at 150 °C before mixing. The mixing sequence for specimens with metal fibers was the following: 1) the bitumen was placed in a bowl that was previously heated in the oven to keep the mixing temperature; 2) 1% of the metal fibers was initially added to the mixture, and the remainder was gradually added after the addition of aggregate/RAP batches; 3) the blend aggregate/RAP was added in four small batches separated by particle size, starting with the batch with the largest particles. Once the particles were completely coated with fresh bitumen, the next batch with smaller particles was added to the mixture. The mixture batch was used to prepare cylindrical Marshall specimens of 100 mm in diameter and approximately 60 mm in height. For the preparation of each specimen, a sample of approximately 1200 g of mixture was compacted using a Marshall compactor, giving 75 blows to each face of the specimen. The targeted total bitumen content for each Marshall specimen was 57 g, equivalent to the 5.2% volume. Therefore, the fresh bitumen content added to the mixtures with 0, 10, 20 and 30% of RAP was 57 g, 51 g, 44 g and 37 g, respectively. The aged bitumen coming from the RAP was 0 g, 7 g, 13 g, and 20 g, for the same RAP contents. Once compacted, the specimens were cut through their diameter using a saw for asphalt to obtain two semi-circular halves. Then, each half was cut through a plane parallel to the original Marshall face to produce four semi-circular samples from one Marshall specimen. The resulting dimensions of the semi-circular samples were 100 mm in diameter and approximately 30 mm thick. In addition, a group of Marshall specimens were tested for Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) before sawing, as will be described below. Finally, a 10 mm depth notch with a thickness of 3 mm was cut at the midpoint of the semi-circular samples flat face parallel to the coaxial axis of the sample. This notch was cut to induce a crack in the three-point bending test, as described below.

2.4. Morphological characterization of metal fibers

To determine the morphological characteristics of the steel wool added to the asphalt mixtures, 120 individual fibers were selected randomly. The length and diameter of the metal fibers were determined by using an optical microscope with 35× magnification and an image software [26]. The morphological variables of metal fibers were presented in frequency histograms with the aim of comparing their length and diameter distributions.

2.5. Bulk density and air voids content

In addition to assessing the crack-healing capabilities, it was important to evaluate the bulk density and air voids content, which are physical properties of asphalt mixtures. Bulk density was calculated as the relationship between the dry mass and the real volume of each specimen, including air voids determined by water-submerged weight. The air voids content of each specimen was calculated based on the previous calculation of bulk density. Hence, as the exact percentage of materials and their density for each asphalt mixture type were known, the theoretical

maximum density without voids for each specimen was found. The air voids content (AV) of each test sample was calculated as:

$$AV = \frac{\rho_{max} - \rho_b}{\rho_{max}} \tag{1}$$

where ρ_{max} is the theoretical maximum density without voids of each specimen in g/cm³, and ρ_b is the bulk density of each specimen in g/cm³. The bulk density and air voids content were calculated from the average of six test specimens for 17 mixture types.

2.6. Indirect tensile stiffness modulus (ITSM) tests

The stiffness of the asphalt mixtures was measured with the indirect tensile stiffness modulus test (ITSM). The stiffness was measured using European Standard UNE-EN 12697-26:2006 Annex C [27]. In the test, a vertical cyclic load is diametrically applied to the Marshall cylindrical specimen to attain a 50 µm horizontal deformation measured using two transducers located parallel to the horizontal diameter. Ten loading pulses were vertically applied on two orthogonal diameters. The ITSM was calculated applying the following equation:

$$SM = \frac{P \cdot (0.27 + \nu)}{d \cdot t} \tag{2}$$

where SM is the measured stiffness modulus in MPa, P is the maximum vertical load diametrically applied in N, ν is the Poisson's ratio (0.35 was adopted according to testing standards [27]), d is the horizontal maximum deformation in mm, and t is the specimen thickness in mm. ITSM tests were carried out in specimens with 2% metal fibers and RAP contents of 0%, 10%, 20% and 30%, and control specimens without RAP and without metal fibers. The tests were performed in a temperature controlled chamber at temperatures of 10, 20, 30, and 40 °C. Before testing, the specimens were left in the temperature chamber for a minimum of 4 h, to ensure that the target temperature was the same in the entire specimen volume.

2.7. Crack-healing tests by microwave radiation

The microwave healing of these asphalt mixtures was measured testing the semi-circular specimens with three-point bending tests (Fig. 3). In these tests, a vertical monotonic load was applied to the semi-circular samples until maximum load or failure. The test setup for the three-point bending tests consisted of placing the flat face of the semi-circular sample on two supporting rollers separated by 80 mm. A third loading roller was positioned at the midpoint of the semi-circular arch of the specimen (Fig. 3). A multispeed static universal testing machine, with a load cell of 50 kN and controlled by computer, was used as the loading equipment. The load speed ratio was set to 0.5 mm/min. All semi-circular samples were preconditioned at -20 °C during 24 h before the test to achieve a brittle failure. Once the bending test finished, cracked asphalt samples were left at room temperature for 3 h until they reached 20 °C, ensuring that the surface moisture resulting from freezing had completely evaporated.

Microwave heating was applied to the previously cracked semi-circular samples by using a 700 W microwave oven with a work frequency 2.45 GHz, which corresponds to an approximate wavelength of 120 mm. The heating time was set to 40 s for all samples, this time has been found suitable for microwave healing based on previous research results [18]. The room air temperature during the heating was approximately 20 °C.

The healing ratio reached for each asphalt sample, HR, was defined as the relationship between the maximum force of the test sample initially tested, F_0 , and the maximum force measured in the test sample after the healing process, F_1 , as follows:

$$HR = \frac{F_1}{F_0} \tag{3}$$

Finally, to quantify the efficiency of the repair process, a total of 7 damage-healing cycles were carried out in the test samples, completing more than 700 tests.

2.8. Temperature analysis by thermographic camera

The temperature of the semi-circular specimens was measured on their surface using a 320 × 240 pixel full color thermographic camera during 10 s immediately after heating. Temperature was measured at 43 points of the asphalt sample surface, and the data was later analyzed using a software [28]. The points were selected so that each point could represent approximately 1/43 of the measured sample face.

2.9. X-ray computed tomography (CT scan)

To analyze the distribution of the metal fibers in the asphalt mixtures with different RAP contents, X-ray micro computed tomography was conducted on samples with different contents of RAP and fiber contents. Prismatic samples with dimensions approximately 30 mm in height, 30 mm width, and 50 mm length were cut

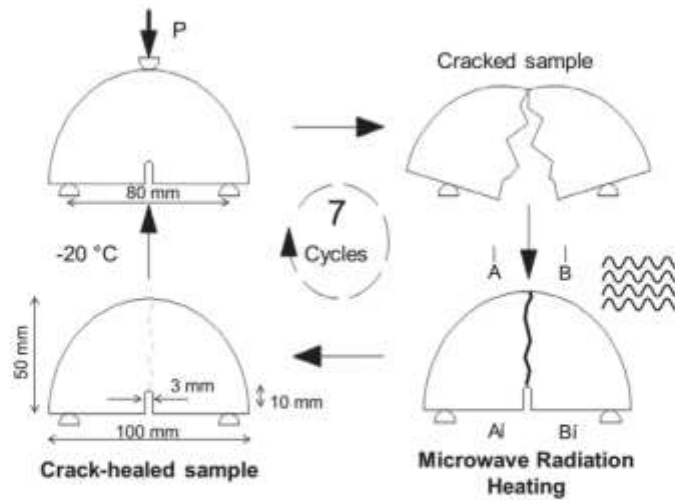


Fig. 3. Healing cycle of asphalt mixtures by microwave radiation.

from the center of the semi-circular samples after the seven healing cycles. A scheme of the vertical cuts through the semicircular specimens is shown by axes A-A' and B-B' in the bottom right of Fig. 3. The advantage of this specific cut is that it contained the healed crack and the notch, and, therefore, it was possible to identify the crack in the scan and determine whether it passed through the bitumen mastic or the aggregate.

The X-ray micro-tomography scans were obtained using a scanner operated at 160 kV and 200 μ A; images were reconstructed at a spatial resolution of 25 μ m (voxel side). The classification of voxels with the different types of materials in the asphalt mixture samples was achieved by segmenting voxel intensity values, which are proportional to average density of the specimen within the volume mapped by each voxel. Each sample had more than 2.4×10^9 voxels; therefore, histograms that represented the frequency or volume of each component of the mixture were able to be analyzed.

For the analysis, the first millimeters of the sample surface were discarded to avoid effects related to the sample preparation (e.g., sawing) and handling, which could result in fragments detaching from the sample. To determine an approximate spatial distribution of the metal content, for each sample a total of 12 sub-samples of approximately 2 cm³ were taken. The bottom part of the sample that contained the notch was discarded from the analysis because, in some samples, significant deformations were observed in this area. From each sub-sample a voxel intensity histogram was generated, consisting of matrices with more than 15,000 rows. Since this was a large volume of data, scripts were programmed in a computer code [29] to handle the information. Then, a cutoff in the histogram was defined based on graphical analysis to define the voxel intensity for the fibers.

3. Results and discussion

3.1. Analysis of the morphology of metal fibers

Frequency histograms for all morphological data measured using the optical microscope are presented in Fig. 4. These histograms demonstrate that, regardless of the amount of metal fibers added to the recycled asphalt mixtures, there is an 85% probability to have long metal fibers between 4 and 8 mm, while the probability of adding shorter (<4 mm) or longer (>8 mm) metal fibers is lower (1% and 14%). As a result, the length of the metal fibers ranged from 2 to 14 mm, with an average length of approximately 5.8 mm (Fig. 4a). This value can be considered as a medium-length fiber according to published results [18]. Finally, the diameter calculated from the measurement of 120 individual metal fibers was in average 0.133 mm (Fig. 4b), which is considered a thick type of metal fiber [30]. The analysis shows that long and thick metallic fibers were added to the recycled asphalt mixtures. Since metals have good thermal conductivity, long metal fibers should increase the heating homogeneity of asphalt mixtures.

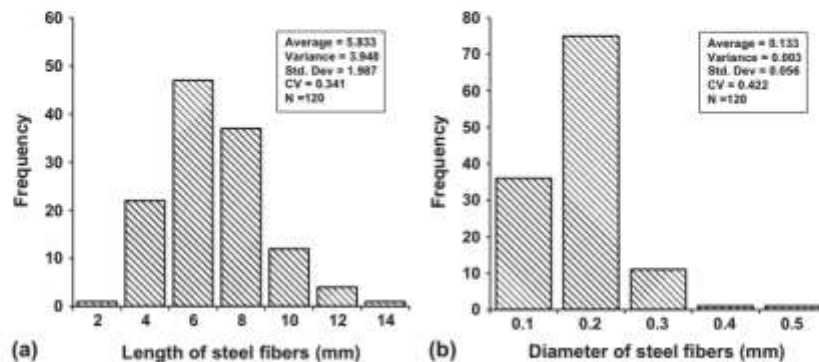


Fig. 4. Frequency histograms for the (a) length and (b) diameter of the metal fiber.

3.2. Effect of metal fibers and RAP on the bulk density and air voids content

The average bulk density for all specimens tested was 2.334 g/cm³ (SD = 0.031 g/cm³). No clear effect of the RAP content on the bulk density was observed, with average bulk densities of 2.331, 2.340, 2.323, and 2.339 g/cm³ for RAP contents of 0%, 10%, 20%, and 30%, respectively. On the other hand, the average bulk density of all specimens decreased with an increase in the metal fiber content, with bulk densities of 2.353, 2.323, 2.339, 2.322, and 2.314 g/cm³ for fiber contents of 0%, 1%, 2%, 4% and 6%, respectively. The detailed results of bulk density of asphalt mixtures are shown in Fig. 5a. As expected, the Figure shows that the mixtures with highest bulk density were those without metal fibers.

The overall average air voids content for mixtures with different fiber and RAP content was 8.0%. A general increase in the air voids content was measured with increasing fiber content. The average air voids content measured were 6.7%, 8.1%, 7.7%, 8.8%, and 10.4% for metal fiber contents of 0%, 1%, 2%, 4% and 6%, respectively. Conversely, a decrease in the air voids was measured with increasing RAP content. The average air voids content measured 9%, 7.9%, 8.0%, and 6.8% for RAP contents of 0%, 10%, 20% and 30%. Detailed results of the air voids content versus metal fibers content are shown in Fig. 5b. These results are explained because the bitumen content and aggregates remained constant in the mixtures, while the metal fiber content changed.

In addition, it was observed during the asphalt specimen preparation that mixing and compaction was more difficult for higher fiber contents. The higher air voids content is also explained by the formation of metal fiber clusters in the mixture, as shown below. The higher the metal fiber content, the higher the number of longer fibers in the mixtures, and, therefore, the probability of having clusters increases. The clusters of metal fibers make the compaction of the asphalt specimens more difficult because there is less space for the bitumen to freely flow and fill the voids within the mixtures.

3.3. Indirect tensile stiffness modulus

The indirect tensile stiffness modulus (ITSM) results for the mixtures with 2% fibers with different RAP contents are presented in Fig. 6a. In addition, ITSM for the control mixtures (0% RAP and 0% fibers) are included in that Figure. Results show that modulus

decreased with increasing temperature for fiber mixtures and different RAP contents, which is explained by the visco-elastic nature of bitumen that experiences a loss of viscosity and stiffness when temperature increases, resulting in a decrease in the modulus of the asphalt mixture. Fig. 6a shows that the inclusion of 2% metal fibers reduces the stiffness of mixtures without RAP. The average stiffness considering all testing temperatures for the control mixtures without RAP and fibers was 3954 MPa, while the average stiffness considering all testing temperatures and all RAP contents for the mixtures with metal fibers was 3975 MPa. Similar stiffness were measured by Norambuena-Contreras et al. [18] in a previous research on dense asphalt mixtures. It was also observed that an increase in the RAP content increases the stiffness of the mixtures with metal fibers, which is explained by the higher stiffness of the bitumen from the RAP compared to that of the fresh bitumen. Although viscosity tests were not performed on the aged bitumen from RAP, an increase in viscosity for bitumen that has been exposed to solar radiation, high temperatures and oxygen during its service life would be expected by the volatilization of light hydrocarbon fractions, and oxidation by reacting with oxygen from the environment [31]. Regression equations were fitted to the logarithm of the measured stiffness modulus and temperatures (Table 2) with a good average R² of 0.988.

Fig. 6b presents the stiffness modulus measured for the test specimens in the longitudinal (A-A') and (B-B') directions, respectively. The Figure indicated that stiffness modulus in each direction (A and B) were very similar for almost all the mixtures tested, which demonstrates that the addition of metal fibers did not induce anisotropic behavior of asphalt mixtures in the plane perpendicular to the coaxial axis of the specimens.

3.4. Effect of metal fibers and RAP on the crack-healing ratios

In total, more than 700 three-point bending tests were conducted to evaluate the crack-healing of asphalt mixtures. The general effect of the RAP addition into the asphalt mixtures was a decrease in the healing ratios. For example, if the healing ratios of the seven healing cycles and all the metal fiber contents are averaged, the healing ratios of the mixtures are 0.5634, 0.4844, 0.4354, and 0.4617 for 0%, 10%, 20%, and 30% of RAP content (see Fig. 7a). Conversely, the general effect of the metal fiber content was an increase in the healing ratios. Fiber contents of 0%, 1%, 2%, 4%, and 6% yielded healing ratios of 0.4556, 0.4926, 0.4866,

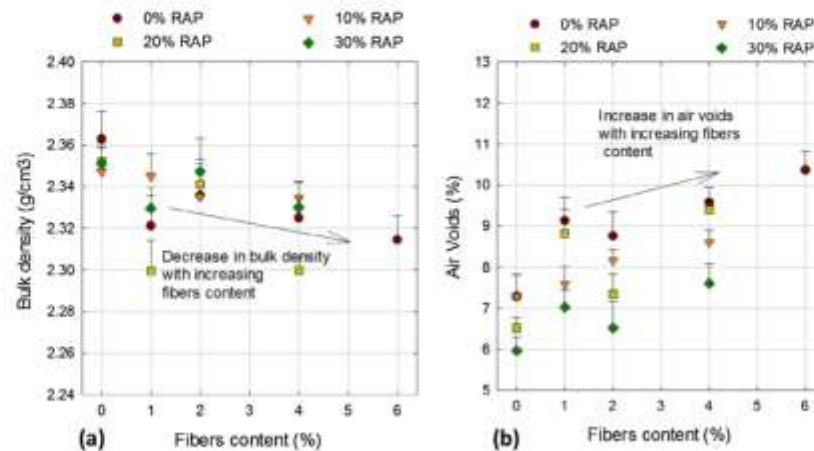


Fig. 5. Effect of metal fiber and RAP content on (a) bulk density and (b) air voids content.

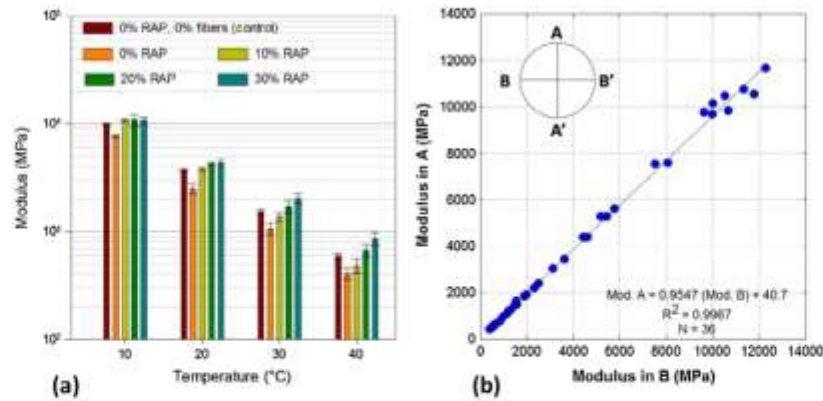


Fig. 6. (a) Indirect tensile stiffness modulus of mixtures with 2% fibers and (b) modulus measured in the longitudinal (A) and cross (B) directions.

Table 2
Linear fitting of measured stiffness modulus to temperature for asphalt mixtures with 2% steel fibers.

| RAP (%) | Fibers (%) | Fitted equation ITSM in MPa, T in °C | R ² |
|---------|------------|---|----------------|
| 0 | 0 | $\log(ITSM) = 4.3997 - 0.04077 \cdot T$ | 0.999 |
| 0 | 2 | $\log(ITSM) = 4.2774 - 0.04190 \cdot T$ | 0.990 |
| 10 | 2 | $\log(ITSM) = 4.4796 - 0.04457 \cdot T$ | 0.996 |
| 20 | 2 | $\log(ITSM) = 4.4329 - 0.04001 \cdot T$ | 0.991 |
| 30 | 2 | $\log(ITSM) = 4.3804 - 0.03603 \cdot T$ | 0.991 |

0.5085, and 0.5696 (see Fig. 7b). The general effect of the number of healing cycles (see Fig. 7c) was initially an average increase of the healing ratio (from 0.4936 to 0.5409) and then a gradual decrease of the healing up to the last cycle. The initial average healing ratios were low compared to previous research studies in which microwave was used for heating the specimens. For example Garcia and Norambuena [32] found that the minimum and maximum healing ratios for the first healing cycles were approximately 0.80 and 0.96 for mixtures with 6% and 2% metal fibers, respectively. For the second cycle, they found minimum and maximum healing ratios of approximately 0.65 and 0.82 for the same metal fibers contents. Only in their fifth healing cycle were the ratios similar to the ratios for the first healing ratio obtained in this research. Sun et al. [33] found healing ratios above 0.5 for asphalt

mixtures with steel fibers and steel slag healed by microwave, after nine healing cycles. In their mixtures, the average surface temperature of the specimens with fibers was similar to those used in this research, which after heating was over 98.7 °C, higher than the temperatures measured in this research, as shown below. The general effect of the RAP content in the mixtures could be explained by the higher viscosity of the aged bitumen. The mixtures with higher RAP content have a larger proportion of aged bitumen, and a lower proportion of virgin 80–100 bitumen. In other words, the 80–100 bitumen added, could be acting as rejuvenator in the new asphalt mixture, which will reactivate aged bitumen and lead to a higher binder content in the mixture. Hence, it would be expected higher healing ratios when bitumen with higher penetration grades are added to this type of mixtures.

Detailed results for the healing ratios of samples without RAP and with different contents of metal fibers are presented in Fig. 8a–d for 0%, 10%, 20%, and 30% RAP contents, respectively. In each Figure, one bar shows the average of five three-point strength tests. For the mixtures without RAP (Fig. 8a), the contribution of metal fibers to the crack-healing of mixtures was not clear, i.e., for some contents the average healing ratios increase, while for others they decrease. In addition, the average healing ratios for all the mixtures without RAP increased from the first to the third cycle, and from the fourth to the seventh cycle showed only a small decrease. Overall, the average healing ratio for the mixtures with

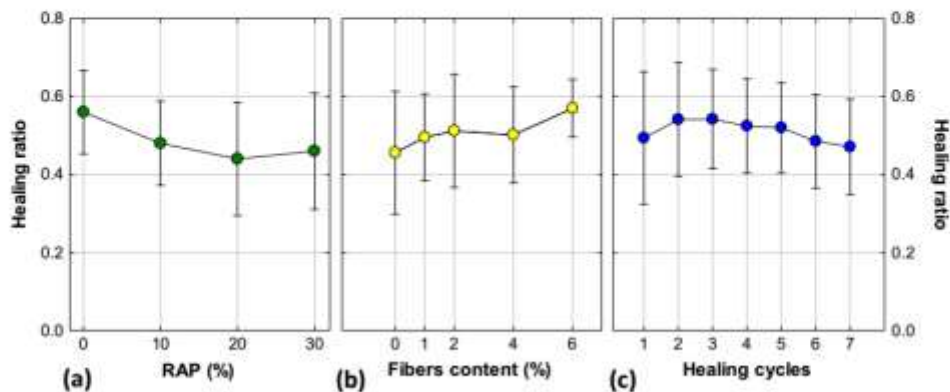


Fig. 7. General effects of (a) RAP content and (b) metal fiber content, (c) number of healing cycles.

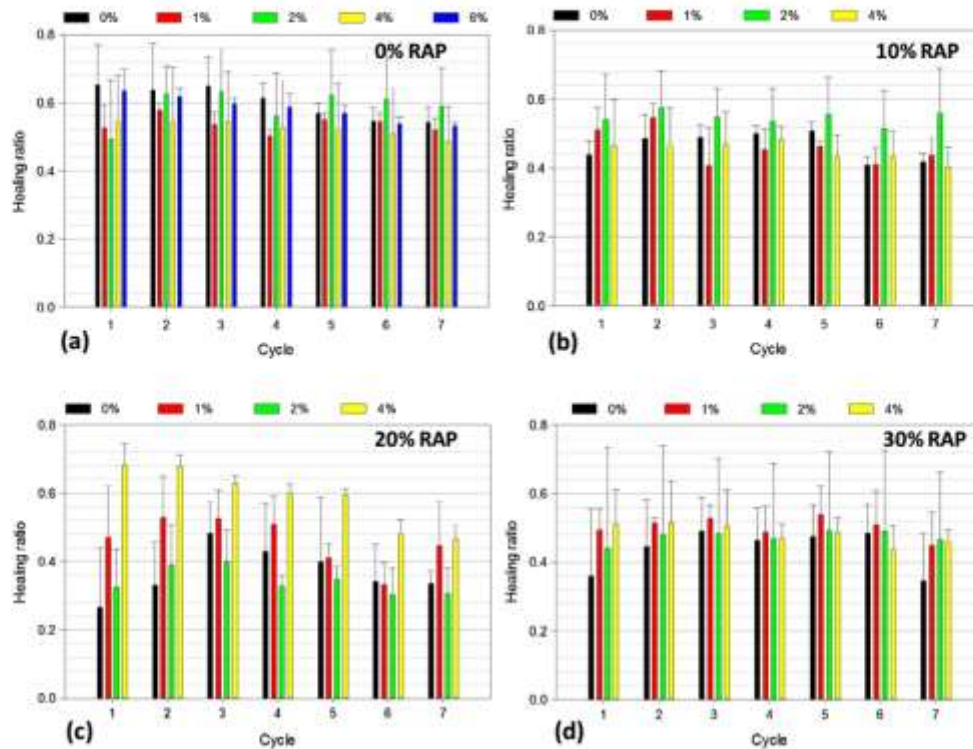


Fig. 8. Healing ratio for different contents of metal fibers and (a) 0% RAP, (b) 10% RAP, (c) 20% RAP, and (d) 30% RAP.

all the fiber contents and without RAP at the first healing cycle was 0.5505, while for the seventh cycle it was 0.5225, i.e., only a 5.5% reduction. The overall average of the healing ratio for the mixtures with 10% RAP (Fig. 8b) was 0.4844. In these mixtures, higher healing ratios were measured for mixtures with 2% fiber content. The average of the seven healing cycles was 0.4649, 0.4820, 0.5442, and 0.4464 for fiber contents of 0%, 1%, 2%, and 4%, respectively. Little difference was measured between the average healing ratios of the first healing cycle (0.4571) and the seventh healing cycle (0.4640). Nevertheless, the average healing ratios increased from the first to the second healing cycle, and then started to decrease. The only exception for the mixtures with 10% RAP was the healing ratio of mixtures with 2% fibers that remained relatively constant for all healing cycles.

The general effect of the fiber contents and number of healing cycles in the mixtures with 20% RAP (Fig. 8c) was more significant than the previous results with lower RAP contents. The average healing ratio for mixtures without metal fibers was 0.3489 (SD = 0.1506), while for the mixtures with metal fibers, the average healing ratio of the seven cycles was 0.4708 (SD = 0.1332), 0.3508, and 0.5711 (SD = 0.1002), for fiber contents of 1%, 2%, and 4%, respectively. The effect of the number of healing cycles on the healing ratios was similar to that of the previous mixtures. The healing ratio increased from the first (0.4353) to the second cycle (0.4753) and then continued to decrease until the seventh cycle (0.3749). Clearly, the mixture with 4% metal fibers showed the highest healing ratios.

The effect of the fiber content for the mixtures with 30% RAP (Fig. 8d) was an increase in the healing ratio, i.e., for metal fiber contents of 0%, 1%, 2%, and 4%, the average healing ratio for all

the cycles was 0.4013, 0.4896, 0.4669, and 0.4890, respectively. The effect of the number of healing cycles was similar to the other mixtures with different contents of RAP. The healing ratio for the first cycle was 0.4395, for the second healing ratio 0.4741, and for the seventh 0.4250.

The three-point bending test with semi-circular specimens was a good method for the asphalt healing evaluation, since little damage was observed in the specimens after the seven healing cycles. Damage was reported by Norambuena-Contreras and Garcia [32], who observed that microwave heating can overheat and damage specific areas of the semi-circular asphalt specimens. Nevertheless, the average healing ratios remained relatively constant, showing that specimens could be reused for the seven cycles.

3.5. Temperature analysis of samples

The temperature analysis was performed using a specialized software [28]. For each specimen, the temperature was recorded for 10–12 s immediately after the 40 s microwave heating was finished. Then the microwave door was opened with the infrared camera recording. To obtain representative results, temperature was obtained in 43 points of the sample surface. The location of each point was selected so that each point covered approximately the same area of the specimen face (91.3 mm² total area). Since the time was recorded for 11 s, a total of 43 × 11 = 474 points were recorded in each test. Outliers were detected in the data collection; hence, the 10 maximum and minimum 10 temperatures collected were eliminated from the analysis, with a total of 454 data for each temperature measurement. Typical infrared images obtained at t = 10 s for a sample without RAP and 2% metal fibers, and for a sample

with 30% RAP and 4% metal fibers are shown in Fig. 9a and b, respectively.

The average temperatures during the 11 s tests ranged from 54 to 87 °C, with a general average of 69 °C. The detailed temperature results for each sample are shown in Fig. 10. The average of temperatures measured in samples without RAP was 67.0 °C (SD = 9.3 °C); whereas, 75.3 °C (SD = 7.9 °C), 71.4 °C (SD = 7.2 °C), and 67.4 °C (SD = 3.3 °C) were measured as averages for specimens with 10%, 20% and 30% of RAP, respectively. The average temperature for specimens with fiber contents of 0%, 1%, 2%, and 4% were 70.2 °C (SD = 7.5 °C), 70.6 °C (SD = 12.9 °C), 67.8 °C (SD = 4.0 °C), and 67.3 °C (SD = 3.99 °C), respectively. Therefore, no clear effect could be established between measured surface temperature and RAP content. Similarly, no overall effect could be established between metal fiber content and surface temperature. The temperatures obtained are lower compared to those of other studies [33] where the average temperature after heating was 98.7 °C, and the healing ratios were higher than those obtained in the present study. Conversely, in a separate study [32], surface temperatures of 45–60 °C were obtained, and healing ratios were higher than those obtained in this research.

Results also show that samples without fibers could be heated between 60 and 80 °C because microwave is optimized to heat compounds with polar molecules such as bitumen [32], and also because aggregates contained metals that can be heated with microwave radiation [34,35]. Metals were detected in CT-Scan results, detailed below in this paper. To verify that aggregates could be heated without metal fibers, approximately 500 g of the 19 mm aggregate fraction of the mixture (Fig. 1a) was microwaved for 60 s. As a result, the temperature of the aggregate measured

with an infrared thermometer increased to 106.3 °C immediately after heating, showing that aggregates could absorb heat.

3.6. Evaluation of the CT-Scan results

3.6.1. Analysis of voxels histograms

In the histogram of the voxel values, the transition between air and solids was a null in the derivative of the histogram values. Nevertheless, transition from bitumen to aggregate was less apparent, and was identified as the first maximum in the derivative of the histogram at voxel values above the air-solids transition. Due to the relatively low spatial resolution of the reconstruction of the CT-Scan images, as compared to the diameter of the metal fibers, it was not possible to clearly identify a definitive marker for the transition between aggregate and metal fibers. Nevertheless, the image filter options of the reconstruction software helped to identify an approximate threshold between aggregates and fibers by visual inspection. Metal particles were also observed in the aggregates, which were difficult to separate from the metal fiber count because the aggregates had similar densities to the fibers. Finally, a threshold was defined for the transition from aggregates to fibers for all the CT-Scan analyses conducted, and results were consistent with the metal fiber contents added to each asphalt mixture.

3.6.2. Spatial distribution of fibers in the mixture

For the analysis of the spatial distribution of metal fibers, each sample scan was virtually subdivided into 12 volumes of approximately 1.8 cm³, using a software for CT-Scan analysis [36] (Fig. 11). For each sub-sample, the histograms containing the frequency of

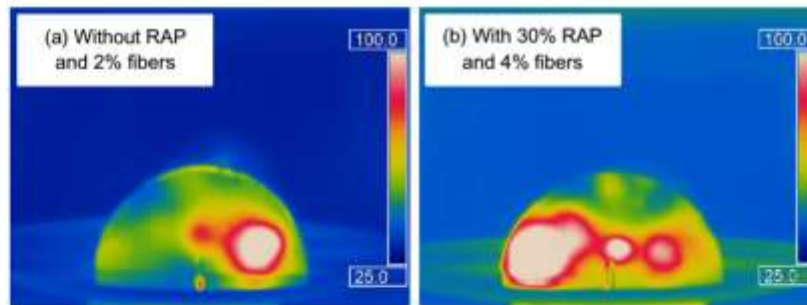


Fig. 9. Infrared temperature profiles for asphalt samples heated by using microwave radiation.

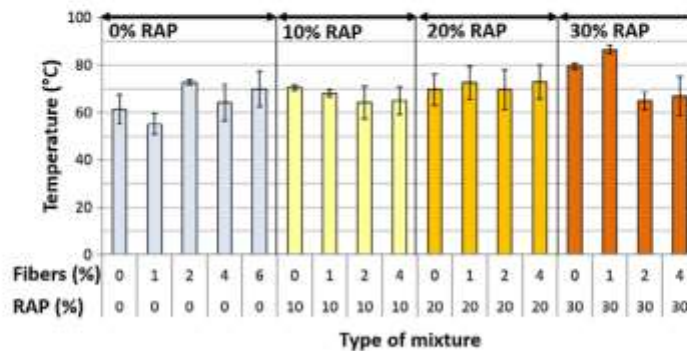


Fig. 10. Average of surface temperatures measured after heating, in samples heated in microwave.

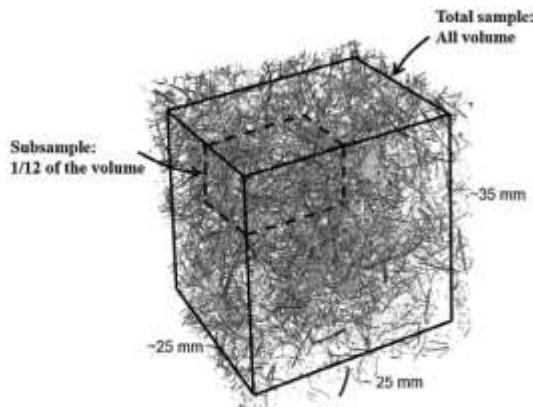


Fig. 11. Partition of the volume analyzed in the CT-Scans.

voxels were exported to spreadsheets for detailed analysis using scripts written in a computer code [29]. In addition to the calculation of the fiber contents for the 12 sub-samples, the fiber content for the total sample was calculated. Little difference between the fiber content in the total sample, and the 12 sub-samples should be obtained in mixtures with a homogeneous metal fiber distribution. Conversely, a mixture with poor fiber distribution should concentrate the metal fibers in specific spots of the sample, and therefore it would be expected to find a large difference between the fiber content in the total sample some of the 12 sub-samples. Since it was difficult to match exactly the fiber content of the mixtures analyzed with the CT-Scan results, correction factors to approximately equal the fiber content with the measured content were introduced into the analysis to achieve a better agreement between the CT-Scans and the known material proportions of the mixtures. The adjustments applied, however, do not affect the objective of calculating the spatial distribution of metal fibers, since the fiber content calculation for all the sub-samples and total sample was equally affected by the analysis.

The results for the spatial analysis are shown in Fig. 12. The bars represent the calculated fiber content for each sub-sample, and many sub-samples had a metal content similar to the target contents of the mixtures; however, for some sub-samples the metal content doubles the target value. For example, sub-sample 10 for the mixture with 30% RAP and an average fiber content of 2% shows a fiber content of 4.9%. Similar results were observed for samples with 0% RAP and 2% fibers (see sub-sample 11) and

sub-samples 6 and 10 for mixture with 30% RAP and 2% fibers. This analysis shows that spontaneous fibers concentration occurs in mixtures with and without RAP, and for different fiber contents, despite the efforts made during the mixing phase in the laboratory to avoid clustering of fibers. In addition to the fiber clusters, metal concentration was observed in some aggregates. For example, in the mixture with 0% RAP and 4% fibers, 7.9% of metal in sub-sample 1 is explained by an aggregate with higher metal concentration.

To confirm the numerical analysis of the histograms, three-dimensional and cross-sections images of the CT-Scan were thoroughly analyzed. The three-dimensional image for the mixture with 2% fibers and 30% RAP is shown in Fig. 13a. In the Figure, it is possible to see a cluster of metal fibers that belongs to the sub-sample with the highest concentration of fibers mentioned above. The three-dimensional image for the mixture with 4% fibers and 0% RAP is shown in Fig. 13b, where the metal concentration from aggregates is shown in the upper left part of the sample. Note that metal from the aggregates is shown as small dots or spheres instead of the long thread shape of the fibers. In addition, it is clear that the overall higher concentration of fibers of Fig. 13b compared to Fig. 13a, explains the higher air voids in mixtures with higher fibers contents. The denser concentration of fibers, makes it more difficult for the bitumen mastic to flow and fill the voids.

3.6.3. Qualitative analysis of aggregate fracture and fibers through the cracks

A qualitative analysis of the cracks produced by the three point tests, and the fiber location through the cracks was performed examining the CT-Scan images. For a faster analysis, the images were organized in sequences using an image software [26], so that it was possible to identify the cracks and fibers by superposing several images of the sample cross sections. The analysis showed that the cracks induced by the three point tests started from the notch and then typically followed the mastic of the asphalt mixture or the transition between the mastic and the larger aggregate particles. In addition, cracking of the aggregates was observed in the CT-Scan top view images of the specimens tested (see Fig. 14a). The very stiff condition of the bitumen at the testing temperature of -20 °C favored the crack propagation through the aggregate. The fracture of the aggregates does not favor the healing of asphalt mixtures, since the fractured surface does not contain bitumen that can flow and seal the crack when heated under microwave radiation. Nevertheless, after several healing cycles the bitumen could flow to the aggregate fractured surface and improve the crack-sealing. Although this phenomenon was not investigated in this paper, it should be further analyzed in future research.

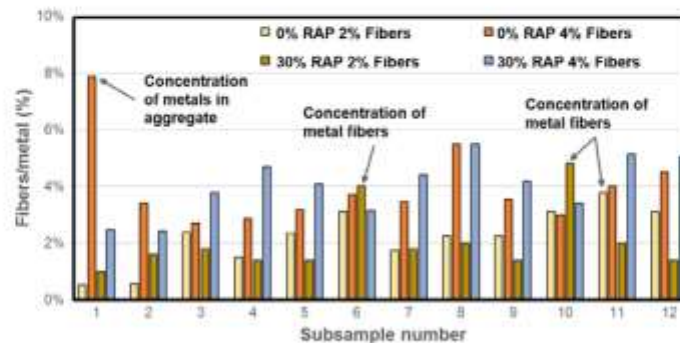


Fig. 12. Metal fiber content for each sub-sample.

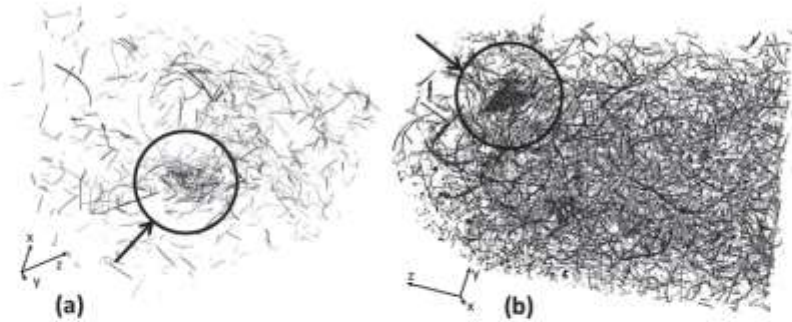


Fig. 13. Three-dimensional reconstruction of samples with (a) 2% fibers and 30% RAP and (b) 4% fibers and 0% RAP.

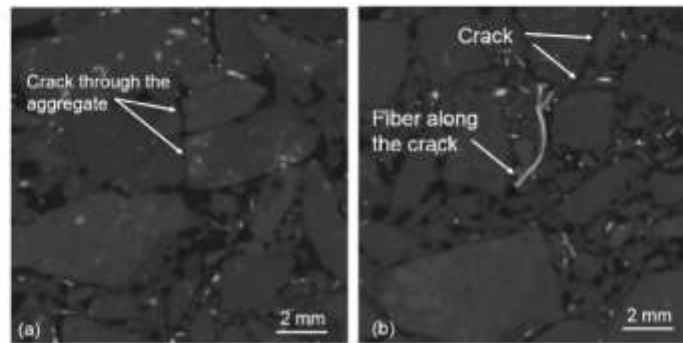


Fig. 14. Top cross-section of the samples after seven healing cycles (a) cracking through the aggregate and (b) fiber orientation throughout the crack.

In addition to the aggregates, the condition of the fibers through the crack was examined with the CT-Scan images (see Fig. 14b). Fracture of fibers was not observed, indicating that the strength of the fibers can withstand three point strength test loads. Nevertheless, it was apparent that, during the heating, fibers align with the direction of the crack, following the fracture trajectory, which could be caused by the bitumen flow and when, after fracture in three point tests, the two parts of the samples are held together, pushing the fiber onto the fractured face. The orientation of the fibers in the direction of the crack should improve the healing since the healing will cover a larger surface of the fractured face, helping the bitumen to flow throughout the crack.

4. Conclusions

This paper has explained the effect of adding RAP and metal fibers on the properties of asphalt mixtures with crack-healing capabilities gained by microwave radiation heating. Based on the analysis of results, the following conclusions can be drawn from this study:

- No clear effect of the RAP content was observed on the bulk density of the mixtures, while a decrease in the bulk density was observed for increasing fiber content. Conversely, a decrease in the air voids was measured with increasing RAP content, and a general increase in the air voids content was measured with increasing fiber contents.
- The indirect tensile stiffness modulus of mixtures with a constant fiber content increased for increasing RAP contents, while the stiffness modulus decreased with increasing temperature

for fiber mixtures and different RAP contents. The addition of fibers does not induce anisotropic behavior of asphalt mixtures with RAP in the plane perpendicular to the coaxial axis of the specimens.

- The general effect of the addition of RAP into the asphalt mixtures was a decrease in the healing ratio. Conversely, the general effect of the fiber content was an increase in the healing of the mixtures.
- The average surface temperature of the asphalt samples after microwave heating ranged from 54 to 87 °C, with an average of 69 °C.
- Clusters of fibers were found from CT-Scan images although during the mixing particular care was taken to reduce this effect. It was found that the aggregate particles of the mixtures contained metals, which explains the heating of samples without fibers. Also, it was found from CT-scans that aggregates not coated by bitumen were cracked during the three point bending tests, leaving parts of the cracked surface not coated with bitumen.
- Overall, it is concluded that asphalt mixtures with up to 30% of RAP and metal fibers have the potential of being crack-healed by microwave heating.

Acknowledgments

The authors would like to thank: José Luis Concha from LabMAT at the UBB, Elber Gajardo and Horacio Moya from CIMAT UDD, Shi Xu and Arjan Thijssen from TU Delft, and Jonathan Valderrama from UTFSM for their assistance in this research. The authors also

acknowledge Rogelio Zúñiga from Asfalcura for donating the materials used in this research, and the Direction of Research from UDD for providing the funding to complete this research at TU Delft.

References

- [1] Y. Huang, *Pavement Analysis and Design*, second ed., Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2004.
- [2] EAPA, European Asphalt Association, [Online]. Available: <<http://www.eapa.org/asphalt.php>>, (accessed: 01-Aug-2017).
- [3] N. Thoen, *Principles of Pavement Engineering*, second ed., London, 2014.
- [4] Limbing Wang, *Mechanics of Asphalt*, first ed., McGraw-Hill, 2011.
- [5] B. Picoux, A. El Ayadi, C. Petit, Dynamic response of a flexible pavement submitted by impulsive loading, *Soil Dyn. Earthquake Eng.* 29 (5) (2009) 845–854.
- [6] Asphalt Institute, *Construction of Hot Mix Asphalt Pavements*, 2003.
- [7] K. Yr, D.N. Little, R.L. Lytton, Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures, *J. Mater. Civ. Eng.* 15 (1) (2003) 75–83.
- [8] G.D. Airey, State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials, *Int. J. Pavement Eng.* 4 (2003) 165–176.
- [9] J. Norambuena-Contreras, I. González-Torre, Influence of geosynthetic type on retarding cracking in asphalt pavements, *Constr. Build. Mater.* 78 (2015) 421–429.
- [10] G.D. Airey, C. Young-Kyu, State of the art report on moisture sensitivity test methods for bituminous pavement materials, *Int. J. Pavement Eng.* 3 (4) (2002) 355–372.
- [11] P. Ayar, F. Moreno-Navarro, M.C. Rubio-Gámez, The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review, *J. Cleaner Prod.* 113 (2016) 28–40.
- [12] A. García, Self-healing of open cracks in asphalt mastic, *Fuel* 93 (2012) 264–272.
- [13] J. Gallego, M.A. Del Val, V. Contreras, A. Pérez, Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing, *Constr. Build. Mater.* 42 (2013) 1–4.
- [14] Q. Liu, A. García, E. Schlangen, M. Van De Ven, Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete, *Constr. Build. Mater.* 25 (9) (2011) 3746–3752.
- [15] A. García, E. Schlangen, M. Van De Ven, Two ways of closing cracks on asphalt concrete pavements: microcapsules and induction heating, 573–576, 2010.
- [16] A. Menozzi, A. García, M.N. Partl, G. Tebaldi, P. Schuetz, Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples, *Constr. Build. Mater.* 74 (2015) 162–168.
- [17] J. Norambuena-contreras, Single and multiple healing of porous and dense asphalt concrete, 28(4) 2015 425–433.
- [18] J. Norambuena-Contreras, R. Serpell, G. Valdés Vidal, A. González, E. Schlangen, Effect of fibres addition on the physical and mechanical properties of asphalt mixtures with crack-healing purposes by microwave radiation, *Constr. Build. Mater.* 127 (2016) 369–382.
- [19] A. García, M. Bueno, J. Norambuena-Contreras, M.N. Partl, Induction healing of dense asphalt concrete, *Constr. Build. Mater.* 49 (2013) 1–7.
- [20] J. Norambuena-Contreras, V. Gutierrez Aguilar, I. González-Torre, Physical and mechanical behaviour of a fibre-reinforced rubber membrane with self-healing purposes via microwave heating, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 45–56.
- [21] M.A. Francesqui, J. Yepes, C. García-González, Top-down cracking self-healing of asphalt pavements with steel filler from industrial waste applying microwaves, *Constr. Build. Mater.* 149 (2017) 612–620.
- [22] A. Copeland, *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*, Rep. No. FHWA-HRT-11-021, no. FHWA, p. McLean, Virginia, 2011.
- [23] S. Miliutenko, A. Björklund, A. Carlsson, Opportunities for environmentally improved asphalt recycling: the example of Sweden, *J. Cleaner Prod.* 43 (2013) 156–165.
- [24] S. Liu, A. Shukla, T. Nandra, Technological, environmental and economic aspects of asphalt recycling for road construction, *Renewable Sustainable Energy Rev.* 75 (2017) 879–893.
- [25] G. Theouas, A. González, R. Dowling, Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile, *Resour. Conserv. Recycl.* 49 (4) (2007) 325–339.
- [26] J. Schindelin, I. Arganda-Carreteras, E. Frise, V. Kaynig, M. Longair, T. Pietesch, S. Pveibosch, C. Rueden, S. Saalfeld, B. Schmid, J.-Y. Tinevez, D.J. White, V. Hartenstein, K. Elceiri, P. Tomancak, A. Cardona, Fiji: an open-source platform for biological-image analysis, *Nat. Methods* 9 (7) [Jul. 2012] 676–682.
- [27] CSN, *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Stiffness*, 2012.
- [28] O. GmbH, *Optris P1 Connect*, 2014.
- [29] The Mathworks, *Matlab*, Natick, 2012.
- [30] A. García, J. Norambuena-contreras, M. N. Partl, P. Schuetz, Uniformity and mechanical properties of dense asphalt concrete with steel wool fibers, 43, 2013, 107–117.
- [31] P. Li, Z. Ding, Analysis of viscous flow properties of asphalt in aging process, *Constr. Build. Mater.* 124 (2016) 631–638.
- [32] J. Norambuena-Contreras, A. García, Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating, *Mater. Des.* 100 (2016) 404–414.
- [33] Y. Sun, S. Wu, Q. Liu, W. Zeng, Z. Chen, Q. Ye, P. Pan, Self-healing performance of asphalt mixtures through heating fibers or aggregate, *Constr. Build. Mater.* 150 (2017) 673–680.
- [34] R.K. Amanjwala, G. Džori-Sarpong, Microwave heating of gold ores for enhanced grindability and cyanide amenability, *Miner. Eng.* 24 (6) (2011) 541–544.
- [35] E.R. Bobicki, Q. Liu, Z. Xu, Microwave heating of ultramafic nickel ores and mineralogical effects, *Miner. Eng.* 58 (2014) 22–25.
- [36] *Volume graphics, VG Studio Max 3.0*.

ANEXO G

ARTÍCULO: SELF-HEALING PROPERTIES OF RECYCLED ASPHALT MIXTURES CONTAINING
METAL WASTE: AN APPROACH THROUGH MICROWAVE RADIATION HEATING



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Environmental Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jenman

Research article

Self-healing properties of recycled asphalt mixtures containing metal waste: An approach through microwave radiation heating

A. González ^{a, b, *}, J. Norambuena-Contreras ^c, L. Storey ^d, E. Schlangen ^e^a Department of Construction Engineering and Management, School of Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile^b Faculty of Engineering, Universidad del Desarrollo (UDD), Santiago, Chile^c LabMAT, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bío (UBB), Concepción, Chile^d Department of Civil Engineering, University Federico Santa María (UTFSM), Valparaíso, Chile^e MicroLab, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology (TU Delft), Delft, 2628 CN, The Netherlands

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 November 2017

Received in revised form

14 February 2018

Accepted 1 March 2018

Available online 9 March 2018

Keywords:

Asphalt mixture

Waste

Metal shavings

Crack-healing

RAP

Microwave heating

Induction heating

X-ray microtomography

ABSTRACT

The concept of self-healing asphalt mixtures by bitumen temperature increase has been used by researchers to create an asphalt mixture with crack-healing properties by microwave or induction heating. Metals, normally steel wool fibers (SWF), are added to asphalt mixtures prepared with virgin materials to absorb and conduct thermal energy. Metal shavings, a waste material from the metal industry, could be used to replace SWF. In addition, reclaimed asphalt pavement (RAP) could be added to these mixtures to make a more sustainable road material. This research aimed to evaluate the effect of adding metal shavings and RAP on the properties of asphalt mixtures with crack-healing capabilities by microwave heating. The research indicates that metal shavings have an irregular shape with widths larger than typical SWF used with asphalt self-healing purposes. The general effect of adding metal shavings was an improvement in the crack-healing of asphalt mixtures, while adding RAP to mixtures with metal shavings reduced the healing. The average surface temperature of the asphalt samples after microwave heating was higher than temperatures obtained by induction heating, indicating that shavings are more efficient when mixtures are heated by microwave radiation. CT scan analysis showed that shavings uniformly distribute in the mixture, and the addition of metal shavings increases the air voids. Overall, it is concluded that asphalt mixtures with RAP and waste metal shavings have the potential of being crack-healed by microwave heating.

© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Asphalt is the most common surface material used for pavement construction (Papagiannakis and Masad, 2008). The mass composition of a conventional asphalt mixture is 4–6% bitumen and 94–96% aggregates. Bitumen, an organic product derived from the petroleum refining process, binds the aggregate. The majority of existing asphalt mixtures have been produced with virgin aggregates and bitumen. The construction of an asphalt pavement involves quarrying of aggregates, producing bitumen, operating the asphalt plant, and laying and compacting the asphalt layers, with all the transportation operations associated with these activities.

Once constructed, traffic, environment and other external factors deteriorate asphalt pavements; cracking is one of the most common signs of distress and is caused by a number of factors such as fatigue, low temperatures, and bitumen ageing. Although cracks are a problem, since they reduce the structural capacity and increase the permeability, in asphalt pavements cracks can heal by themselves if bitumen reaches a temperature between 30 and 70 °C (Ayar et al., 2016). The crack-healing is caused by the physical characteristics of bitumen that reduce viscosity with temperature increase. When low viscosity is achieved, the bitumen flows through the open micro-cracks, similar to a capillary flow (García, 2012). Cracks heal when the bitumen temperature decreases and viscosity increases. Then, the bitumen that has flown through the micro-cracks binds the two faces of the crack, partially restoring the structural strength of the asphalt mixture.

The principle of self-healing asphalt mixtures by bitumen temperature increase was used to create an asphalt mixture with

* Corresponding author. Department of Construction Engineering and Management, School of Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

E-mail address: algonzav@ing.puc.c (A. González).

crack-healing properties (García et al., 2010; Liu et al., 2011). In these mixtures, metals, normally steel wool fibers, are added because they absorb and conduct more thermal energy than bitumen and aggregates, improving the electrical conductivity of the mixtures (Menozi et al., 2015). To artificially heat and heal this type of asphalt mixture, an external electromagnetic field, such as those applied by electromagnetic induction or microwaves, is used to increase the fiber temperature. Later, the fiber heat transfers to the bitumen and aggregates, reducing the bitumen viscosity and repairing open cracks (Gallego et al., 2013; García et al., 2015). Only recently has the effect of adding reclaimed asphalt pavements (RAP) to asphalt mixtures with steel wool fibers and crack-healing properties been evaluated (González et al., 2018), concluding that the addition of steel wool fibers increases the crack-healing of the mixtures, while adding RAP decreases the healing of this type of mixtures, when microwave heating is applied. One disadvantage of adding steel wool fibers is that they tend to cluster in balls and increase the air void content of the mixtures. This increase in porosity is associated with a reduction of the mechanical properties. Other researchers (Frasnesqui et al., 2017), have only evaluated the effect of adding metallic waste in the heating of asphalt mixtures, without assessing the crack-healing capabilities. Also, a number of waste materials are used in asphalt mixtures without healing purposes, with the aim of replacing virgin materials with waste, or improving other properties of the mixtures (Abreu et al., 2015; Arabani and Tahami, 2017; Calabi-Floody and Thenoux, 2012; Poulidakos et al., 2017; Sun et al., 2017).

Metal shavings, small, irregular tendrils of 5–10 mm length that are a waste from the metal industry, are commonly obtained from metal turnery or machining. Because metal shavings can persist in the environment for a long time before oxidizing and degrading, it is important to find new applications where they can be used to improve the properties of a different material. Since metal shavings are an electrically conductive material similar to steel wool fibers, they could be used to improve the self-healing properties of asphalt mixtures with RAP. In other words, distressed existing asphalt pavements that need restoration could be retrofitted and transformed into sustainable asphalt pavement with crack-healing properties by microwave radiation (Fig. 1). Distressed asphalt can be milled and transported to asphalt plants for storage and later addition to new asphalt mixtures. The mixing process adds metal shavings to the asphalt, and the final mixture with RAP and metal shavings could be healed via microwave external heating.

This research aimed to evaluate the effect of adding metal shavings and RAP on the properties of asphalt mixtures with crack-healing capabilities by microwave radiation heating. This study is part of a long-term research effort in which the effect of adding different metals or other additives in asphalt mixtures with crack-healing properties is explored. The development of these types of mixtures could lead to new, sound asphalt pavements that are environmentally sustainable.

2. Materials and experimental methods

2.1. Aggregates, RAP, and bitumen

The particle size distribution of the aggregates and RAP was selected to prepare dense asphalt mixtures. The aggregates, RAP, and bitumen were sourced from a local construction company based in Santiago, Chile. This company mills and stores RAP used for road construction and other applications in separate piles. The aggregates and RAP were provided in different fractions that were combined to produce four blends of aggregates with RAP contents of 0%, 10%, 20%, and 30%, by mass. The particle size distribution of the four aggregate and RAP blends was very similar (Fig. 2). The

penetration grade of the CA24 bitumen used for mixture preparation was 80/100 mm at 25 °C. The bitumen content for all mixtures was 5.2% by volume, which considered the fresh bitumen and the bitumen contained in the RAP fraction of the mixture.

2.2. Metal shavings

Steel shavings (Fig. 3) are formed of ferritic stainless steel with a density of 7.980 g/cm³. The studied shavings had an average width of 1.310 mm and initial length within the range 3–21 mm; both short and long shavings with different types of geometries were added to the asphalt matrix. Some shavings had helicoidal shape while others were curled long metal particles. The metal shaving contents by total volume of the bitumen were: 0%, 1%, 2%, and 4%.

To determine the morphological characteristics of the metallic waste added to the asphalt mixtures, 120 individual shavings were randomly selected. The length and width of the shavings were determined by using an optical microscope with 35× magnification. The images were analyzed using a specialized software (Schindelin et al., 2012). The morphological variables were presented in frequency histograms with the aim of comparing their length and width distribution. In addition, the detailed morphology of individual shavings was studied using a Scanning Electron Microscope.

2.3. Preparation of asphalt mixture specimens

The sequence for the preparation of asphalt mixtures was the following: 1) heat the aggregates, RAP, bitumen, and bowl in the oven for at least two hours at 150 °C before mixing; 2) place the hot bitumen in the hot metallic bowl; 3) gradually add metal shavings to the bitumen, constantly stirring the bitumen to avoid clusters of shavings; 4) add four small batches of aggregate/RAP blend, starting with the batch with the largest particles. Once each batch of particles was completely coated with fresh bitumen, the next batch with smaller particles was added to the mixture.

Once the four batches of aggregates had been added, and the mixture was homogenous, a sample of approximately 1200 g was placed in a pre-heated Marshall mold. Then the mixture was compacted using a Marshall hammer, giving 75 blows to each face of the specimen. The cylindrical Marshall specimens, 100 mm in diameter and approximately 60 mm in height, were left at room temperature in the laboratory for at least one day. The next step was to produce four semi-circular samples by cutting one Marshall specimen, first through its diameter, and secondly through a plane parallel to the original specimen face using a saw for asphalt. Thus, the dimensions of the semi-circular asphalt samples were 100 mm in diameter and approximately 30 mm thick (Fig. 4). In addition, to guide the cracking of the sample during the three-point bending test, a 10-mm depth, 3 mm thickness notch was cut at the midpoint of the sample base.

2.4. Crack-healing tests by microwave radiation

The simple three-point bending test was conducted on semi-circular samples to calculate the flexural strength of asphalt. These tests have been previously used to assess the healing capabilities of asphalt mixtures (González et al., 2018; Norambuena-Contreras et al., 2016; Norambuena-Contreras and García, 2016). In these tests, the specimen is placed onto two supporting rollers separated by 80 mm (Fig. 4). A third loading roller is positioned at the midpoint of the semi-circular arch of the sample. The test starts by applying a monotonic load that induces tensile stress at the upper tip of the vertical notch located at the bottom of the sample. The notch guides the crack propagation in the upper direction

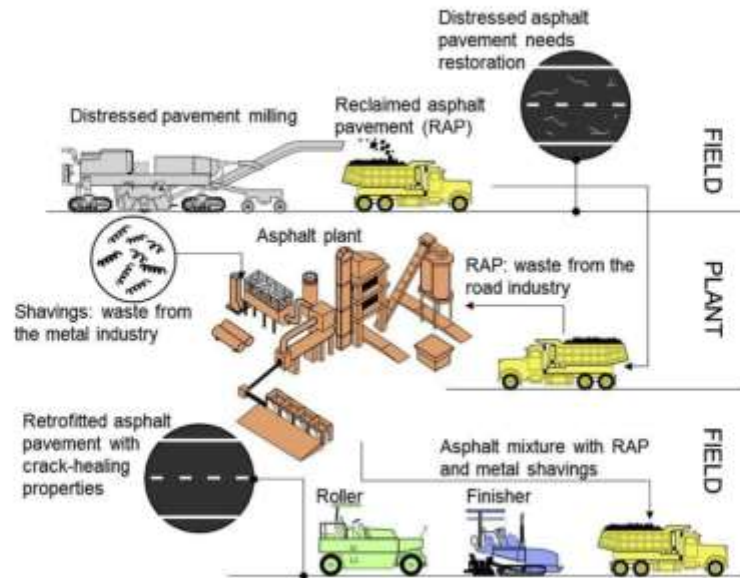


Fig. 1. Conceptual framework of retrofitting conventional, distressed asphalt pavements into a new sustainable asphalt pavement with crack-healing properties.

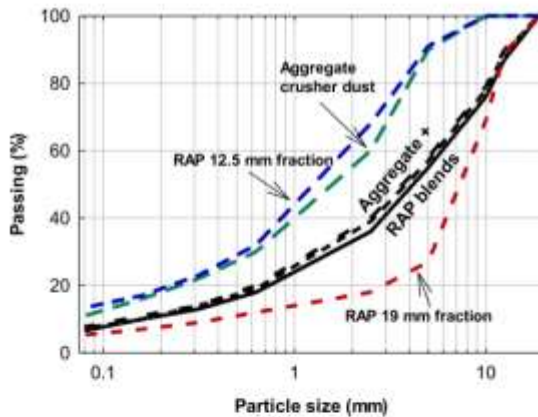


Fig. 2. Particle size distribution of aggregates, RAP, and aggregates/RAP blends.

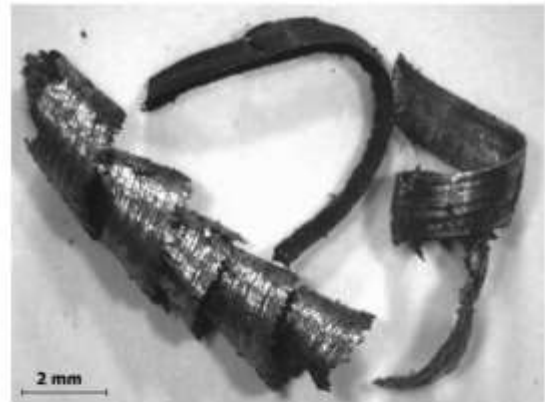


Fig. 3. Optical image of metal shavings used in the study.

during the test. In this study, the three-point bending tests were conducted at -20°C to achieve brittle behavior of the mixtures and a single crack throughout the sample. The microwave healing of the asphalt mixtures was assessed with the *healing ratio*, i.e., the ratio between the three-point bending strength F_i of the sample after the i_{th} healing cycle, and the initial strength F_0 of the same sample before healing. The monotonic universal testing machine loaded the samples up to failure, recording the peak load. The load speed ratio applied by the machine was set at 0.5 mm/min. Once the bending test finished, cracked asphalt samples were withdrawn from the loading machine and left at room temperature for 3 h until they reached approximately 20°C . The surface of the samples was examined to verify that the surface moisture resulting from freezing had completely dried. The experimental matrix for the

crack-healing tests are presented in Table 1. In the table, the four RAP content levels (0, 10, 20, and 30%) and four shavings content levels (0, 1, 2, and 4%) are shown. Each black dot represents the five semi-circular specimens tested. The average initial strength is F_0 , and the average strength measured in the same specimens after i_{th} healing cycle is F_i . The reported healing ratio for the i_{th} healing cycle is the quotient between F_i and F_0 .

The semi-circular specimens were healed by microwave heating. Microwaves are electromagnetic waves, similar to X-ray waves, but different in their frequency range from 100 MHz to 100 GHz (Al-Othay and Terrel, 1998). Microwave heating has a number of advantages over other heating techniques, for example, heating efficiency, selective energy absorption, and temperature control. The efficiency of a material in absorbing microwaves is described by its dielectric properties (Sun et al., 2018). In this study, microwave

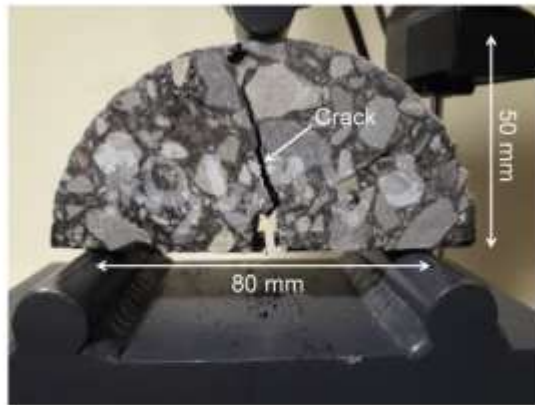


Fig. 4. Cracked semi-circular asphalt sample.

heating was applied for 40 s to the previously cracked semi-circular samples by using a 700 W microwave oven with a work frequency 2.45 GHz, which corresponds to an approximate wavelength of 120 mm. The heating time was found suitable for microwave healing based on previous research results (González et al., 2018; Norambuena-Contreras et al., 2016; Norambuena-Contreras and Gonzalez-Torre, 2017). A total of seven damage-healing cycles were carried out in the test samples.

2.5. Heating by induction radiation

In addition to the healing using microwave radiation, some specimens were heated by induction. Induction heating is the process of heating electrically conductive materials, by electromagnetic induction. In the heating process, an electrical current is applied in a conductive coil, creating an alternating electromagnetic field, with a frequency in the range of kilohertz to megahertz. The electromagnetic field creates a current in the conductive material, such as metal shavings, increasing their temperature by polarization effects (Sun et al., 2018). In this research, specimens were heated for 180 s using a 50 kW, 70 kHz induction machine. The objective of heating cracked samples with a different heating method was to compare the efficiency of heating mixtures with metal shavings under both microwave and induction technologies.

The configuration of the induction heating was different from that of the microwave radiation, as the induction was applied by a flat, horizontal coil. The sample was located below the coil, with its coaxial axis perpendicular to the horizontal plane. The 180 s induction heating was applied only once on samples that had previously been repaired seven times with microwave heating. The heating time was calculated based on previous research (González et al., 2018) where induction and microwave heating was conducted on asphalt samples. The 180 s induction heating is equivalent to the microwave heating time of 40 s. In addition to the induction heating, 40 s microwave heating was conducted on the specimens, with the aim to compare the temperature of specimens using both methods. The specimens selected for the heating study are shown in the experimental matrix (Table 1) below column T°. The specimens that were heated with microwaves only are shown had RAP contents of 0, 10, 20, and 30%, and shaving contents of 0, 2, and 4%. This is shown in the experimental matrix (Table 1) where T° indicates the temperature study, and "m" the specimens heated by microwaves.

2.6. Temperature analysis in samples heated by microwave and induction

The temperature of the semi-circular samples was measured on their surface using a 320 × 240 pixels full color thermographic camera during 10 s immediately after microwave heating. In addition, the temperature was measured for 10 s after induction heating, as explained in the previous section. The temperature was recorded for 10 s after heating using the same type and model of camera.

2.7. X-ray computed tomography (CT scan)

Micro-computed tomography was carried out in asphalt mixtures with different RAP and metal shaving contents. For the tests, prismatic samples with dimensions of approximately 30 mm height, 30 mm width, and 50 mm length were cut from the center of the semi-circular samples after the seven healing cycles. The X-ray micro-tomography scans were obtained using a scanner operated at 160 kV and 200 μA. Images were reconstructed at a spatial resolution of 25 μm (voxel side), and the segmentation of the voxels was conducted to identify the different fractions of the mixture components, in particular of the metal shavings. Later, with the reconstitution of a three-dimensional model of the metals in the asphalt samples, it was possible to visualize the shavings

Table 1
Experimental matrix for the crack-healing tests and heating tests.

| Shavings content (%) | RAP content (%) | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-----------------|---|----|---|----------------|---|----|---|----------------|---|----|---|----------------|---|----|---|
| | 0 | | | | 10 | | | | 20 | | | | 30 | | | |
| | Healing cycles | | T° | | Healing cycles | | T° | | Healing cycles | | T° | | Healing cycles | | T° | |
| 0 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| 1 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| 2 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| 4 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |

Note: • = Five semi-circular specimens for three-point bending test; F₀=initial strength before healing; F₁=strength after the 1st healing cycle using microwaves; T°=temperature test; m=heating by microwaves in the heating test; mi = heating by microwaves and induction in the heating test; φ = specimens for temperature tests.

distribution in the mixtures. Each sample tested in the CT scan had more than 2.4×10^9 voxels.

3. Results and discussion

3.1. Analysis of metal shavings morphology

Frequency histograms for all the morphological data measured using the optical microscope are presented in Fig. 5. The average length of the shavings was 7.181 mm (SD = 3.368 mm), with only a small fraction shorter than 5 mm. The average length is similar to metal fibers that have been previously used in other studies (García, 2012; Norambuena-Contreras and García, 2016), even though the range of the shavings length is larger, between 0.2 and 20 mm. The average width of the shavings was 1.310 mm (SD = 0.877 mm), about 10 times larger than steel wool fibers used in previous studies (González et al., 2018).

Moreover, Fig. 6a and b presents SEM images of individual metal shaving cross sections. Fig. 6a shows the edge irregularities of the metal shavings that have been obtained from steel turnery. The blades used for the machining apply forces on the metal surface in different directions and magnitudes, and the blades used to shape the metal were subjected to different types of vibrations and spinning angular speeds, which produce flaws on the surface of the shavings (Fig. 6b). Additionally, the cross section of the shavings presented different widths. The edge flaws and overall complex geometry of the metal shavings surface observed in SEM images do not favor the bitumen flow during compaction, although these help to increase the adhesion of the metal shavings to the asphalt matrix, reducing the pull-out failures by external mechanical effects.

3.2. Effect of metal shavings and RAP on the crack-healing ratios

A total of 560 semi-circular samples were evaluated for crack-healing properties of asphalt mixtures with metal shavings and RAP by means of three-point bending tests. The average healing ratio of the 560 tests, for all mixtures and cycles, was 0.5215 (SD = 0.1422). Fig. 7 presents the general effects of the metal shavings and RAP contents for the asphalt mixtures. Fig. 7a presents the healing ratio for each metal shaving content, averaging results from the four RAP contents and the seven healing cycles. Fig. 7b shows the healing ratio for each RAP content averaging all the shaving contents and the seven healing cycles. The average healing ratio shown in Fig. 7a for the mixtures without metal shavings was

0.4526 (SD = 0.1773), while the average for the mixtures with metal shavings was 0.5374 (SD = 0.1279), indicating that metal shavings improve the healing of asphalt mixtures. An ANOVA test with a significance level $\alpha = 0.05$ was conducted to further study the effect of RAP, and the effect of fibers. For the RAP, the F-value obtained from the analysis was 24.33, with a p-value < 0.001, indicating that RAP has a significant effect in the healing ratio. Similarly, for the fibers the F-value was 26.56, with a p-value < 0.001.

Furthermore, the effect of the metal shaving addition was a reduction in the standard deviation of the healing ratios, represented by the error bars (one bar = 2 standard deviations). The general effect of adding 1% of metal shavings was an increase in the healing ratio; however, for 2% and 4% the ratio decreased. The general average for all the mixtures without RAP in Fig. 7b was 0.5968 (SD = 0.1192) and the average healing ratio for all the mixtures with RAP was 0.4872 (SD = 0.1387), indicating that the addition of RAP decreases the healing for a constant microwave heating time of 40 s ($p < 0.001$).

In addition, Fig. 8 shows the detailed healing ratio results for each healing cycle and shavings content. Each column indicates the average of five three-point bending strength values. In some cases, within the five results there were outliers that were eliminated from the analysis, but all the columns show the average of at least four tests. In Fig. 8 the half error bar in the upper direction represents one standard deviation. The general trend for mixtures with and without RAP indicates a decrease in the healing ratio with the number of healing cycles. However, this trend was not clearly observed for most of the mixtures during the first three cycles during which the healing ratio remained constant or showed some increase.

Fig. 8a shows results for the mixtures without RAP with shavings contents from 0% to 4%. The mixtures with 1% metal shavings yielded the highest healing ratios, while the mixture with 4% shavings gave the lowest healing. Fig. 8b shows the detailed results for mixtures with 10% RAP and shavings contents between 0% and 4%. The mixture with 1% metal gave the highest healing ratios, followed by the mixture with 2% shavings. These two mixtures showed a gradual decrease in the healing ratio after the third cycle. The mixtures without shavings and 4% shavings gave healing ratios between 0.33 and 0.50, lower than 1% and 2% shavings. Fig. 8c presents the results for 20% RAP, showing that mixtures without metal gave the lowest healing ratios with an average of 0.3489 (SD = 0.1479) for all healing cycles, while the 2% shavings mixtures yielded an average healing ratio of 0.5712 (SD = 0.0715). In these

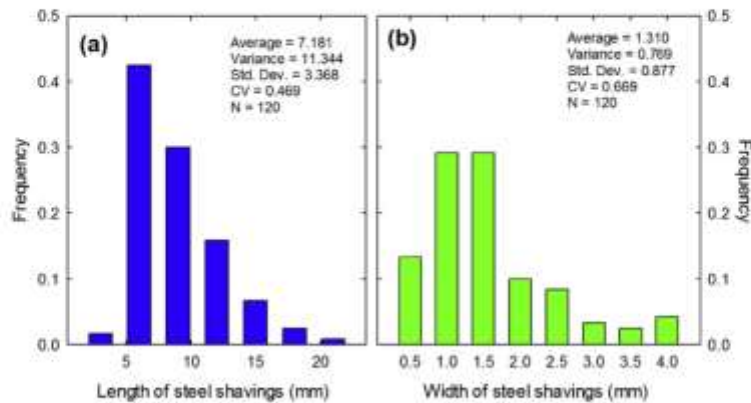


Fig. 5. Frequency histograms for the (a) length and (b) width of the metal shavings.

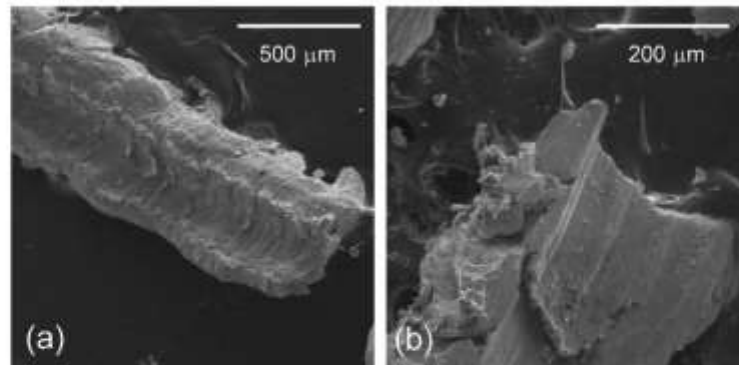


Fig. 6. SEM images of individual metal shavings before mixing and compaction process.

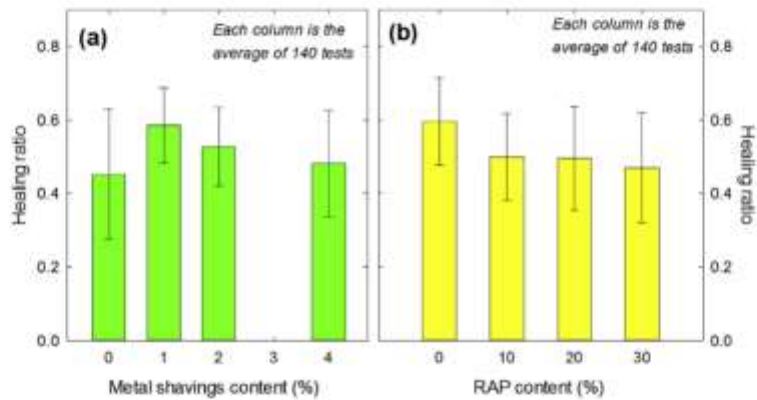


Fig. 7. General effects of (a) metal shavings content and (b) RAP content in mixtures with metal shavings.

mixtures, the healing ratio increased up to the second or third cycle and then gradually started to decrease until the last cycle. Fig. 8d shows the healing ratio results for mixtures with 30% RAP. The mixture with 1% shavings gave the highest healing ratio of 0.6173 (SD = 0.0847), while the average performance for the other mixtures with different shavings content was similar. The healing ratio for most of the mixtures increased up to healing cycle three and then decreased.

3.3. Evaluation of the CT-Scan results

3.3.1. Qualitative analysis of 3D images

Fig. 9a shows the three-dimensional reconstitution of the CT scan on a mixture with 4% metal shavings and 30% RAP content and shows different shape patterns distributed throughout the scanned sample. Helicoidal shavings of different diameters, width, and spatial orientation confirm the heterogeneity of this type of metal. In the scan, it was possible to identify the irregular shape of the shavings edges. Two types of shavings shapes are clearly identified: helicoidal shavings that are stretched in a similar manner to a linear spring, in three dimensions, and shavings that are rolled around one axis, similar to a torsion spring, in two dimensions. The shavings have a thin thickness compared to their length and width, on the order of 0.1 mm. In previous studies (González et al., 2018;

Norambuena-Contreras et al., 2016), clustering of metals has been observed in steel wool fibers that agglomerate because they have spontaneous attraction caused by electrostatic currents created by friction with the air or friction between fibers. However, in this study, no apparent clustering of metal shavings was observed in the CT scan images. In addition to shavings, metal powder was found in the aggregates used in this research and is shown in Fig. 9a and b as small, spherical, white spots distributed in the studied volume. Fig. 9b shows the shavings CT scan for a mixture with 2% metal shavings and 30% RAP content. As expected, less metal is observed in the figure, with only a few particles with a linear spring shape. The figure also shows the irregular edges of the shavings and smaller pieces of metals. The spherical spots confirm that the aggregates used in this research contained metal powder; however, these spots may also correspond to metal powder resulting from shredding of metal shavings, or the effect of the mixing and compaction processes.

The different metal distribution observed in Fig. 9 explains the effect of the shavings content on the air voids of the asphalt mixtures (Fig. 10). Figures show that by increasing the shavings contents, the air voids also increase because the shape of the shavings makes the compaction process of specimens more difficult. The bitumen mastic has more difficulty in flowing through the air voids in mixtures with shavings, since the tendrils have a complex

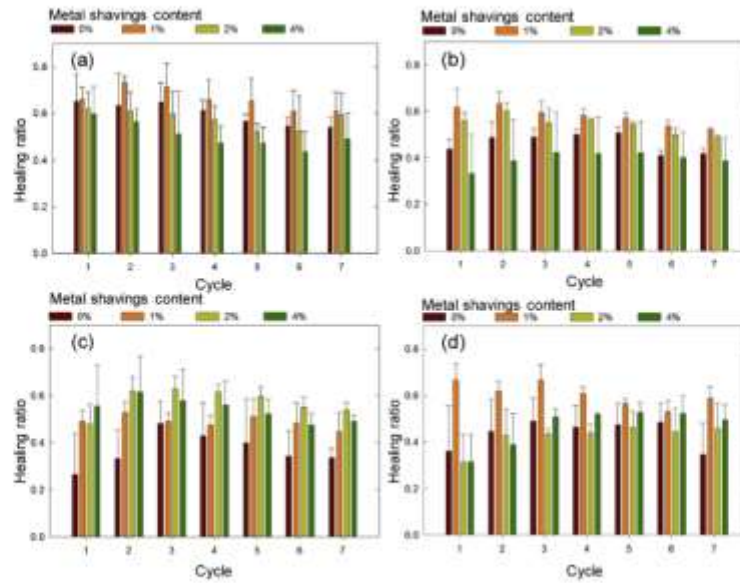


Fig. 8. Healing ratio of samples with (a) 0% RAP, (b) 10% RAP, (c) 20% RAP, and (d) 30% RAP.

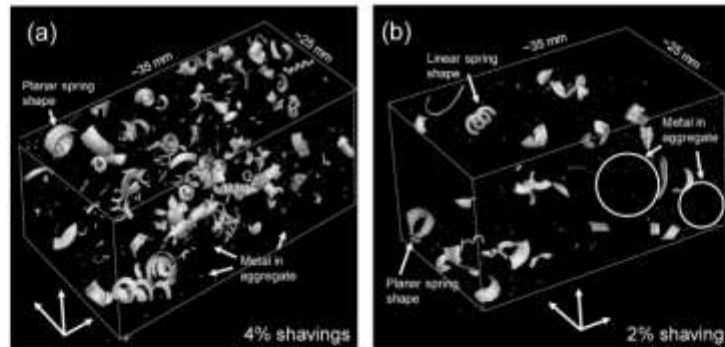


Fig. 9. Three-dimensional images from CT scans for (a) 4% and (b) 2% shavings content.

geometry that leaves voids. In addition, the surface of the shavings (see Fig. 6) has flaws that increase the friction forces between bitumen mastic and shavings, decreasing the flow of the bitumen and increasing the air void content.

3.3.2. Qualitative analysis of 2D images

In addition to the three-dimensional reconstruction of images, the two-dimensional (2D) images were available for analysis in Fig. 11. In the Figure, the dark areas are air voids and the white shapes are metal shavings. The aggregate fractions are gray, but the bitumen fraction is hard to distinguish, since its color is between that of the aggregates and air voids. There are some white to light gray spots in the aggregates; these are metal particles detected in the aggregates and that explain the heating of the asphalt mixtures without shavings.

Metal in the aggregates was also detected in another research project reported by the authors in which mixtures with RAP and

steel wool fibers were studied (González et al. 2018). In several correlative cross-sections, it was possible to identify air voids in the zone of helicoidal, randomly distributed shavings, confirming that the shape of the metal does not improve the flow of the bitumen mastic to fill air voids.

Fig. 11a shows a crack produced during the three-point bending tests. It was generally observed that cracks follow the mastic, the transition zone, and the mantle of the air voids, which correspond to the weak volume of the mixture. However, in some cases the crack propagated through the aggregate because the -20°C temperature of the three-point bending tests during breaking made the bitumen a very stiff, brittle, and strong material. Fig. 11b shows a complete cross section of the samples analyzed with CT scanning, hence the scale of the figure is different from Fig. 11a. The vertical, dark line is the approximately 3 mm thickness notch mentioned in Section 2.3. The samples analyzed in CT scans were cut from semi-circular three-point bending samples, and some samples were

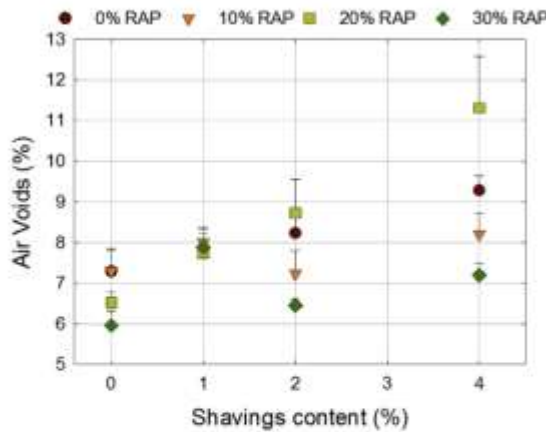


Fig. 10. Air voids versus metal shaving content in asphalt mixtures.

damaged in the weak volumes near the notch (Fig. 11b).

3.4. Temperature analysis of asphalt samples after microwave heating

A total of 43 points were sampled from the surface of the sample for 10–11 s using a specialized temperature software developed by the fabricant of the infrared camera. The location of the points was selected so that they cover the same area of the specimen. The average temperatures during the 10–11s tests ranged from 56.6 to 90.9 °C, with a general average of 71.7 °C. The detailed temperature results for each sample are shown in Fig. 12a. Results show that no significant effect could be established between metal shavings content and surface temperature. Nevertheless, there is evidence ($p = 0.033$) that average temperature in specimens without RAP (64.01 °C, $SD = 7.21$ °C) was lower than specimens with RAP (71.85 °C, $SD = 7.27$ °C). Results also show that samples without shavings reached temperatures between 65.2 and 71.9 °C, indicating that metals in the aggregates increased their temperature when heated with microwaves. To verify that aggregates and RAP could be heated without metal shavings, one sample of approximately 100 g of aggregates only, and one sample of RAP only, were heated in the microwave. Each sample was placed in a ceramic bowl

that does not heat when microwaved for 40 s. As a result, the temperature of the aggregate and RAP measured with an infrared thermometer was respectively 104.2 °C and 163.9 °C immediately after heating, showing that aggregates and RAP could absorb heat from microwaves, and explaining the temperature achieved by asphalt mixtures without metal shavings.

3.5. Temperature analysis of asphalt samples after induction heating

The results for the induction heating of specimens (Fig. 12b) show that the temperatures of the specimens heated with induction were, on average, lower than those heated with microwaves (Fig. 12a), with an average temperature of 50.85 °C ($SD = 12.1$ °C). These results were compared with temperatures measured for asphalt samples of mixtures prepared with 2% and 4% steel wool fibers. The average temperature in these specimens was 83.33 °C, which is 63.8% higher than the temperature obtained in samples prepared with metal shavings. The lower temperature measured in samples with metal shavings and heated by induction is explained by electromagnetic theory. The skin effect is a physical phenomenon that describes the nonuniform current distribution within metallic conductors such as fibers and metal shavings when alternating current is applied. The maximum value of the current density will be located on the surface of the conductor; therefore, the current density will decrease from the surface of the conductor towards its center. It has been reported that about the 86% of the current will be concentrated in the surface layer of the conductor (Rapoport and Pleshivseva, 2007). With this in mind, the shapes of the cross-section of an individual fiber and a metal shaving are schematically shown in Fig. 13. The diameter of the fibers used in these asphalt mixtures with crack-healing properties averages 0.13 mm (González et al., 2018). As previously reported in Section 3.1, the average width of the shavings was 1.31 mm. Although the thickness of the shavings was not systematically analyzed in the morphology section of this study, the thickness observed in the SEM images is approximately 0.1 mm. If a metal fiber of length L is assumed the average volume is:

$$V_{fiber} = \pi \left[\frac{D}{2} \right]^2 \cdot L = \pi \left[\frac{0.13}{2} \right]^2 \cdot L [mm^2] = 0.01 \cdot L [mm^2] \quad (1)$$

The average volume of a metal shaving of width w (1.31 mm), thickness t (0.1 mm), and length L is:

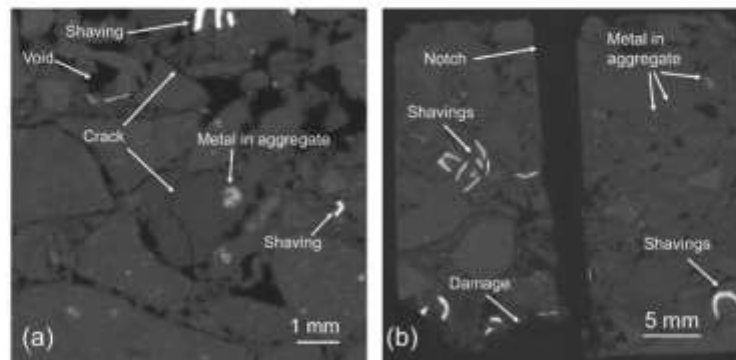


Fig. 11. Top view of asphalt samples: (a) crack through the sample and (b) the sample notch.

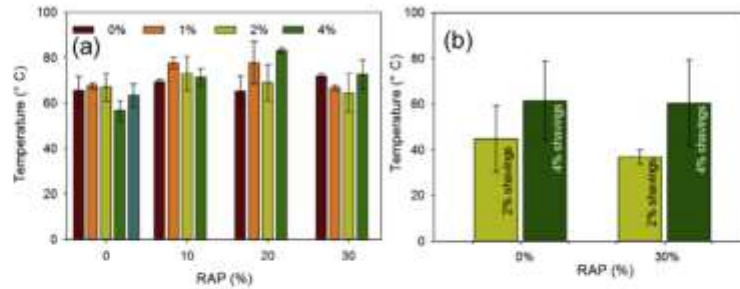


Fig. 12. Average of surface temperatures measured after (a) microwave and (b) induction heating.

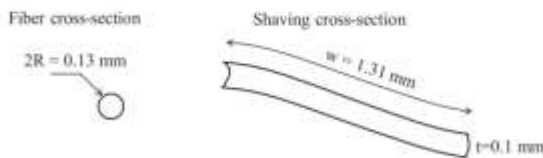


Fig. 13. Comparison of cross-sections between a metal fiber and a metal shaving.

$$V_{shaving} = w \cdot t \cdot L = 0.131 \cdot L \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2)$$

Since most of the current is concentrated on the surface, it is relevant to know the relationship between perimeter and volume. For the fibers, this ratio R_{fiber} is:

$$R_{fiber} = \frac{D\pi L}{V_{fiber}} = \frac{0.13\pi L}{0.01 \cdot L} \approx 41 \quad (3)$$

While for the metal shavings, the ratio $R_{shavings}$ is:

$$R_{shavings} = \frac{2(w+t)L}{0.131 \cdot L} = \frac{2.82L}{0.131L} \approx 22 \quad (4)$$

These calculations show that for every unit volume of metal fiber there are approximately 41 units of surface of metal, while for a unit volume of metal shaving there are approximately 22 units of surface metal. In other words, the exposed surface for the fibers almost doubles that of shavings for the same volume of metal added to the mixture, which explains the higher temperature achieved by mixtures with steel wool fibers and heated with induction radiation. Nevertheless, mixtures prepared with metal shavings and heated with microwaves achieve a similar temperature to asphalt mixtures fabricated with steel wool fibers.

4. Conclusions

This paper presents the effects of adding metal shavings and RAP on the properties of asphalt mixtures with crack-healing capabilities by microwave radiation heating and induction. Based on the analysis of results, the following conclusions can be drawn from this study:

- Metal waste shavings have an irregular shape with widths larger than steel wool fibers used in other studies for the heating of asphalt mixtures with crack-healing purposes.
- The general effect of the addition of metal shavings was an improvement of the crack-healing properties of asphalt

mixtures, while the addition of RAP in mixtures with metal shavings reduced the healing of mixtures.

- The average surface temperature of the asphalt samples after microwave radiation heating was 71.7 °C, while the temperature achieved by induction heating was 50.85 °C, indicating that shavings are more efficient when asphalt mixtures are heated with microwaves.
- CT scan analysis showed that metal shavings are evenly distributed in the mixture. The shavings have different diameters, width, and spatial orientation, confirming the heterogeneity of this type of metal. The addition of shavings increased the air voids of the mixture, which is explained by the complex geometry and rough surface of the shavings observed in SEM analysis.
- Overall, it was concluded that asphalt mixtures with waste materials have the potential of being crack-healed by microwave heating, and hence of potential use for the development of new asphalt pavements that are environmentally sustainable. Nevertheless, in future research, it is necessary to develop a lifecycle cost analysis (LCCA) and a lifecycle assessment (LCA) about this type of heating technology in order to support this conclusion.

Acknowledgments

The authors are very grateful to: Elber Gajardo and Horacio Moya from UDD and José Luis Concha and Irene Gonzalez-Torre from LabMAT at the UBB for their assistance in the laboratory work; Shi Xu and Arjan Thijssen from TU Delft for their help in the CT Scan analysis; Jonathan Valderrama from UTFSM for the help in the data analysis; and Rogelio Zúñiga from Asfalcura, for donating the materials. The authors are also grateful to Anne Bliss for the revision of the article.

References

Abreu, L.P.F., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Fonseca, P.V., 2015. Recycled asphalt mixtures produced with high percentage of different waste materials. *Constr. Build. Mater.* 84, 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.063>.

Al-Othaly, A., Terrel, R., 1998. Effect of microwave heating on adhesion and moisture damage of asphalt mixtures. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 27–36.

Arabani, M., Tahami, S.A., 2017. Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture. *Constr. Build. Mater.* 149, 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.127>.

Ayar, P., Moreno-Navarro, F., Rubio-Gámez, M.C., 2016. The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review. *J. Clean. Prod.* 113, 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.034>.

Calabi-Floody, A., Thenoux, G., 2012. Controlling asphalt aging by inclusion of byproducts from red wine industry. *Constr. Build. Mater.* 28, 616–623. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.092>.

Fransesqui, M.A., Yepes, J., García-González, C., 2017. Top-down cracking self-healing of asphalt pavements with steel filler from industrial waste applying microwaves. *Constr. Build. Mater.* 149, 612–620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.127>.

- [j.conbuildmat.2017.05.361](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.361).
- Gallego, J., Del Val, M.A., Contreras, V., Páez, A., 2013. Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing. *Constr. Build. Mater.* 42, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.007>.
- García, Á., 2012. Self-healing of open cracks in asphalt mastic. *Fuel* 93, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.009>.
- García, A., Norambuena-Contreras, J., Pacheco-Bueno, M., Partl, M.N., 2015. Single and multiple healing of porous and dense asphalt concrete. *J. Intell. Mat. Syst. Struct.* 26, 425–433. <https://doi.org/10.1177/1045389X14529029>.
- García, A., Schlangen, E., Van De Ven M., 2010. Two Ways of Closing Cracks on Asphalt Concrete Pavements: Microcapsules and Induction Heating, pp. 573–576. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.417-418.573>.
- González, A., Norambuena-Contreras, J., Storey, L., Schlangen, E., 2018. Effect of RAP and fibers addition on asphalt mixtures with self-healing properties gained by microwave radiation heating. *Constr. Build. Mater.* 159, 164–174.
- Liu, Q., García, Á., Schlangen, E., Van De Ven M., 2011. Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete. *Constr. Build. Mater.* 25, 3746–3752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.016>.
- Menozi, A., García, A., Partl, M.N., Tehaldi, G., Schuetz, P., 2015. Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples. *Constr. Build. Mater.* 74, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.034>.
- Norambuena-Contreras, J., García, A., 2016. Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. *Mat. Des.* 106, 404–414. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.095>.
- Norambuena-Contreras, J., Gonzalez-Torre, I., 2017. Influence of the microwave heating time on the self-healing properties of asphalt mixtures. *Appl. Sci.* 7, 1076. <https://doi.org/10.3390/app7101076>.
- Norambuena-Contreras, J., Serpell, R., Valdés, 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. *Constr. Build. Mater.* 127, 369–382. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.005>.
- Papagiannakis, A., Masad, E.A., 2008. *Pavement Design and Materials*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Poulidakos, I.D., Papadaskalopoulou, C., Hofko, B., Gschösser, F., Cannone Falchetto, A., Bueno, M., Arraigada, M., Sousa, J., Ruiz, R., Petit, C., Loizidou, M., Partl, M.N., 2017. Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction. *Resour. Conserv. Recycl.* 116, 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.008>.
- Rapoport, E., Pleshivseva, V., 2007. *Optimal Control of Induction Heating Process*. Taylor & Francis Ltd, Boca Raton, Florida.
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietesch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J.-Y., White, D.J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., Carionna, A., 2012. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat. Meth.* 9, 676–682.
- Sun, D., Sun, G., Du, Y., Zhu, X., Lu, T., Pang, Q., Shi, S., Dai, Z., 2017. Evaluation of optimized bio-asphalt containing high content waste cooking oil residues. *Fuel* 202, 529–540. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.069>.
- Sun, Y., Wu, S., Liu, Q., Hu, J., Yuan, Y., Ye, Q., 2018. Snow and ice melting properties of self-healing asphalt mixtures with induction heating and microwave heating. *Appl. Therm. Eng.* 129, 871–883. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.050>.

ANEXO H

ARTÍCULO: PAVIMENTOS ASFÁLTICOS AUTORREPARABLES CON MATERIALES RECICLADOS
MEDIANTE CALENTAMIENTO POR MICROONDAS

**Título: PAVIMENTOS ASFÁLTICOS AUTORREPARABLES
CON MATERIALES RECICLADOS MEDIANTE
CALENTAMIENTO POR MICROONDAS**

Autores:

Álvaro González, Pontificia Universidad Católica de Chile
Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción
Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile
E-mail: algonzav@ing.puc.cl

Luciano Storey Palma, Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Obras Civiles.
Avenida España 1680, Valparaíso, Chile
E-mail: luciano.storey@alumnos.usm.cl

José Norambuena Contreras, Universidad del Bío-Bío
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Avenida Collao 1202, Concepción, Chile
E-mail: norambuena@ubiobio.cl

Erik Schlangen, Delft University of Technology (TU Delft)
Delft 2628 CN, Netherlands
E-mail: Erik.Schlangen@tudelft.nl

Línea Temática: Innovación Tecnológica en Infraestructura Vial

Categoría: Investigaciones de Pre y/o Posgrado

13° Congreso Internacional PROVIAL

RESUMEN

La autorreparación de mezclas asfálticas mediante calentamiento por microondas, es una tecnología que puede ser utilizada para la rehabilitación de pavimentos. La característica principal de este tipo de mezclas es que poseen pequeñas cantidades de elementos metálicos como fibras de lana de acero (FLA), que hacen que las mezclas tengan la capacidad de reparar sus grietas cuando se aplican microondas. Antes de este estudio, la evaluación de la autorreparación de grietas sólo se había realizado en mezclas con materiales vírgenes. Este artículo presenta los resultados más importantes de un estudio que evaluó el efecto de agregar a las mezclas asfálticas: pavimento asfáltico recuperado (RAP), elementos metálicos convencionales como FLA, y elementos que son residuos de un proceso industrial, virutas metálicas (VM). Para evaluar la reparación se fabricaron probetas semicirculares con distintos contenidos de RAP, FLA, y VM, ensayadas a flexión. Los resultados obtenidos indican que en general la reparación de las mezclas asfálticas fue del orden de un 50% respecto de su resistencia inicial, incluso después de cinco ciclos de agrietamiento/reparación, y que el uso de RAP genera una disminución de los niveles de reparación. Además, se observó que los agregados metálicos aumentan los niveles de reparación de las mezclas, siendo mejores los resultados obtenidos con VM. Si los resultados de laboratorio se extienden a terreno, se puede concluir que la aplicación de esta técnica podría extender la vida útil de los pavimentos asfálticos en varios órdenes de magnitud con una intervención mínima al pavimento.

INTRODUCCIÓN

El asfalto es el material más utilizado para la construcción de pavimentos tanto en Chile como en el mundo [1], [2]. A pesar de las buenas propiedades como material de caminos, el asfalto se deteriora por las solicitaciones de tránsito y clima. Uno de los deterioros más comunes es el agrietamiento, que puede producirse por fatiga [3], envejecimiento del cemento asfáltico [4], y variaciones en la temperatura en el tiempo [5]. Sin embargo, es conocido que las mezclas asfálticas poseen características de autorreparar sus grietas cuando se exponen a altas temperaturas, como por ejemplo, durante la época de verano. Esto implica que las mezclas asfálticas pueden cerrar, sellar, o reparar las grietas por sí solas, debido a la característica termoplástica del asfalto [6]. Cuando la mezcla asfáltica alcanza una temperatura entre 30-70°C, el betún puede fluir por grietas pequeñas, de una manera similar a un flujo capilar. Cuando la mezcla baja de temperatura, el betún que fluyó por la grieta aumenta de viscosidad, sellando y reparando las propiedades mecánicas de la mezcla.

El concepto descrito anteriormente lo han utilizado recientemente varios investigadores en materiales de Ingeniería Civil [7]–[10], para el desarrollo de mezclas asfálticas autorreparables. La reparación se gatilla mediante un estímulo externo, lo cual se logra mediante la aplicación de microondas o inducción magnética que son susceptibles a estímulos eléctricos, se debe añadir pequeñas cantidades de fibras metálicas que entreguen propiedades electromagnéticas y de conducción a las mezclas [12]. Las fibras, ante estos estímulos externos, aumentan su temperatura, y el calor se transfiere al betún el cual fluye, causando la autorreparación descrita anteriormente [13].

Para lograr estas mezclas autorreparables, no es necesario utilizar materiales de alto costo. De hecho, en investigaciones anteriores se ha utilizado fibras que tiene un costo marginal en comparación a la mezcla asfáltica [14]. No obstante, hasta ahora, no se habían estudiado mezclas con propiedades de autorreparación que tuvieran un contenido significativo de pavimento asfáltico reciclado (RAP), ni tampoco se habían utilizado elementos similares a las fibras metálicas, pero que fueran un residuo de algún proceso industrial.

El trabajo presentado en este artículo es una evaluación de las propiedades de autorreparación de mezclas asfálticas fabricadas con hasta un 30% de RAP, con pequeñas cantidades de fibras y un residuo metálico industrial. La evaluación fue realizada en laboratorios de distintas universidades, donde se confeccionaron las mezclas y se realizaron ensayos mecánicos para evaluar la autorreparación. Los resultados, como se muestra en este artículo, sugieren que es posible obtener mezclas asfálticas con materiales reciclados y con propiedades de autorreparación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Para el estudio de autorreparación primero se fabricaron probetas asfálticas tipo Marshall. Para la confección de las mezclas, se utilizaron tres fracciones de agregados vírgenes: bajo malla 3/4", bajo malla 1/2", y polvo de roca; más dos fracciones de RAP: bajo malla 3/4" y bajo malla 3/8"; la Figura 1 y Figura 2 muestran los áridos vírgenes y RAP utilizados, respectivamente. El origen de los áridos vírgenes es el Río Maipo, mientras que el RAP proviene del fresado de pavimentos asfálticos de diversas obras viales. En el estudio se fabricaron mezclas con 0%, 10%, 20%, y 30% de RAP.

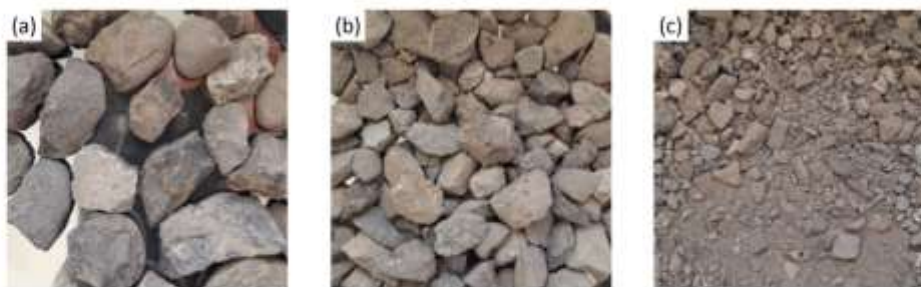


Figura 1 Áridos vírgenes utilizados en las mezclas: (a) grava 3/4", (b) grava 1/2" y (c) polvo roca

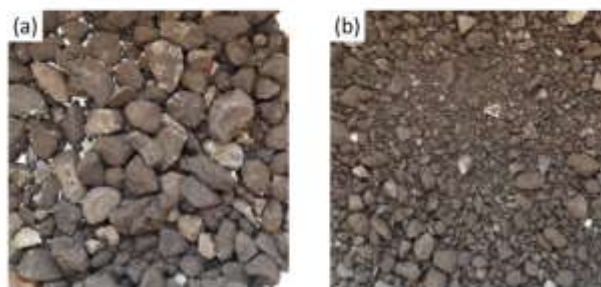


Figura 2 Áridos de RAP: (a) RAP 3/4" y (b) RAP 3/8"

Para la confección de las mezclas asfálticas se utilizó un cemento asfáltico virgen CA24. El contenido de diseño de cemento asfáltico fue de 5.2%. Este valor es la suma del cemento asfáltico virgen CA24, y el cemento asfáltico aportado por el RAP.

Los elementos metálicos añadidos a las mezclas para conseguir las propiedades eléctricas y conductoras fueron fibras de lana de acero (FLA) y virutas metálicas (VM), este último un residuo de la industria metal-mecánica. Se confeccionaron igual cantidad de probetas asfálticas para mezclas con FLA y probetas con VM (Figura 3). Los contenidos de FLA o VM añadidos a las mezclas fueron de 0%, 1%, 2% y 4 %. Estos contenidos se refieren al porcentaje de volumen de metal sobre el volumen de cemento asfáltico contenido en la mezcla. Las FLA están compuestas por acero bajo en carbono de densidad 7.180 [gr/cm³], su diámetro promedio es de 0.133 [mm], y tienen un rango de longitudes entre 2 y 14 [mm]. Las VM están compuestas de acero inoxidable ferrítico de densidad 7.980 [gr/cm³], presentan un ancho medio de 1.310 [mm] y tienen un rango de longitudes entre 3 y 21 [mm]. La Tabla 1 muestra las diferentes cantidades en peso de FLA y VM utilizadas según el porcentaje de elementos metálicos en las mezclas.

Tabla 1 Porcentajes, volúmenes y masas de agregados metálicos utilizados

| Contenido de agregado metálico [%] | Volumen [cm ³] | Masa [gr] | |
|------------------------------------|----------------------------|-----------|------|
| | | FLA | VM |
| 1 | 0.6 | 4.0 | 4.4 |
| 2 | 1.1 | 7.9 | 8.8 |
| 4 | 2.2 | 15.8 | 17.6 |

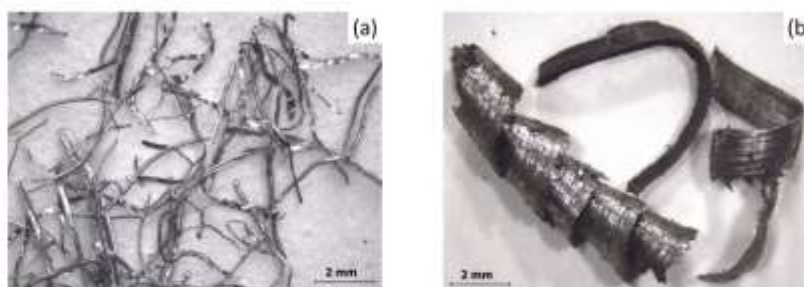


Figura 3 Imágenes ópticas de (a) fibras de lana de acero, FLA y (b) virutas metálicas, VM

Confección de Probetas

Las probetas fueron confeccionadas con las granulometrías contenidas en la banda granulométrica IV-A-12 del Manual de Carreteras correspondiente a mezclas densas (Tabla 2). Los áridos fueron combinados de manera que la granulometría obtenida entre áridos vírgenes y RAP, fueran prácticamente iguales, independiente del contenido de RAP. En total, se confeccionaron 56 probetas Marshall en el estudio.

Tabla 2 Granulometría a utilizar por tipo de mezcla, de acuerdo al porcentaje de RAP considerado

| Tamiz | | Granulometrías por contenido de RAP en mezcla | | | |
|-------|------|---|-----|-----|-----|
| mm | ISTM | 0% | 10% | 20% | 30% |
| 25 | 1" | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 20 | 3/4" | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | 1/2" | 87 | 88 | 89 | 90 |
| 10 | 3/8" | 76 | 77 | 78 | 79 |
| 5 | 4 | 55 | 56 | 57 | 58 |
| 2.5 | 8 | 36 | 37 | 39 | 40 |
| 0.63 | 30 | 18 | 19 | 19 | 20 |
| 0.315 | 50 | 13 | 14 | 14 | 14 |
| 0.16 | 100 | 10 | 10 | 10 | 11 |
| 0.08 | 200 | 6.6 | 7.0 | 7.3 | 7.7 |

El mezclado del betún, los áridos, y los elementos metálicos fue realizado de forma manual, manteniendo la temperatura de la mezcla entre 148 y 158 [°C]; este fue realizado en el siguiente orden: en el caso de las probetas con VM, en un recipiente que contiene la cantidad necesaria de cemento asfáltico virgen se agregan las VM y se revuelve; luego se agregan los áridos, de los más gruesos a los más finos, procurando que estos queden completamente cubiertos de cemento asfáltico antes de agregar más áridos. En el caso de las probetas con FLA, se sigue el mismo procedimiento, pero agregando sólo una porción de las fibras al comienzo (aproximadamente el equivalente a 1%) y el resto entre áridos, en porciones de aproximadamente 1%, debido a la tendencia de las fibras a agruparse.

En los casos de las probetas con material de pavimento reciclado, el RAP fue agregado simultáneamente con los áridos vírgenes, sin alterar el orden de mezclado. Las probetas fueron compactadas a temperaturas entre 135 y 150 [°C] utilizando un martillo Marshall, con 75 golpes por

lado, obteniéndose probetas cilíndricas de dimensiones aproximadas de 60 [mm] de alto y 100 [mm] de diámetro.

Las probetas Marshall fueron cortadas en cuartos, primero un corte a lo largo de un diámetro, para obtener probetas semicilíndricas, y luego un corte a la mitad de la altura, para tener probetas de menor espesor. Este tipo de probetas han sido utilizadas en investigaciones anteriores sobre autorreparación de mezclas asfálticas [2], [11][4]. Las dimensiones de las probetas semicirculares fueron aproximadamente: 50 [mm] de radio, y 30 [mm] de largo (Figura 4). Finalmente, a cada cuarto de probeta se le hizo una hendidura en el centro de la cara plana de aproximadamente 10 [mm] de alto y 3 [mm] de ancho, para inducir la grieta en ese punto, como se explicará más adelante.

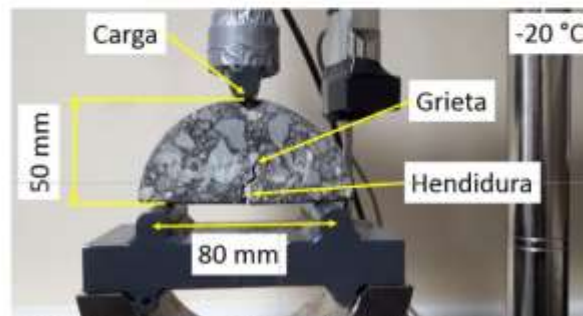


Figura 4 Disposición de probeta semicircular para ensayo a flexión.

Medición de la reparación

El valor del nivel de reparación, $NR_{i,j}$, de un ciclo i de la probeta semicircular j , se define como la razón entre la resistencia a flexión obtenida del ensayo de tres puntos (Figura 5) después del ciclo de reparación i , $R_{i,j}$, y la resistencia inicial de la misma probeta, $R_{0,j}$, como muestra la ecuación (1).

$$NR_{i,j} = \frac{R_{i,j}}{R_{0,j}} \quad (1)$$

En otras palabras, el nivel de reparación es la resistencia relativa entre la resistencia obtenida después de i ciclos de reparación, y la resistencia original que tenía la probeta semicircular. El proceso de reparación de las probetas mediante estímulo externo consiste en la exposición de las probetas a 40 segundos de radiación en un horno microondas con potencia de 700 [W] y frecuencia de trabajo de 2.45 [GHz], que corresponde a una longitud de onda aproximada de 120 [mm]. Para la correcta realización de la reparación, las probetas deben encontrarse a temperatura ambiente y secas, por lo que se dejan descansar en un ambiente ventilado durante aproximadamente 24 horas entre los ensayos.

Los valores de resistencia $R_{i,j}$ y $R_{0,j}$ se determinan mediante ensayo a flexión de tres puntos en las probetas semicirculares con una separación entre apoyos igual a 80 [mm] (Figura 5). Estos ensayos se realizan con las probetas a una temperatura de -20 [°C], enfriadas durante 20 horas. Para el ensayo, se aplica una carga monotónica vertical hasta la falla. El equipo de carga es una máquina de pruebas universal Zwick/Roell con capacidad de 20 [kN]. La velocidad de la carga fue ajustada a 0.5 [mm/min]. La carga aplicada fue medida usando una célula de carga montada en el equipo.

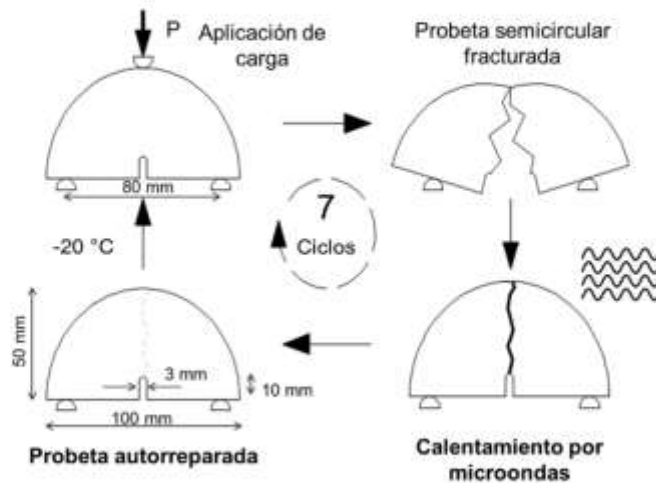


Figura 5 Ciclo de ensayo y reparación por microondas aplicado en la investigación

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Figura 6 muestra el efecto promedio de los distintos factores estudiados sobre el nivel de reparación de las mezclas asfálticas; además, cada barra de error representa ± 1 desviación estándar. Los resultados generales indican que el nivel de autorreparación fue de aproximadamente 0.5, es decir, en promedio las probetas recuperaron un 50% de su resistencia inicial una vez que se realizaron los ciclos de reparación.

El efecto general de la adición de RAP (Figura 6a) es una disminución en la capacidad de reparación de las mezclas, teniéndose un valor medio igual a 0.5716 en mezclas sin RAP, y valores de 0.4909, 0.4812 y 0.4831 en mezclas con 10%, 20% y 30% de RAP, respectivamente. Esta diferencia entre mezclas con y sin RAP, puede deberse a que las mezclas con RAP tienen cemento asfáltico envejecido, y por lo tanto una mayor viscosidad y menor capacidad de fluir y cerrar las grietas. Los valores de desviación estándar obtenidos son 0.1113, 0.1052, 0.1340 y 0.1333 para las mezclas con 0%, 10%, 20%, y 30% de RAP, respectivamente. Se observa un aumento en los valores de desviación estándar a partir de 20% de RAP, que indica una mayor variación en los valores obtenidos de reparación.

El efecto general del tipo de elemento metálico (Figura 6b) es un aumento del nivel de reparación obtenido, teniéndose valores medios iguales a 0.4647, 0.4969 y 0.5304 en mezclas sin agregados metálicos, con FLA y con VM, respectivamente; siendo las mezclas con VM las que tienen mayor nivel de reparación.

Los valores de desviación estándar obtenidos son iguales a 0.1369, 0.1275 y 0.1185 en mezclas sin agregados metálicos, con FLA, y con VM, respectivamente; por lo que las mezclas con VM generan comparativamente una reparación más homogénea que el resto de las mezclas.

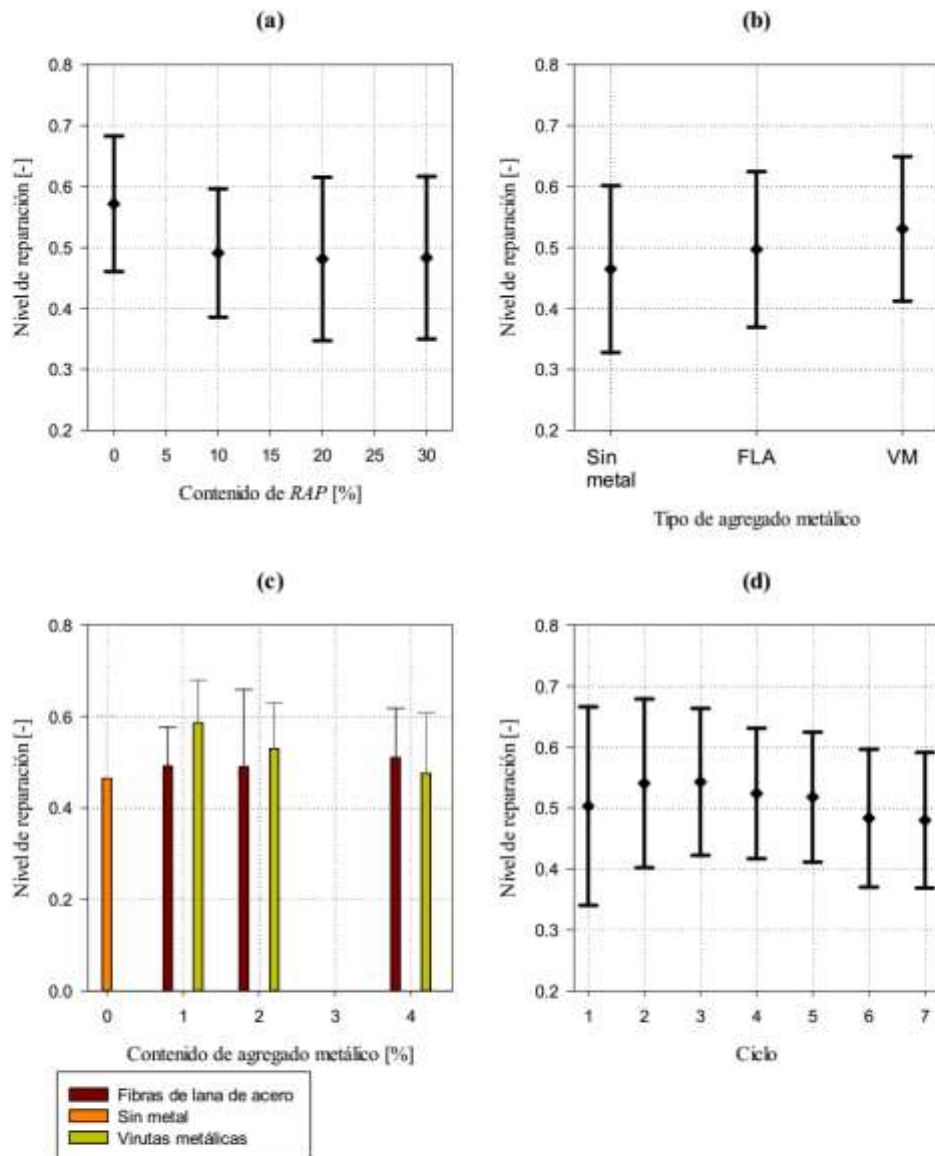


Figura 6 Nivel de reparación en función de: (a) contenido de RAP, (b) tipo de agregado metálico, (c) contenido y tipo de agregado metálico y (d) ciclo.

El efecto general del contenido de elemento metálico (Figura 6c) es un aumento en el nivel de reparación respecto a las mezclas sin metal. Específicamente, las mezclas sin elementos metálicos obtuvieron una reparación media igual a 0.4647, con desviación estándar igual a 0.1369. Las mezclas con FLA tienen valores de reparación iguales a 0.4913, 0.4897 y 0.5097, y valores de desviación estándar iguales a 0.0855, 0.1689 y 0.1087, para mezclas con 1%, 2% y 4%, respectivamente. Las

mezclas con VM tienen valores de reparación iguales a 0.5861, 0.5298 y 0.4762, y valores de desviación estándar iguales a 0.1369, 0.1252 y 0.1186, para mezclas con 1%, 2% y 4%, respectivamente. Respecto a las mezclas con FLA se observa un aumento del nivel de reparación en relación a las mezclas sin agregados metálicos, pero no una variación significativa entre los distintos contenidos de FLA. Finalmente, cabe destacar que los dos mejores niveles de reparación se obtienen con 1% y 2% de VM, lo que concuerda con el efecto promedio por tipo de agregado metálico.

El efecto general de la cantidad de ciclos (Figura 6d) muestra un aumento del nivel de reparación entre el primer y el tercer ciclo, con valores iguales a 0.5031, 0.5405 y 0.5429 para los ciclos 1, 2 y 3, respectivamente, siendo mayor el aumento entre el primer y el segundo ciclo. A partir del tercer ciclo, los valores de reparación disminuyen con cada ciclo. La disminución del nivel de reparación presente entre el tercer y el séptimo ciclo se explica por el envejecimiento del cemento asfáltico generado por el calentamiento de las probetas, que aumenta la viscosidad del cemento asfáltico y disminuye su capacidad de fluir y de cerrar las grietas presentes. Por otro lado, el aumento en el nivel de reparación en los primeros ciclos puede deberse a un excesivo confinamiento entregado con las cintas que aseguraban el contacto de las dos partes de las probetas. Los valores de desviación estándar muestran un descenso entre el primer y el quinto ciclo (con valores igual a 0.1630, 0.1385, 0.1203, 0.1070 y 0.1066, para los ciclos 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente), a partir del cual tiene un leve aumento, pero manteniéndose relativamente constante. Esto indica que se tiene una reparación más homogénea –aunque de menor valor– con el paso de los ciclos.

La Tabla 3 muestra el nivel de reparación promedio de los siete ciclos por tipo de mezcla. En esta se destacan en texto grueso los mayores valores por contenido de RAP, y se muestran con degradación de verde a rojo los valores de reparación desde los más altos hasta los más bajos. En la tabla puede notarse que los mejores niveles de reparación por contenido de RAP se tienen en mezclas con 1% de VM (en mezclas sin RAP, y con 20% y 30% de RAP) y sólo en mezclas con 10% de RAP la mejor reparación se obtiene en mezclas con FLA, seguido por las mezclas con 2% de VM.

Tabla 3 Nivel de reparación medio por tipo de mezcla

| | | Contenido de RAP | | | |
|---------------------------|--------------------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|
| Tipo de agregado metálico | Contenido de agregado metálico | 0 | 10 | 20 | 30 |
| Sin metal | - | 0.6034 | 0.4660 | 0.3669 | 0.4344 |
| Fibra de lana de acero | 1 | 0.5364 | 0.4610 | 0.4659 | 0.5019 |
| | 2 | 0.5889 | 0.5465 | 0.3432 | 0.4745 |
| | 4 | 0.5253 | 0.4491 | 0.5848 | 0.4844 |
| Viruta metálica | 1 | 0.6600 | 0.5823 | 0.4885 | 0.6098 |
| | 2 | 0.5762 | 0.5421 | 0.5753 | 0.4256 |
| | 4 | 0.5095 | 0.3961 | 0.5467 | 0.4603 |

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este artículo analizó la capacidad de autorreparación de mezclas asfálticas con distintos contenidos de RAP, fibras de lana de acero, y virutas metálicas. La reparación se logró mediante la aplicación de microondas que elevan la temperatura de las mezclas asfálticas. De los resultados obtenidos en esta investigación se puede concluir que:

- El promedio general de autorreparación logrado en el proyecto fue del orden de un 50%, es decir, las mezclas agrietadas, al ser autorreparadas mediante calentamiento por microondas, volvieron a tener un 50% de su resistencia inicial.
- La adición de RAP genera una disminución de los niveles de reparación de las mezclas asfálticas, probablemente por la mayor viscosidad del cemento asfáltico contenido en el RAP, en comparación al del cemento asfáltico virgen. Se recomienda por lo tanto agregar un cemento asfáltico virgen de menor viscosidad en este tipo de mezclas.
- De acuerdo a los resultados de autorreparación, el contenido óptimo de fibras de lana de acero es de 2%, mientras que el contenido óptimo de virutas metálicas es de 1%. Se recomienda por lo tanto utilizar estos contenidos para esta técnica de autorreparación.
- Tanto las fibras de lana de acero como las virutas metálicas generan un aumento en la capacidad de reparación de las mezclas asfálticas, siendo levemente mejores los resultados en mezclas con virutas metálicas.
- Las conclusiones presentadas se basan en trabajo experimental de laboratorio. Para que esta tecnología se implemente en la práctica, se recomienda construir secciones de prueba, evaluar su factibilidad constructiva, y analizar si es posible repararlas mediante calentamiento por microondas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a José Concha del LabMat de la Universidad del Bío Bío; y a Elber Gajardo y a Horacio Moya de la Universidad del desarrollo por su colaboración en el periodo experimental. También los autores agradecen a la empresa Asfalcura por facilitar los materiales utilizados en esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Q. Liu, Á. García, E. Schlangen, and M. Van De Ven, "Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 9, pp. 3746–3752, 2011.
- [2] A. García, J. Norambuena-Contreras, and M. N. Partl, "Experimental evaluation of dense asphalt concrete properties for induction heating purposes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 46, pp. 48–54, 2013.
- [3] J. Norambuena-Contreras, R. Serpell, G. Valdés, A. González, and E. Schlangen, "Effect of fibres addition on the physical and mechanical properties of asphalt mixtures with crack-healing purposes by microwave radiation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 127, pp. 369–382, 2016.
- [4] A. González, J. Norambuena-Contreras, L. Storey, and E. Schlangen, "Effect of RAP and fibers addition on asphalt mixtures with self-healing properties gained by microwave radiation heating," *Constr. Build. Mater.*, vol. 159, pp. 164–174, 2018.
- [5] R. Micaelo, T. Al-mansoori, and A. Garcia, "Effect Of Capsules Containing Sunflower Oil On The Mechanical Behaviour Of Aged Asphalt Mixture," no. October, 2016.

- [6] Á. Garcia, "Self-healing of open cracks in asphalt mastic," *Fuel*, vol. 93, pp. 264–272, 2012.
- [7] Y. Sun, S. Wu, Q. Liu, W. Zeng, Z. Chen, Q. Ye, and P. Pan, "Self-healing performance of asphalt mixtures through heating fibers or aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 150, pp. 673–680, 2017.
- [8] A. Menozzi, A. Garcia, M. N. Partl, G. Tebaldi, and P. Schuetz, "Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples," *Constr. Build. Mater.*, vol. 74, pp. 162–168, 2015.
- [9] ??lvaro Garc??a, E. Schlangen, M. Van De Ven, and Q. Liu, "A simple model to define induction heating in asphalt mastic," *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 38–46, 2012.
- [10] M. A. Franesqui, J. Yepes, and C. García-González, "Top-down cracking self-healing of asphalt pavements with steel filler from industrial waste applying microwaves," *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, pp. 612–620, 2017.
- [11] J. Norambuena-Contreras and A. Garcia, "Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating," *Mater. Des.*, vol. 106, pp. 404–414, 2016.

ANEXO I

ARTÍCULO: CRACK-HEALING VARIABILITY OF ASPHALT MIXTURES WITH RAP AND STEEL
WOOL FIBERS BY THE ACTION OF EXTERNAL MICROWAVE HEATING

1 Crack-healing variability of asphalt mixtures with RAP and steel wool 2 fibers by the action of external microwave heating

3 Alvaro González¹, Jose Norambuena-Contreras², Luciano Storey³, Erik Schlangen⁴

4 (¹ Department of Construction Engineering and Management, School of Engineering, Pontificia
5 Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile)

6 (² LabMAT, U. del Bio-Bio, Av. Collao 1202, Concepción, Chile, jnorambuena@ubiobio.cl)

7 (³ U. Santa María, Av. España 1680, Valparaíso, Chile, luciano.storey@alumnos.usm.cl)

8 (⁴ TU Delft, Stevinweg 1 Delft, The Netherlands, erik.schlangen@tudelft.nl)

9 ABSTRACT

10 Microwave heating of asphalt pavement containing steel wool fibers is an auspicious
11 technology for asphalt pavement rehabilitation. These types of mixtures have the ability to self-
12 heal their cracks when external microwave heating is applied. The assessment of crack-healing
13 has mainly been conducted in mixtures prepared with virgin aggregate materials. This paper
14 studies the variability of the crack-healing in asphalt mixtures prepared with reclaimed asphalt
15 pavement (RAP) and steel wool fibers. The healing ratio was calculated using three-point
16 bending strength of semi-circular asphalt specimens. The average of seven healing cycles
17 applied on the asphalt specimens showed that the general effect of RAP content was an increase
18 in the variability of the crack-healing of the mixtures. Low fibers contents of 1% and 2%
19 reduced the variability of the crack-healing capabilities of asphalt mixtures. It was observed
20 that the number of healing cycles reduce the variability of the healing capabilities of asphalt
21 mixtures. Overall, it is concluded that small contents of fibers and RAP do not increase the
22 variability in the crack-healing of this type of mixtures.

23
24 **Keywords:** crack-healing, variability, microwave, steel wool fibers, asphalt mixtures.

25 1. INTRODUCTION

26 Despite their excellent characteristics as a road material, asphalt mixtures deteriorate
27 with traffic and environmental factors. One of the most common and first distress observed in
28 asphalt pavements, during their service life, is cracking. The main causes of asphalt cracking
29 are: i) mechanical fatigue, caused by the cyclic loading applied by traffic [1], ii) bitumen aging,
30 mainly caused by oxidation and high asphalt temperatures [2], and iii) temperature variation,
31 caused by large temperature gradients in short periods of time [3]. To keep a good service level
32 of the road, cracks must be repaired during their initial formation or early stage, i.e., when they
33 are narrow and cover only a small area of the pavement surface. Otherwise, there is a risk of a
34 rapid progression that could lead to more severe cracking, loss of pavement strength, and
35 finally, a reduction of pavement durability, particularly when exposed to water that can
36 penetrate into the asphalt and underlying pavement layers [4]. It is well known, however, that
37 asphalt mixtures have the capability of self-heal their cracks when exposed to high
38 temperatures. If the bitumen is not too aged, i.e., during the early life of the pavement, asphalt
39 mixtures can close, seal, or heal the cracks independently [5] because the thermoplastic
40 characteristic of bitumen. This means that the temperature increase reduces bitumen viscosity;
41 hence, bitumen can flow through the cracks and restore the structural capacity of the pavement
42 material [6].

43 Researchers used the concept of crack-healing asphalt mixtures by increasing bitumen
44 temperature to create an asphalt mixture with self-healing properties by means of external
45 heating, using magnetic induction [7] or microwaves [8]. Small contents of steel wool fibers

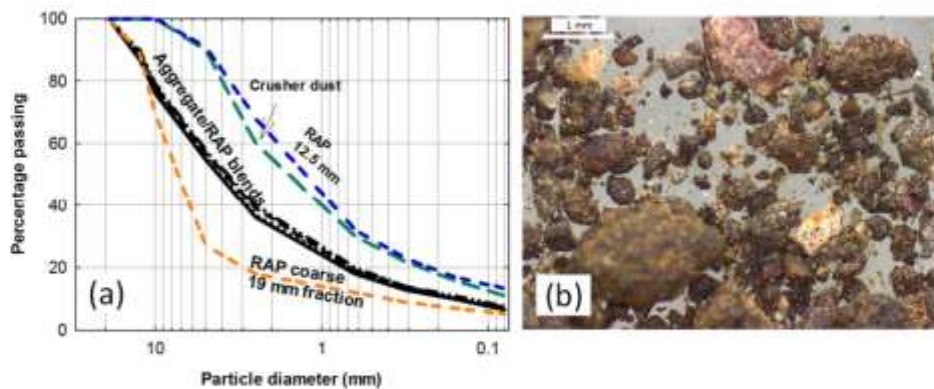
1 (2-6% of the bitumen volume) increase the absorption and conductivity of thermal energy, as
 2 well as the electrical conductivity [9] of this type of mixtures. To heat the asphalt mixtures, an
 3 external electromagnetic field, such as those applied by a microwaves oven, increases the steel
 4 wool fibers temperature. The heat of the fibers transfers to the bitumen and aggregates, which
 5 are not good heat conductors. However, the heat transferred to the bitumen reduces its
 6 viscosity, and the bitumen flows through the open cracks and repairs the asphalt mixture
 7 [6],[10].

8 Previous studies have shown that microwave heating has the potential to crack-heal
 9 asphalt mixtures reinforced with steel wool fibers [11]. However, most of the work conducted
 10 on the healing of asphalt mixtures by microwave heating has only considered the average effect
 11 of using virgin aggregates and bitumen. Only recently has metallic waste been added to asphalt
 12 mixtures to absorb and conduct heating energy in order to achieve asphalt mixtures with healing
 13 purposes using microwave heating [12],[13]. Nevertheless, the addition of fibers and RAP
 14 could increase the variability in the crack-healing of asphalt, which could also increase the
 15 variability in the performance of this type of mixtures in the field. Hence, this article reports
 16 the variability of the crack-healing in asphalt mixtures prepared with RAP and steel wool fibers
 17 using microwave heating.

18 **2. MATERIALS AND METHODS**

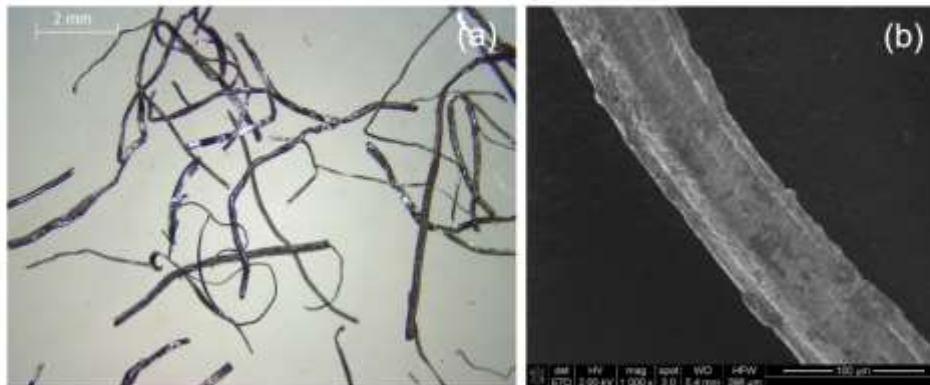
19 **2.1 Materials**

20 This research considered the use of dense asphalt mixtures, a standard pavement
 21 material used in Chilean roads. The aggregates, supplied by a road construction company, were
 22 separated in different size fractions. The RAP, was obtained from the milling of distressed
 23 asphalt roads, was also separated in different fractions by size. Finally, the virgin aggregates
 24 and RAP were blended to achieve the particle size distribution of a dense mixture
 25 recommended by the Chilean Highway Manual [14]. The content of RAP in the mixture was
 26 0%, 10%, 20%, and 30%, by mass. Although different RAP contents were added to the
 27 aggregate/RAP blend, the final particle size distribution of the blend was similar (Figure 1a).
 28 The mixtures were prepared with a CA24, penetration grade 80/100 (25°C) bitumen commonly
 29 used in Chile. A constant total bitumen content of 5.2% by volume, equivalent to a total
 30 bitumen content of 57 g, was targeted for all the asphalt mixtures. This content included the
 31 bitumen of the RAP fraction (Figure 1b) and the new, virgin aggregate added to the mixtures.
 32



33 **FIGURE 1 (a) Particle size distribution of aggregates, RAP, and aggregates/RAP blends**
 34 **(b) optical view of RAP fine fraction**
 35

1 Steel wool fibers (Figure 2a), composed of low-carbon steel with a density of 7.180
 2 g/cm^3 were added in small proportions to the mixtures. The metal fibers had an average
 3 diameter of 0.133 mm (Figure 2b), with an average initial length range of 2-14 mm. The fiber
 4 content by total volume of the bitumen were: 0%, 1%, 2%, and 4%.
 5



6
 7 **FIGURE 2 (a) Optical and (b) SEM image of steel wool fibers used in the study.**
 8

9 2.2 Preparation of asphalt specimens

10 The bitumen, aggregates and fibers were heated for at least two hours before mixing. The
 11 adopted mixing sequence for specimens with fibers has been published somewhere else [13].
 12 Cylindrical Marshall specimens, 100 mm diameter and 60 mm height, contained a total bitumen
 13 content of 5.2%. Once compacted, the specimens were sawed in two planes to produce semi-
 14 circular samples, dimensions 50 mm in radius and approximately 30 mm thick. A 10-mm depth
 15 notch with a thickness of 3 mm was cut at the midpoint of the semi-circular samples (Figure
 16 3a).
 17

18 2.3 Three-point bending tests on semi-circular specimens

19 The microwave healing of asphalt mixtures was measured testing the semi-circular
 20 specimens with three-point bending tests. In these tests, a monotonic load was applied to the
 21 semi-circular samples up to maximum load or failure. Only the peak force applied in the test
 22 was recorded and considered for the analysis of results. The semi-circular samples were placed
 23 on two supporting rollers, separated by 80 mm. A third loading roller was positioned at the
 24 midpoint of the semi-circular arch of the specimen (Figure 3a). The load was applied by a
 25 multispeed testing machine, with a load cell of 50 kN and controlled by a computer. The load
 26 speed was set to 0.5 mm/min, and specimens were preconditioned at -20°C during 24 h before
 27 the test, to achieve a brittle failure. Once the bending test finished, cracked asphalt samples
 28 were carefully taken from the loading machine, and left at room temperature ($20\text{-}25^{\circ}\text{C}$).
 29

30 2.4 Crack-healing of specimens using microwave radiation

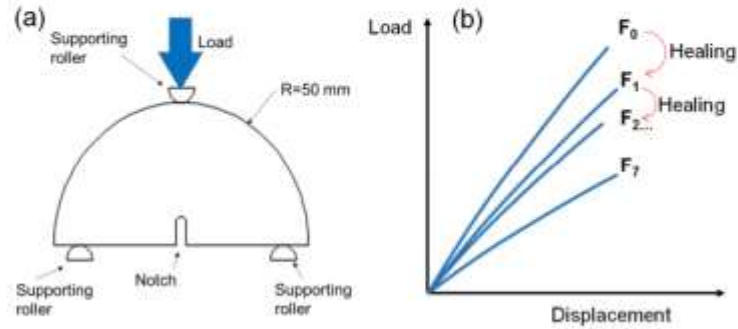
31 Microwave heating was applied to the previously cracked semi-circular samples by using
 32 a 700 W, 2.45 GHz microwave oven. The heating time was set to 40 s for all samples, this time
 33 has been found suitable as reported on previous research results [11].

34 The healing ratio (HR) is the parameter used in this research to assess the healing
 35 capability of asphalt mixtures. HR was defined as the relationship between maximum force
 36 measured in the test sample after the healing (F_i), and the maximum force of the test sample
 37 initially tested (F_0) being "i" the number of times the sample has been healed in the microwave:

1
2
3
4
5
6
7

$$\text{Healing ratio} = \frac{F_L}{F_0} \tag{1}$$

A total of seven damage-healing cycles were carried out on the test samples (Figure 3b). A total of 520 tests were analyzed for this study on the variability of the healing ratio asphalt mixtures.



8
9
10
11

FIGURE 3 (a) Configuration of the semi-circular bending test, and (b) representative load versus displacement curves for different healing cycles on the same specimen.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Effect of RAP on the variability of the healing ratio

Figure 4 presents the histograms of all the healing ratios and healing cycles for the mixtures with different RAP contents. The horizontal axis of each plot is the healing ratio, while the vertical axis is the frequency of the observed healing ratio grouped in 0.025 intervals. Figure 4 shows that an increase in the RAP content increases the healing ratio variability of the mixtures (i.e., standard deviation or SD) from SD≈0.10-0.11 to SD≈0.13. This is explained by the nature of the RAP material that is obtained from the milling of asphalt roads that have been in service for many years, and have been exposed to different loads and environmental factors. It is therefore expected that RAP increases the variability in the performance of the mixtures.

In addition, when the asphalt mixture with different contents of RAP was produced in the laboratory, the aged bitumen is blended with virgin bitumen. It is likely that aged bitumen, with a higher viscosity, is not totally mixed with new bitumen, and therefore this effect increases the variability of the bitumen flow during the microwave heating. Moreover, RAP increases the aggregates heterogeneity of the mixture, since aggregates from different sources are added. Although standard deviations are important, yielding coefficient of variations between 20% and 30%, the large number of tests performed and showed in Figure 4 give strength to the analysis conducted. To verify the significance of the RAP effect, an analysis of variance (ANOVA) was conducted, yielding a p-value lower than 0.001. This result indicates that the RAP content has a significant effect on the healing ratio.

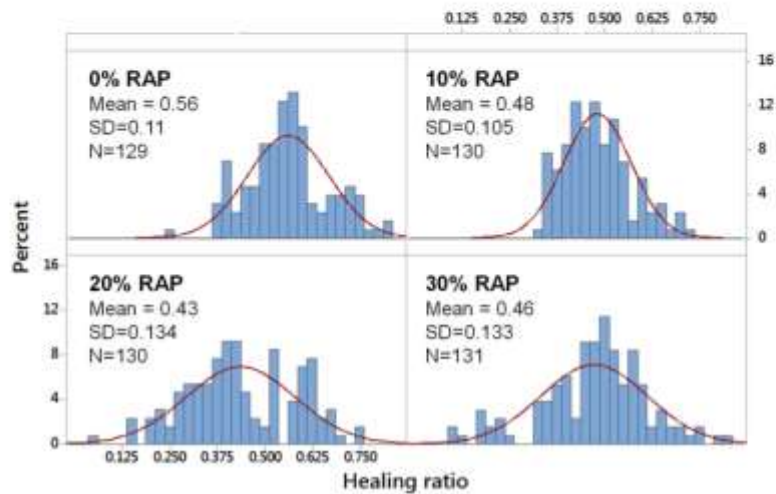
32

3.2 Effect of fibers on the variability of the healing ratio

Figure 5 presents the histograms of all the healing ratios and healing cycles for mixtures with 0%, 1%, 2%, and 4% fiber content. The highest measured means were obtained for 1% and 2% fiber content. The variability for the mixtures without fibers and 4% fibers were the

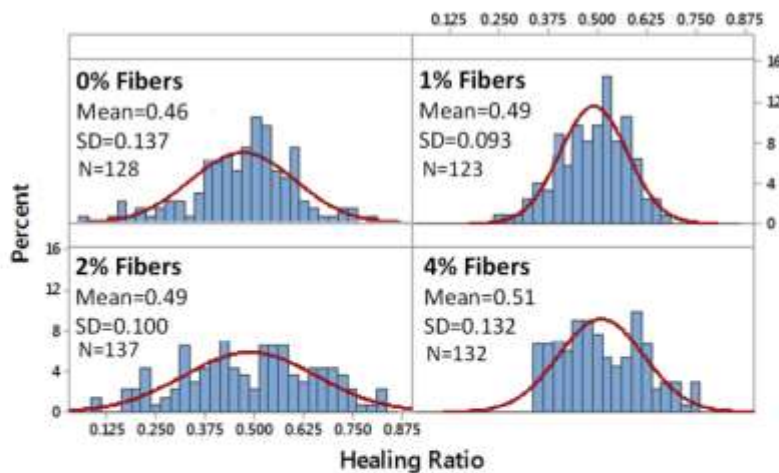
36

1 highest. For 1% and 2% fiber content the variability was lower than the other mixtures, Clusters
 2 of fibers have been observed in mixtures with high contents of fibers by means of computer
 3 tomography [13],[14]. Clusters of fibers therefore, might increase the variability in the crack-
 4 healing ratio of the mixtures. Conversely, the effect of adding fibers to the mixtures is an
 5 increase in the healing ratio. The coefficient of variations calculated is in the range 18-25%.
 6 The number of tests are shown in Figure 5. To verify the significance of the RAP effect, the p-
 7 value obtained from the ANOVA, yielded a p-value of 0.05, showing that the fiber has a clear
 8 effect in the healing ratio, although is less significant than the RAP content.
 9



10
 11
 12

FIGURE 4 Histogram of healing ratios for different RAP contents.



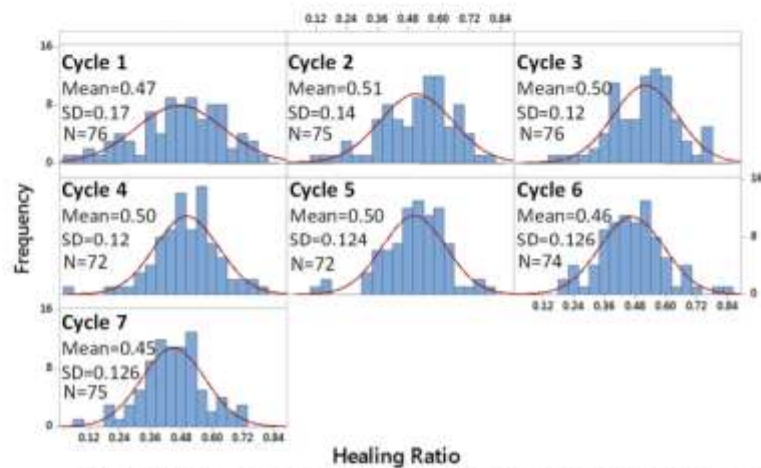
13
 14
 15

FIGURE 5 Histogram of healing ratios for different fiber contents.

16 **3.3 Effect of the number of healing cycles on the variability of the healing ratio**

17 Figure 6 presents the histogram of the healing ratio for all the mixtures, for the seven
 18 healing cycles. The 0.17 standard deviation for the first healing cycle was higher than all the

1 other healing cycles (coefficient of variation = 36%). The second highest variability was
 2 measured in the second healing cycle (coefficient of variation = 27%). Then, the standard
 3 deviation plateaus approximately in $SD \approx 0.12-0.13$ for the rest of the healing cycles. The lower
 4 variability in higher order healing cycles could be explained by the crack propagation during
 5 the bending tests. During the first cycles it was observed fractured aggregates in the free,
 6 cracked surfaces of the bitumen, which have also been detected by means of computer
 7 tomography when specimens are tested at low temperatures [13]. This type of fracture
 8 introduces variability in the breaking results and also reduced the healing ratio during the first
 9 healing cycles. Although it was not demonstrated in this research, it is believed that after
 10 several healing cycles the bitumen flows through the aggregate crack, improving the healing.
 11 The p-value obtained from the ANOVA, yielded a p-value of 0.005, indicating that the number
 12 of healing cycles have an effect in the healing ratio.
 13



14 **FIGURE 6 Histogram of healing ratios for different healing cycles.**
 15
 16

17 4. CONCLUSIONS

18 This paper has explained the effect of adding RAP and metal fibers on the variability
 19 of the crack-healing capabilities of asphalt mixtures, gained by microwave radiation heating.
 20 Based on the analysis of results, the following conclusions can be drawn:
 21

- 22 • Asphalt mixtures without RAP, or low RAP content of 10%, show low variability in
 23 the healing capabilities of asphalt mixtures. When the RAP content is in the order of
 24 20-30% the variability increases.
- 25 • Low fiber contents of 1% and 2% reduce the variability of the healing capabilities of
 26 asphalt mixtures, compared to mixtures without fibers and with 4% fibers.
- 27 • The number of healing cycles reduces the variability of the healing capabilities of
 28 asphalt mixtures.
- 29 • Overall, results suggest that the variability obtained in asphalt mixtures with crack-
 30 healing capabilities remains within an acceptable range.

1 5. ACKNOWLEDGMENTS

2 The authors would like to acknowledge: José Luis Concha from LabMAT at the UBB,
3 Elber Gajardo and Horacio Moya from CIMAT UDD, Rogelio Zúñiga from Asfalcura for
4 donating the materials used in this research, and the Direction of Research from UDD for
5 providing the funding to complete this research at TU Delft.

6 6. REFERENCES

- 7 [1] Kim, Y.R., Little, D.N., and Lytton, R.L. Fatigue and healing characterization
8 of asphalt mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.*, 15(1), pp. 75-83. 2003.
- 9 [2] Airey, G. State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement
10 materials. *Int. J. Pavement Eng.*, 4(3), pp. 165-176. 2003.
- 11 [3] Norambuena-Contreras, J., and Gonzalez-Torre, I. Influence of geosynthetic
12 type on retarding cracking in asphalt pavements. *Constr. Build. Mater.*, 78, pp. 421-429. 2015.
- 13 [4] Airey, G., and Young-Kyu, C. State of the art report on moisture sensitivity test
14 methods for bituminous pavement materials. *Int. J. Pavement Eng.*, 3(4), pp. 355-372. 2002.
- 15 [5] Ayar, P., Moreno-Navarro, F., and Rubio-Gómez, M.C. The healing capability
16 of asphalt pavements: a state of the art review. *J. Clean. Prod.*, 113, pp. 28-40. 2016.
- 17 [6] Gallego, J., Del Val, M.A., Contreras, V., and Páez, A. Heating asphalt mixtures
18 with microwaves to promote self-healing. *Constr. Build. Mater.*, 42, pp. 1-4. 2013.
- 19 [7] Liu, Q., García, A., Schlangen, E., and Van De Ven, M. Induction healing of
20 asphalt mastic and porous asphalt concrete. *Constr. Build. Mater.*, 25(9), pp. 3746-3752. 2011.
- 21 [8] Norambuena-Contreras, J. and Garcia, A. Self-healing of asphalt mixture by
22 microwave and induction heating. *Mater. Des.*, 106, pp. 404-414. 2016.
- 23 [9] Menozzi, A., Garcia, A., Partl, M.N., Tebaldi, G., and Schuetz, P. Induction
24 healing of fatigue damage in asphalt test samples. *Constr. Build. Mater.*, 74, pp. 162-168. 2015.
- 25 [10] García, A., Norambuena-Contreras, J., Pacheco-Bueno, M., Partl, M.N. Single
26 and multiple healing of porous and dense asphalt concrete. *J. Intel. Mat. Syst. Str.* 26, pp. 425-
27 433. 2015.
- 28 [11] Norambuena-Contreras, J., and Gonzalez-Torre, I. Influence of the microwave
29 heating time on the self-healing properties of asphalt mixtures. *Appl. Sci.* 7(1076). 2017.
- 30 [12] Franesqui, M.A., Yepes, J., and Garcia-González, C. Top-down cracking self-
31 healing of asphalt pavements with steel filler from industrial waste applying microwaves.
32 *Constr. Build. Mater.*, 149, pp. 612-620. 2017.
- 33 [13] Gonzalez, A., Norambuena-Contreras, J., Storey, L., and Schlangen E. Effect of
34 RAP and fibers addition on asphalt mixtures with self-healing properties gained by microwave
35 radiation heating. *Constr. Build. Mater.*, 2017.
- 36 [14] M. de O. Públicas, Manual de Carreteras de Chile. Santiago, 2016.
- 37 [15] Norambuena-Contreras, J., Serpell, R., Valdes Vidal, G., Gonzalez, A., and
38 Schlangen, E. Effect of fibres addition on the physical and mechanical properties of asphalt
39 mixtures with crack-healing purposes by microwave radiation. *Constr. Build. Mater.*, 127, pp.
40 369-382. 2016.
- 41