



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DE ESCORIA DE COBRE EN LA VIDA A LA FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ALTOS PORCENTAJES DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO

Tesis para optar al Título de:
Ingeniero Civil en Obras Civiles

Profesor Patrocinante:
Dr. Ing. Aitor Cristiam Raposeiras Ramos

Profesor Co-Patrocinante:
Dra. Ing. Diana Movilla Quesada

RAFAEL ANDRÉS BERTIN DELGADO
GASTÓN PATRICIO WERNER ACUÑA
VALDIVIA – CHILE

2018



Universidad Austral de Chile
Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Trabajo de Titulación - Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

**EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DE ESCORIA DE COBRE EN LA VIDA A LA FATIGA
DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ALTOS PORCENTAJE DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO.**

Autores

Estudiantes: *Rafael Andrés Bertin Delgado.*
Gastón Patricio Werner Acuña.
Profesor Patrocinante: *Aitor Cristiam Raposeiras Ramos*
Profesora Co-Patrocinante: *Diana Movilla Quesada*



Revista Objetivo

MATERIALS & DESIGN, ISSN: 0264-1275, Factor de Impacto: 3.997

RESUMEN

El pavimento asfáltico reciclado (RAP) y la escoria de cobre son desechos que se generan en grandes cantidades diariamente, considerando la actividad minera como la base económica del país y la constante renovación de pavimentos asfálticos. Además, investigaciones previas demostraron el potencial uso de estos materiales en la fabricación de mezclas asfálticas. Por ende, este estudio busca consolidar la incidencia positiva de la inclusión de este residuo minero en las mezclas asfálticas con altos porcentajes de RAP, utilizando 7.5% y 15% de escoria de cobre en probetas prismáticas tipo viga, mediante el ensayo a fatiga en cuatro puntos, bajo la aplicación de cargas sinusoidales de alta deformación a una temperatura de 20°C, de acuerdo con lo descrito en la UNE 12697-24 (Anexo D). Los resultados obtenidos en la presente investigación arrojaron una variada gama de comportamientos para las diversas mezclas, pero en general la adición de escoria de cobre otorga una mayor vida a fatiga frente a altas deformaciones, presentando un incremento de 221 mil ciclos para un agregado de 7.5% de EC y 155 mil ciclos para un 15% de EC con respecto a la muestra compuestas en su totalidad por árido, en tanto para una deformación de 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ las mezclas con un 7.5% de EC alcanzaron el rango máximo establecido en 2 millones.

Palabras clave: *Mezcla asfáltica; Pavimento asfáltico reciclado; Escoria de Cobre; Fatiga.*

ABSTRACT

Reclaimed asphalt pavement (RAP) and Copper Slag are mining wastes generated in large quantities daily, considering that mining is the economic base of the country, besides, to the constant renewal of asphalt pavements. Additionally, previous investigations have showed the importance of the use of these materials in asphalt mixtures. Therefore, this study seeks to consolidate the positive incidence of the inclusion of this mining waste in the asphalt mixtures with high percentages of RAP, using 7.5% and 15% of copper slag in prismatic specimen for beams, by means of the 4-point fatigue test, applying high-deformation sinusoidal loads at a temperature of 20 ° C, according to UNE 12697-24 (Annex D). In this way, it is sought to compare the fatigue life with different dosages with four reference mixtures. The obtained results from the present investigation showed a wide range of behaviors of the different mixtures. But, in general, adding copper scoria gives a longer fatigue life when facing high deformations, presenting an increase of 221 thousand cycles for an aggregate of 7.5% of EC and 155 thousand cycles for a 15% of EC with respect to the sample composed entirely by aggregate, while for a deformation of 300 $\mu\text{m} / \text{m}$ the mixtures with 7.5% of EC reached the maximum range established at 2 million.

Keywords: *Asphalt mixture; Recycled asphalt pavement; Copper slag; Fatigue.*

1. Introducción

La industria minera, encabezada por la extracción del cobre ha sido por muchos años el pilar fundamental de la economía chilena, teniendo un mayor impacto en el aporte promedio al PIB en los últimos 30 años y contribuyendo con un 7.9%. Sin embargo, a pesar de la abundancia de esta materia prima no se ha aprovechado todo su potencial, pudiendo tener una mayor contribución al desarrollo[1].

En la actualidad, se generan grandes volúmenes de residuos provenientes de procesos metalúrgicos, entre los cuales destaca la escoria de cobre. Esta se deposita usualmente en vertederos autorizados, pudiendo permanecer en estos lugares por décadas, implicando la ocupación de enormes áreas de terreno, ya que se considera un pasivo ambiental. Debido a esto en los últimos años ha aumentado el interés en estudiar nuevas aplicaciones para este desecho, por ejemplo, como sustituto parcial

del cemento hidráulico, gravilla para líneas de ferrocarriles y abrasivo para la limpieza por chorro de arena de estructuras metálicas[2].

El interés por la reutilización de residuos industriales o metalúrgicos no solo se ha centrado en la escoria de cobre, si no que a una diversidad de metales entre los cuales se encuentra la escoria de acero, incorporada en investigaciones para mejorar el comportamiento de mezclas asfálticas con agregado de RAP frente a sollicitaciones de tracción indirecta[3].

Con la disminución del suministro de materiales vírgenes, el aumento de los costos en la producción y la escasez de depósitos para eliminar los materiales recuperados, el uso de mezclas asfálticas recicladas se ha vuelto cada vez más frecuente en la industria del pavimento. La aplicación más económica del pavimento asfáltico reciclado (RAP) se encuentra en las capas intermedias y superficiales de los pavimentos flexibles debido a que el ligante del material reciclado es menos costoso y puede suplir una parte de la carpeta virgen más cara[4].

El pavimento asfáltico reciclado (RAP), se encuentra compuesto por betún envejecido y agregados pétreos, el cual se obtiene del fresado de pavimentos fatigados o envejecidos, desechos de plantas y laboratorios, así como de materiales rechazados en obra[9].

Entre las conveniencias de utilizar este material se encuentran la disminución de costos económicos, energéticos y técnicos, debido al bajo precio comercial que posee y a la reutilización del ligante envejecido. Por otro lado, los beneficios energéticos están relacionados con la extracción de agregados pétreos[9].

El envejecimiento en pavimentos asfálticos tiene como consecuencia un incremento en la rigidez del betún, lo que puede ser provocado por condiciones ambientales a las que se encuentran expuestas las capas de rodadura. Debido a lo anterior es de vital importancia conocer la fuente del material y determinar sus propiedades, para saber incluir el RAP en mezclas asfálticas[9].

Por lo regular la escoria de cobre se enfría de forma natural en vertederos, siendo sus principales componentes el óxido de hierro (FeO), silicio (Si) y aluminio (Al), además posee una composición mineralógica con presencia de fayalita (Fe²⁺)₂SiO₄ y magnetita Fe²⁺(Fe³⁺)₂O₄ entre otros[2].

Las propiedades mecánicas de la escoria de cobre evidenciadas hasta el momento en investigaciones previas han concluido que este carece de una buena adherencia con el ligante, reduciendo el porcentaje de vacíos y aumentando la deformación plástica de la mezcla, además debido a su elevada densidad compactada se produce un incremento de densidad compactada de la mezcla [14].

La escoria de cobre no puede ser utilizada como único agregado en una mezcla asfáltica, debido a la baja adherencia que presenta con el ligante. Por otro lado, al verse combinado con árido se obtienen mejoras sustanciales, ya que este posee una mejor adherencia [15].

Otra propiedad mecánica mejorada por este material es el aumento de la estabilidad para porcentajes de adición menores a un 30% de los agregados, debido a su angulosidad [14].

Según las primeras investigaciones, la escoria de cobre aporta cualidades favorables a la mezcla asfáltica con alto contenido de RAP, siendo una de sus principales virtudes mejorar las propiedades de la mezcla sin la necesidad de agregar aditivos ni rejuvenecedores [4].

Los pavimentos asfálticos son afectados principalmente por el constante tráfico de vehículos de alto tonelaje como lo son camiones y buses. La fatiga en los pavimentos flexibles es el tipo de daño más común, causado por el reiterado tránsito de vehículos, lo que conduce al desarrollo de grietas que pueden llegar a generar la fractura completa del pavimento vial. Así se ha transformado en el factor primordial de interés e investigación a la hora del diseño de una carretera[6].

La caracterización del rendimiento de una mezcla bituminosa es fundamental para el diseño de los pavimentos flexibles, ya que, a temperaturas medias de funcionamiento, la verificación del comportamiento a la fatiga del material es importante, debido a que está expuesto a la aplicación de cargas repetitivas[7].

Existen diversos enfoques para los ensayos a fatiga, como los detallados en la UNE EN 12697-24, la cual consta de cinco anexos separados, donde en cada uno se describe un protocolo de ensayo diferente: ensayo de flexión de dos puntos con muestras trapezoidales y prismáticas (Anexo A y B); de tres y cuatro puntos sobre muestras de viga prismática (C y D) de flexión; ensayos de resistencia a la tracción indirecta sobre muestras cilíndricas (E). de estos anexos el B y E prescriben el control de tensiones, mientras que los anexos A y C el control de deformaciones, siendo el anexo D el que permite modos de carga que pueden ser a deflexión constante o fuerza constante[7],[10].

Los resultados en otras investigaciones con contenido de RAP han arrojado que la vida a la fatiga de las muestras se ve aumentada respecto a la patrón, esto puede ser debido a la buena afinidad entre el betún añadido a las mezclas y el RAP. En base a esto, el betún envejecido del RAP permite reducir la concentración de tensiones dentro del asfalto de mezcla en caliente, lo que reduce los daños debido a la fatiga en la muestra. En estudios realizados con anterioridad a muestras con adición de RAP hasta en un 40%, bajo parámetros de ensayo de 20°C y 10Hz sujeto al modo de control de deformaciones establecido en un rango entre 200 y 600 µm/m, obteniendo resultados favorables, donde la mezcla con un 40% de RAP (máximo estudiado) presentó una mayor vida a fatiga alcanzando los 500 mil ciclos superando por más de 400 mil ciclos a su muestra de comparación compuesta solo por árido. En general, el aumento de la deformación trae consigo una disminución en la vida a fatiga, por ende, un menor tiempo de ensayo[8].

A partir de lo evidenciado anteriormente, las mezclas compuestas por RAP carecerán de rejuvenecedores sobre las propiedades de envejecimiento del betún, puesto que se busca analizar principalmente la contribución de la escoria de cobre a este tipo de mezclas.

Es por ello, que en el presente estudio se abordará un potencial uso para la combinación de estos residuos como componente pétreo de mezclas asfálticas, enfocándose principalmente en las propiedades que aporta la escoria de cobre como agregado en porcentajes de 7,5% y 15% con respecto al peso de los agregados. Mientras que los puntos de comparación estarán dados a partir de los resultados obtenidos de mezclas patrón compuestas por árido y RAP, ya que el comportamiento de estos materiales se ha demostrado por diversas investigaciones previas.

2. Metodología

2.1 Plan de ensayos

Se definieron 12 dosificaciones, de las cuales 4 se consideran como puntos de comparación, ya que contienen materiales cuyos comportamientos son conocidos,

debido a su habitual uso en carreteras. Se confeccionaron probetas tipo Marshall para cada dosificación, es decir 12 probetas, con el propósito de obtener una razón entre la altura y el peso de las mezclas compactadas, para determinar la cantidad de material necesario en la elaboración de 12 probetas prismáticas de 500x400x60 mm. Además, se fabricaron un total de 12 probetas tipo Marshall, las que tenían por objetivo entregar el porcentaje óptimo de betún, para las mezclas que contenían 7,5% de escoria de cobre. Las 12 dosificaciones difieren en los porcentajes de agregado de cada material que forman parte del volumen de la probeta, cuyo volumen también considera la adición del cemento asfáltico (CA-24) que se incorpora como porcentaje en función del peso de los agregados, según el betún óptimo. Los agregados pétreos que componen cada una de las probetas corresponden a árido (AR), pavimento asfáltico reciclado (RAP) y escoria de cobre (EC). A continuación, en la Tabla 1 se detallan los porcentajes de cada material que componen las 12 dosificaciones.

Tabla 1. Dosificación en Volumen de los Agregados

MEZCLA	RAP (%)	Escoria de Cobre (%)	Árido (%)
M1	-	-	100,0
M2	70,0	7,5	22,5
M3	60,0	7,5	32,5
M4	50,0	7,5	42,5
M5	-	7,5	92,5
M6	70,0	15,0	15,0
M7	60,0	15,0	25,0
M8	50,0	15,0	35,0
M9	-	15,0	85,0
M10	70,0	-	30,0
M11	60,0	-	40,0
M12	50,0	-	50,0

La granulometría utilizada corresponde a una mezcla semidensa tipo IV-A-12, como se detalla en la Tabla 2, pudiendo ser empleada tanto en capa de rodadura como capa intermedia [12].

Para dosificar las mezclas, es necesario obtener la densidad compactada de los 3 materiales que se utilizarán en la fabricación de probetas, según el apartado 8.302.38 del Manual de Carreteras de Chile Vol. 8, que se emplea para calcular la cantidad en gramos de árido, RAP y escoria de cobre que se debe adicionar a cada mezcla. Es importante señalar la modificación de la granulometría de escoria de cobre y RAP, de acuerdo con los tamaños disponibles para cada material, ajustándose al centro del huso de la banda granulométrica complementando los porcentajes restantes con árido [13].

Los materiales pétreos recolectados fueron tamizados tanto de forma manual como mecánica, seguido de un lavado en todos sus tamaños con excepción del filler, para quitar el sedimento superficial y otro tipo de residuos, con el fin de evitar la segregación de los materiales con el betún.

Para la fabricación de probetas de fatiga previamente es necesario conocer los porcentajes óptimos de betún para cada mezcla. Por esto se fabricaron probetas tipo Marshall basándose en el procedimiento descrito en la AASHTO T-245[11]. Las pruebas de fatiga de flexión en cuatro puntos se realizan bajo lo descrito en el anexo D de la UNE EN 12697-24, tanto para el modo de tensión y control de deformaciones,

con un movimiento de carga sinusoidal sin periodos de descanso. Todos los ensayos se realizaron a una temperatura de 20°C, frecuencia de 30 Hz y bajo tres niveles de deformación (300, 400 y 500 $\mu\text{m}/\text{m}$). Las muestras para la realización de los ensayos de fatiga tienen dimensiones de 380 mm x 50 mm x 50 mm, las que se obtuvieron mediante el serrado de losas 500 mm x 400 mm x 60 mm producidas mediante compactación de rodillo, de acuerdo con la norma UNE EN 12697-24[10]. Las densidades compactadas de cada material se detallan en la Tabla 3 [14].

Tabla 2. Granulometría Semidensa tipo IV-A-12

TAMICES		Porcentaje que pasa
mm	ASTM	
20	3/4"	100
12,5	1/2"	80 – 95
10	3/8"	70 – 85
5	N° 4	43 – 58
2,5	N° 8	28 – 42
0,63	N° 30	13 – 24
0,315	N° 50	8 – 17
0,16	N° 100	6 – 12
0,08	N° 200	4 – 8

Tabla 3. Densidad Compactada de Materiales

MATERIAL	DENSIDAD COMPACTADA (Kg/m ³)
Árido	2348,56
Escoria de cobre	2802,93
RAP	2442,67

2.2 Escoria de cobre

En el presente estudio los porcentajes de adición de escoria de cobre en sus diversos tamaños de acuerdo con la banda granulométrica, se vio limitada debido a las dimensiones disponibles de este material, lo que se encuentra detallado en la Tabla 4.

Tabla 4. Bandas Granulométricas

TAMIZ	EC	
	% Retenido	% Pasa
3/4"		100%
1/2"		100%
3/8"		100%
N°4		100%
N°8	45%	55%
N°30	43%	12%
N°50	12%	0%
N°100	0%	0%
N°200	0%	0%
< N°200	0%	0%

2.3 Pavimento asfáltico reciclado

Se considera que el RAP aporta un porcentaje de betún a la mezcla, el cual debe ser considerado a la hora de calcular la cantidad de ligante virgen que se añade,

este porcentaje depende de los tamaños del agregado, considerando un mayor aporte para las pequeñas dimensiones, ya que se tiene en cuenta que estos tamaños están compuestos principalmente por betún envejecido. Lo que se evidencia en la Tabla 5.

Tabla 5. Betún Envejecido RAP.

TAMIZ	% betún envejecido
3/4"	-
1/2"	3,8%
3/8"	
N°4	5,2%
N°8	
N°30	
N°50	
N°100	9,1%
N°200	
< N°200	

En el presente estudio, los porcentajes de adición de pavimento asfáltico reciclado en sus diversos tamaños de acuerdo con la banda granulométrica, se vio limitada debido a las dimensiones disponibles de este material, lo que se encuentra detallado en la Tabla 6.

Tabla 6. Bandas Granulométricas

TAMIZ	EC	
	% Retenido	% Pasa
3/4"	-	100%
1/2"	17%	83%
3/8"	12%	71%
N°4	36%	35%
N°8	11%	24%
N°30	13%	11%
N°50	5%	6%
N°100	4%	2%
N°200	1%	1%
< N°200	1%	-

2.4 Confección de probetas

Previo a la fabricación de probetas Marshall, se acondicionaron los agregados pétreos en hornos a una cierta temperatura y tiempo, para la escoria de cobre y los áridos a una temperatura de 180°C durante un periodo de 4 horas y el RAP a una temperatura de 100°C durante un periodo de 2 horas, buscando que el betún envejecido del RAP se reblandezca para que se pueda considerar un aporte de ligante a la mezcla, pero evitando un sobre-envejecimiento de este betún. Además, el betún en este caso CA-24 se colocó en un horno a una temperatura de 158°C de acuerdo con el certificado de análisis de propiedades provisto por el fabricante.

Una vez acondicionados los distintos materiales de acuerdo con la composición de la mezcla, se depositaron en una olla sobre un quemador, donde se

mezclaron de forma manual tanto los agregados pétreos como el ligante, este procedimiento se llevó a cabo hasta envolver todo el material pétreo con ligante obteniendo una mezcla homogénea. Tras el procedimiento anterior, se vertió la mezcla en un molde cilíndrico para su posterior compactación mecánica mediante 75 golpes por cada cara efectuados por un martillo Marshall.

Primeramente, para las probetas prismáticas, se debe emular el procedimiento de acondicionamiento de los materiales pétreos y del ligante detallado anteriormente, para posteriormente depositar los materiales dentro de una mezcladora automatizada a una temperatura de 158°C, en la cual se mezcló hasta obtener una mezcla homogénea durante un periodo de tiempo entre 10-20 minutos, asegurando una total envuelta de los materiales pétreos.

Luego de obtener la mezcla homogénea se deposita en un molde de dimensiones 500x400 mm que se encuentra a igual temperatura y se somete a una compactación de placa hasta alcanzar una altura de 60 mm. Tras el proceso de curado de las probetas, se procedió a su serrado dividiéndola en probetas tipo viga prismática, según lo descrito por la UNE EN 12697-24, consiguiendo vigas de dimensiones 380x50x50mm, de acuerdo con los parámetros de volumen permisibles por la máquina de ensayo.

2.5 Óptimo de betún

Basándose en lo descrito por la AASHTO T-245, se fabricaron 4 probetas para cada una de las mezclas que posee 7,5% de escoria de cobre, ya que el óptimo de betún de las mezclas restantes fue obtenido en investigaciones previas, expresados en la Tabla 7 [16]. Cada una de las 4 probetas contienen porcentajes de betún que fluctúan entre un rango de 4,5% a 6% con intervalos de 0,5%. En las mezclas con agregado de RAP es importante considerar el porcentaje de ligante que posee dicho material, el cual fue restado al total de betún virgen añadido a la mezcla.

Tras la fabricación de probetas se otorgó un tiempo de curado de 24 horas, para su posterior ensayo en el equipo Marshall, donde se determinaron las propiedades de fluencia y estabilidad. Así mismo se obtuvieron las densidades y porcentajes de vacío de las probetas.

Finalmente, el óptimo de betún se determinó de un análisis de gráficos de estabilidad v/s porcentajes de asfalto, densidad v/s porcentaje de asfalto y porcentaje de huecos en la mezcla v/s porcentaje de asfalto.

Tabla 7. Porcentaje Óptimo de Betún por Muestra.

MEZCLA	BETÚN (%)
M1	5,25
M6	5,22
M7	5,16
M8	5,18
M9	5,82
M10	5,24
M11	5,51
M12	5,28



Figura 1. Probetas Tipo Marshall/Viga Prismática

2.6 Ensayo de flexión en cuatro sobre probetas prismáticas

Este ensayo consiste en aplicar cargas de fatiga que varían sinusoidalmente en un equipo de ensayo sobre una probeta prismática, la cual se sometió a flexión sobre 4 puntos con rotación y traslación libre en los puntos de carga.

Según lo descrito en la UNE EN 12697-24 en su anexo D correspondiente al ensayo de flexión en cuatro puntos, los parámetros de ensayo se encuentran dentro de rangos establecidos ofreciendo diversas combinaciones a elección. Basado en lo anterior, este estudio se enfocó en una frecuencia de 30 Hz, lo que busca simular un pavimento con un tráfico de alta velocidad, a su vez se estableció una temperatura de ensayo de 20°C, con lo cual la normativa establece acondicionar durante una hora a dicha temperatura en una maquina termostática para evitar el envejecimiento de la probeta. En cuanto al modo de aplicación de carga elegido, corresponde a una deflexión constante utilizando tres valores diferentes de deformación, ya que como mínimo se requieren tres niveles en el modo de aplicación de carga. Los niveles de deformación corresponden a 300 $\mu\epsilon$, 400 $\mu\epsilon$ y 500 $\mu\epsilon$, lo que conlleva a un total de 36 probetas tipo viga prismática a causa de las 12 mezclas de la investigación.

La vida a fatiga de la probeta se determinó a partir del cálculo de la rigidez inicial, la cual es definida por el equipo de ensayo tras los primeros 100 ciclos registrados, considerando como criterio de falla la disminución hasta la mitad de su rigidez o la rotura de la probeta.

Para una temperatura y frecuencia dada, se deben seleccionar los niveles para el modo de aplicación de carga de forma que los ciclos de ensayo se encuentren dentro de un rango de 10^4 a 2×10^6 ciclos.

Debido a la característica experimental de esta investigación y al desconocimiento del comportamiento bajo cargas de fatiga de la escoria de cobre, se analizarán la totalidad de los resultados a pesar de que no se alcance el modo de falla dentro del rango de ciclos previamente establecido, ya que se busca determinar la contribución de la escoria de cobre dentro de una mezcla asfáltica.



Figura 2. Máquina de Ensayo a Fatiga

3. Resultados y discusión

3.1 Óptimo de Betún

El óptimo de betún para cada mezcla, fue determinado tras el análisis de las curvas de Densidad Compactada vs Porcentaje de Betún, Estabilidad vs Porcentaje de Betún y Porcentaje de vacíos vs Porcentaje de Betún. Según el apartado 8.302.47 en el Manual de Carreteras Volumen 8, señala que el óptimo de betún se calcula como la media aritmética entre el porcentaje de asfalto con el que se obtiene la máxima densidad compactada, la máxima estabilidad y el contenido de asfalto para un 5% de huecos.

En la Figura 3, se puede apreciar que al sustituir el árido de la mezcla por RAP y escoria de cobre se produce un aumento en la densidad compactada, ya que estos materiales poseen una mayor densidad compactada de acuerdo con la Tabla 3. Igualmente, se observa que la adición de RAP es la principal causa del aumento de la densidad compactada, debido a los altos porcentajes de adición a la mezcla. Finalmente, la mezcla que posee mayor densidad compactada corresponde a la que posee 7,5% de escoria de cobre y 50% de RAP.

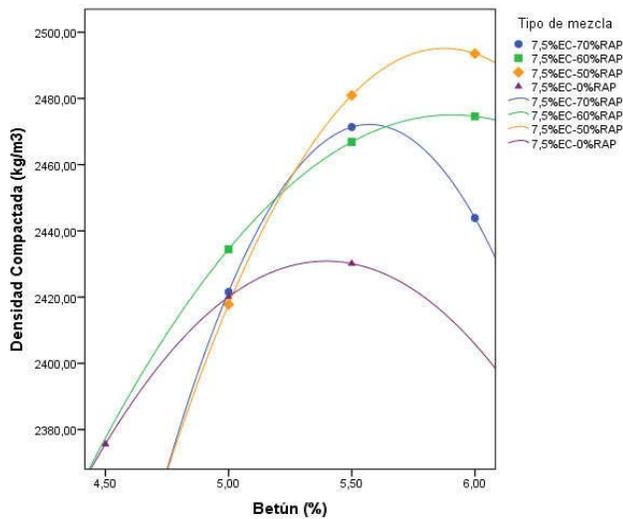


Figura 3. Densidad Compactada v/s Porcentaje de Betún

La Figura 4, evidencia un aumento directamente proporcional entre la cantidad de RAP añadida a la mezcla y la estabilidad de la misma, siendo la mezcla con 70% de RAP la que presenta mayor estabilidad, dado que este material posee una alta densidad compactada favoreciendo la fricción interna de la probeta.

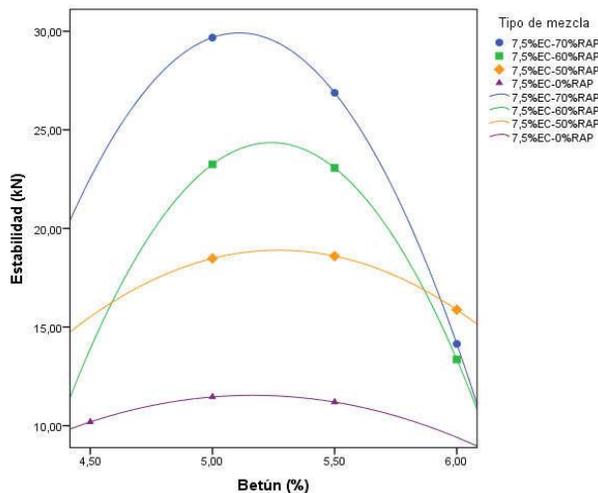


Figura 4. Estabilidad Marshall v/s Porcentaje de Betún

Finalmente se observa en la Figura 5, que aquellas probetas que se les adiciona una mayor cantidad de betún virgen tienden a disminuir su porcentaje de vacíos, debido a que el ligante satura en gran medida los intersticios y los poros de los agregados. Por consecuencia, al aumentar la cantidad de RAP en las mezclas se ve incrementado el porcentaje de vacíos, ya que al poseer betún envejecido este no es capaz de licuarse en su totalidad, otorgando una menor participación a la hora de llenar poros e intersticios. Así la probeta que presenta mayor porcentaje de vacíos es aquella que contiene 70% de RAP.

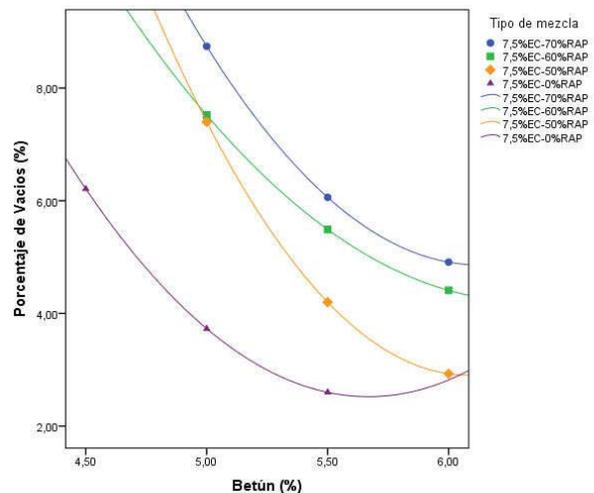


Figura 5. Porcentaje de Vacíos v/s Porcentaje de Betún

En la Tabla 8, se presentan los resultados obtenidos del porcentaje óptimo de betún para las mezclas analizadas que poseen un 7,5% de escoria de cobre. De acuerdo con las afirmaciones anteriores, se ratifica que aquellas mezclas con menor contenido de RAP implican un menor porcentaje de ligante. Sin embargo, esto no quiere decir que aquellas mezclas con alto contenido de RAP necesiten una mayor adición de betún virgen, debido a que se debe considerar el betún envejecido contenido en este como una contribución al total requerido.

Tabla 8. Porcentaje Óptimo de Betún por Muestra.

MEZCLA	BETÚN (%)
M2	5,60
M3	5,61
M4	5,49
M5	5,09

3.2 Ensayo de flexión en cuatro puntos

Los ensayos a fatiga arrojaron como resultado diversas conductas para los distintos niveles de deformación a los que fueron sometidos. La Figura 6 detalla el comportamiento de las muestras patrón frente a la mayor deformación, donde se obtuvo que aquella mezcla sin presencia de RAP alcanzó la mayor vida a fatiga, mientras que, al menor nivel de deformación, es decir, 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ presentó menor vida a la fatiga. Por otro lado, para 400 $\mu\text{m}/\text{m}$ la mezcla que contiene un 60% de RAP es la que entregó mejores resultados, y a su vez la que posee un 70% de RAP exhibió el rendimiento más deficiente bajo cargas de fatiga. En cuanto a la conducta general de las mezclas patrón, las que presentaron una mayor linealidad en sus resultados fueron aquellas que poseen 0% y 50% de RAP, a diferencia de la que contienen un 60% de RAP. Con relación a la mezcla que incluye 70% de RAP, exhibió resultados dispares para los distintos niveles de deformación, ofreciendo la mayor vida a fatiga de las muestras patrón bajo 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ y el comportamiento más deficiente tanto a 400 como a 500 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Para un nivel de deformación de 300 $\mu\text{m/m}$, las mezclas más rígidas presentaron un mejor comportamiento a fatiga, estando directamente relacionado con la cantidad de RAP adicionado, debido a que este material está compuesto por ligante envejecido y endurecido promoviendo la formación de vacíos, ya que se incorpora una menor cantidad de ligante virgen aumentando la rigidez. Por otro lado, para un nivel de deformación de 500 $\mu\text{m/m}$ ocurre lo contrario, siendo la rigidez un factor perjudicial para altas deformaciones por la falta de elasticidad en su comportamiento.

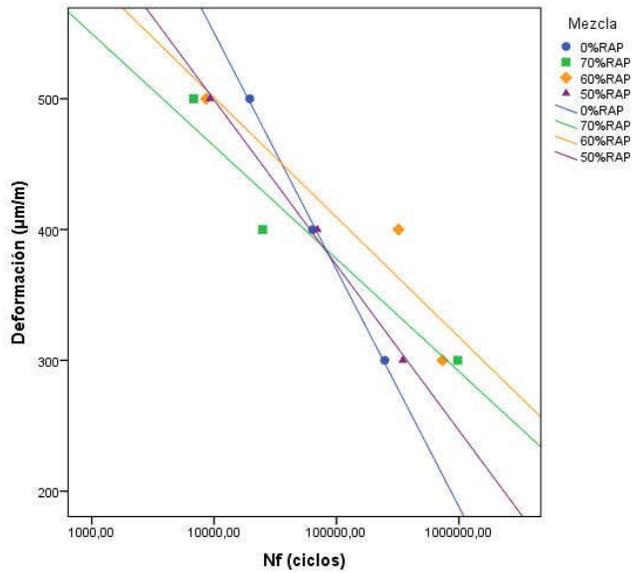


Figura 6. Vida a la Fatiga vs Deformación (0% Escoria de Cobre).

La Figura 7 presenta la vida a la fatiga para las mezclas con un contenido de 7,5% de escoria de cobre y altos contenidos de RAP, donde las expuestas a 300 $\mu\text{m/m}$ alcanzaron resultados superiores frente a aquellas desprovistas de RAP, consiguiendo el límite superior del rango de ciclos establecidos por la normativa. En cuanto a deformación máxima, la totalidad de las mezclas superaron los resultados de la probeta patrón a excepción de la muestra con 70% de RAP, siendo aquella que posee un 60% de RAP la que entrego el mejor rendimiento. Mientras que para niveles de 400 $\mu\text{m/m}$ todas las mezclas con un 7,5% de escoria de cobre obtuvieron buenos resultados, exceptuando la que contiene 50% de RAP que fue incapaz de superar a la mezcla patrón. Respecto a la linealidad del comportamiento exhibido por las muestras se extrae que las probetas carentes de RAP presentan los mejores resultados, a pesar de esto, las mezclas restantes con altos contenidos de RAP ofrecen buenos rendimientos con respecto a este parámetro, siendo la peor la que contiene 50% de RAP.

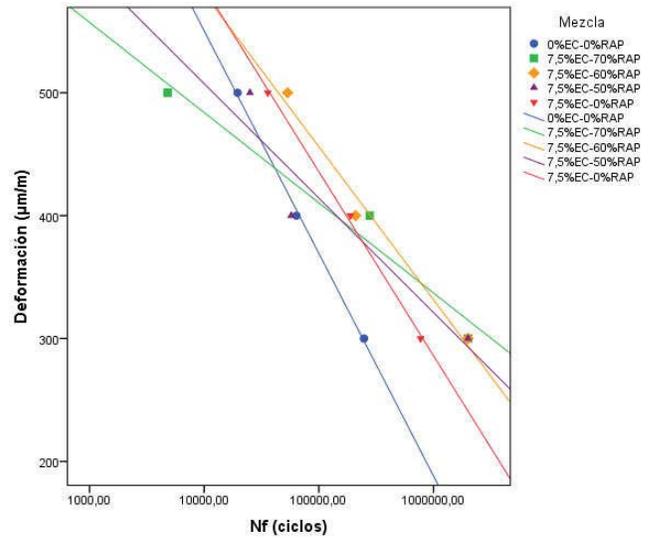


Figura 7. Vida a la Fatiga vs Deformación (7,5% Escoria de Cobre).

En la Figura 8 se observa el comportamiento frente a cargas de fatiga de las muestras que contienen 15% de escoria de cobre, de la cual se extrae que a la deformación mínima impuesta todas las probetas entregaron resultados superiores a la patrón, en especial aquellas con 50 y 60% de RAP, igualmente para 400 $\mu\text{m/m}$ la totalidad de las muestras superaron a la patrón, siendo la más sobresaliente aquella que no posee RAP, a su vez las que contienen RAP presentaron resultados similares. Por otra parte, frente a la máxima deformación, las muestras que están compuestas por un 60 y 70% de RAP, presentaron un comportamiento inferior a la mezcla patrón, a diferencia de la muestra que no contiene RAP que exhibió el mejor resultado. En cuanto a la linealidad del comportamiento frente a los distintos niveles de deformación, todas las mezclas obtuvieron buenos resultados, en tanto la más deficiente corresponde a la compuesta por un 70% de RAP.

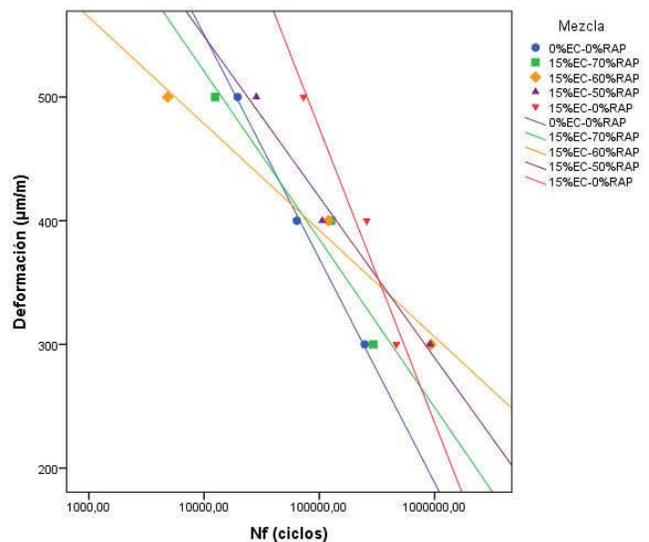


Figura 8. Vida a la Fatiga vs Deformación (15% Escoria de Cobre).

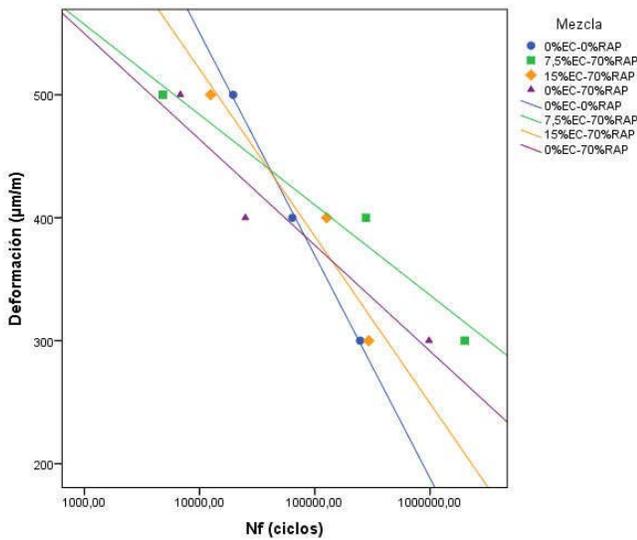


Figura 9. Vida a la Fatiga vs Deformación (70% RAP).

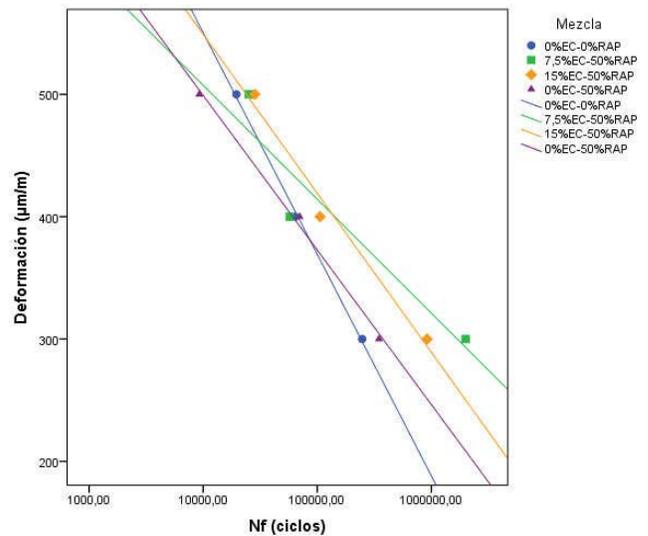


Figura 11. Vida a la Fatiga vs Deformación (50% RAP).

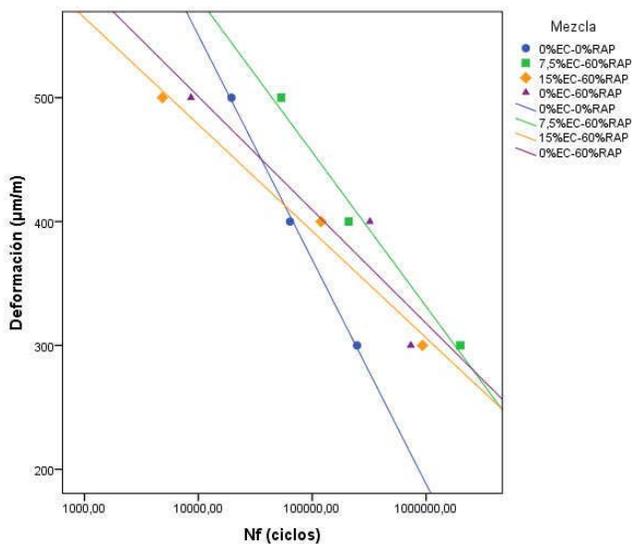


Figura 10. Vida a la Fatiga vs Deformación (60% RAP).

Por consiguiente, en la figura 9, 10 y 11 se observa que la inclusión de la escoria de cobre implica una disminución en la cantidad de ligante adicionado a la mezcla, debido a la nula porosidad de este material, lo que reduce la necesidad de añadir betún para llenar estos poros, disminuyendo su vida a fatiga para todos los niveles de deformación. La diversidad de los resultados se debe a la naturaleza del comportamiento visco-elástico de las mezclas, ya que influye en la magnitud de deformación y la recuperación de estas.

De acuerdo con los gráficos, para un 7,5% de EC los cambios de inclinación de la recta de regresión son más sutiles en comparación para una adición de 0 y 15% de EC, ya que poseen el mismo comportamiento frente a una deformación de 300 µm/m alcanzando el límite de ciclos de ensayo, pero a su vez son las que presentan mayor desigualdad de inclinación de la recta respecto a la muestra patrón. Además, a medida que disminuimos la cantidad de RAP para un 7,5% de EC se reduce la inclinación de esta, lo que se debe a la gran diferencia de la vida a fatiga obtenida para los distintos niveles de deformación.

En cuanto a las mezclas con un 15% de escoria de cobre existe una gran diferencia en la inclinación de la muestra que contiene un 70% de RAP a comparación de las demás las que poseen un comportamiento muy similar, debido a la similitud de la vida a fatiga para 300 y 400 µm/m, que superan con creces los resultados presentados por la mezcla con un 70% de RAP para una deformación de 300 µm/m.

En relación a las mezclas sin presencia de EC, el aumento en la adición de RAP provoca una disminución en la inclinación que presentan las rectas de regresión, a su vez a medida que disminuimos la cantidad de RAP la vida a fatiga para los distintos niveles de deformación exhiben una mayor proximidad, lo que está directamente relacionado con una mayor inclinación.

Finalmente, la adición de RAP altera la inclinación de la recta de regresión sin tener una tendencia clara, debido a la influencia de los demás agregados y a su comportamiento visco-elástico. Es importante destacar que aquellas mezclas que posean una mayor inclinación presentan una vida a fatigas más regular frente a todos los niveles de deformación estudiados.

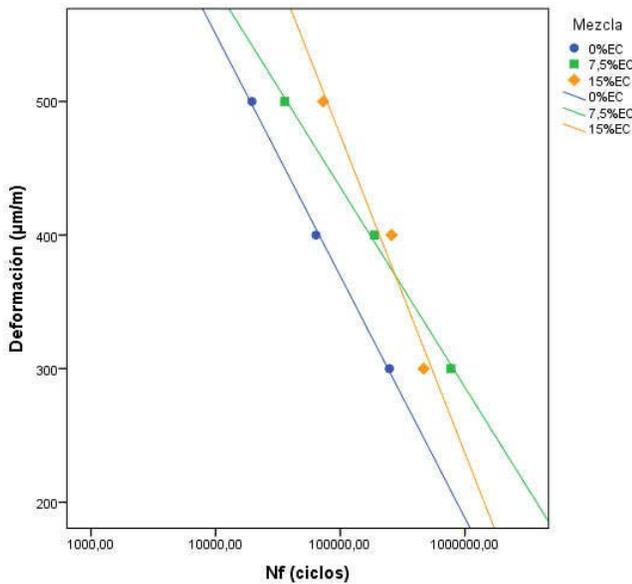


Figura 12. Vida a la Fatiga vs Deformación (0% RAP).

Por último, la Figura 12 resume los resultados obtenidos para las mezclas sin presencia de RAP, las cuales presentaron una conducta destacada en todos los niveles de deformación impuestos por el ensayo en comparación con la muestra patrón. En relación con la proporción lineal de los resultados, la totalidad de las mezclas con presencia de escoria de cobre exhibieron un excelente comportamiento, reproduciendo de forma similar esta conducta con respecto a la muestra con 100% de árido, obteniendo un coeficiente de determinación cercano a 1.

Respecto al comportamiento de las muestras sin presencia de RAP, se visualiza una alta tendencia a representar un comportamiento elástico, ya que a la máxima deformación aplicada presenta una correcta recuperación en cada ciclo de carga y descarga, debido a la alta inclusión de betún virgen y a la reducción de huecos, permitiendo una mejor distribución de los esfuerzos dentro de la viga. En general, la inclusión de escoria de cobre como agregado secundario a la mezcla, exhibe una mejora sustancial a la vida a fatiga, debido a la resistencia ofrecida por la angulosidad de este agregado.

En consecuencia, al aumentar los porcentajes de escoria de cobre sin la inclusión de RAP, se evita la incorporación de ligante envejecido y endurecido que aumenta drásticamente la rigidez de las muestras, por ende, este material al tener una menor cantidad de poros, el betún es destinado principalmente a copar los intersticios, transmitiendo de forma más eficaz los esfuerzos a los agregados. Finalmente, la adición de escoria de cobre entrega resultados de vida a fatiga mucho más eficientes y estables para todos los niveles de deformación.

En la Tabla 9 se resumen los ciclos alcanzados por las distintas mezclas para los diferentes niveles de deformación y su coeficiente de determinación.

Tabla 9. Cantidad de Ciclos por Deformación.

MEZCLA	300 µm/m	400 µm/m	500 µm/m
M1	247.590	63.825	19.560
M2	2.000.000	278.220	4.800
M3	2.000.000	209.130	53.430
M4	2.000.000	57.390	25.080
M5	770.400	188.370	35.850
M6	293.760	126.600	12.480
M7	930.510	119.520	4.830
M8	917.820	105.870	28.410
M9	465.690	257.550	72.930
M10	978.990	24.930	6.810
M11	734.280	321.180	8.610
M12	347.790	70.050	9.240

En la Figura 13 se representan las rigideces iniciales obtenidas durante los 100 primeros ciclos, para los 3 niveles de deformación aplicados, donde se observa que las mezclas no poseen una tendencia clara, ya que para cada nivel de deformación exhiben rigideces desiguales. Esto se debe, a que los niveles de deformación afectan directamente la rigidez de la muestra por su naturaleza visco-elástica.

Las muestras patrón evidencian una clara tendencia, a que la muestra que contiene solo áridos presenta la menor rigidez para todos los niveles de deformación, ya que la inclusión del RAP aumenta este parámetro debido a la pérdida de elasticidad del betún envejecido y al endurecimiento de este, siendo aquella que contiene un 60% la de mayor rigidez sobre la totalidad de las muestras. En cuanto a las que poseen un 7,5% de escoria de cobre, la mezcla que presenta resultados más dispares corresponde a la que no contiene RAP, en contra parte la mezcla con un 60% de RAP es la más constante en su conducta, debido a la arbitrariedad del control de vacíos en las mezclas que poseen este agregado, estando directamente relacionado con la rigidez de las muestras. Respecto a las mezclas con un 15% de escoria de cobre, se tiene que la probeta que carece de RAP presenta los menores valores de rigidez, debido al mayor contenido de ligante, el cual tiende a llenar los vacíos derivando en mezclas más flexibles, a comparación de la probeta compuesta por un 70% de RAP que posee una rigidez más constante en los 3 niveles de deformación. Finalmente se evidencia que los porcentajes de betún y vacíos alteran los valores de rigidez de las muestras, siendo la inclusión de RAP el principal factor de modificación de estos parámetros.

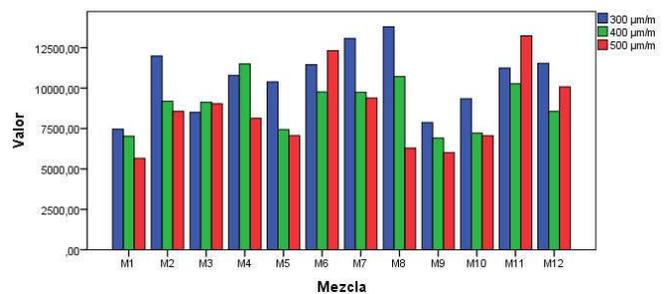


Figura 13. Rigidez Inicial Para los Tres Niveles de Deformación.

En la Tabla 10, se observa que el coeficiente de correlación de la totalidad de las mezclas se encuentra en un valor cercano a 1, lo que significa que existe una correlación entre las variables, teniendo una relación directa entre ellas, es decir si una aumenta la otra también manteniendo la proporción. Por otro lado, para el coeficiente de determinación, se obtuvieron para todas las muestras valores mayores al 88%, lo que indica que existe una elevada calidad del modelo para proyectar los resultados con una alta fidelidad. Por último, se alcanzó el mejor resultado en la muestra compuesta en un 100% por árido, viéndose disminuido o igualado para las demás muestras debido a la adición de los agregados restantes, ya que estos modifican las propiedades de las mezclas.

Tabla 10. Coeficiente de correlación y determinación

MEZCLA	r	R ²
M1	0,999	0,998
M2	0,981	0,962
M3	0,990	0,980
M4	0,941	0,886
M5	0,999	0,998
M6	0,965	0,932
M7	0,992	0,984
M8	0,990	0,981
M9	0,979	0,958
M10	0,964	0,929
M11	0,940	0,884
M12	0,997	0,995

4. Conclusiones

La escoria de cobre posee una elevada densidad compactada, por lo que genera un incremento de ésta en las mezclas asfálticas, implicando un aumento en la estabilidad para niveles bajos de agregado.

La adición de escoria de cobre a las mezclas asfálticas otorga una mayor elasticidad a estas, permitiendo obtener una mejora en los resultados bajo altas deformaciones, ya que a pesar de mostrar un comportamiento visco-elástico, es capaz de recuperarse de manera más similar a su estado original, debido a la nula existencia de poros en este agregado, y el ligante adicionado, es destinado a copar los intersticios, permitiendo traspasar los esfuerzos aplicados a los agregados de la mezcla.

La inclusión de RAP en las mezclas asfálticas implica un aumento considerable en la rigidez de estas, provocando un buen comportamiento frente a la deformación más baja pero un mal rendimiento bajo la máxima deformación, debido a que se asemeja a la conformación de un pavimento rígido incapaz de recuperarse frente a grandes deformaciones, provocando una falla frágil a lo largo del tiempo. Debido a esto, la utilización de este material conllevaría a un bajo traspaso de los esfuerzos hacia las capas bases, lo que limitaría su uso a tránsitos bajos y medios y velocidades bajas.

Debido al comportamiento visco-elástico de las muestras, no es posible precisar que una mezcla presente una mayor vida a fatiga que otra, a causa de las características de cada agregado, que se comportan de forma distinta bajo los diferentes parámetros de ensayo. Como se mencionó anteriormente, para los distintos

niveles de deformación se tienen combinaciones de agregados que pueden dar buenos resultados sujetos a un parámetro, pero pudiendo ser la peor en el otro caso.

La combinación de escoria de cobre y árido como únicos agregados estabilizan el comportamiento de las mezclas para los diferentes niveles de deformación, ofreciendo buenos rendimientos para todos los casos. En general, la escoria de cobre aporta de forma sutil una mejora a la vida a fatiga de la probeta, dependiendo principalmente del comportamiento de los demás agregados, siendo un reemplazo viable de áridos en pequeños porcentajes.

La rigidez de una mezcla asfáltica puede ser controlada por la temperatura a la cual el pavimento se encuentra prestando servicio. Debido a los resultados obtenidos bajo una temperatura de 20°C, se concluye que aquellas mezclas con altos contenidos de RAP y que presentan una elevada rigidez, su vida a fatiga se ve reducida bajo altas deformaciones, por ende, la aplicación de estas sería idealmente bajo una temperatura mayor a la empleada en este ensayo, en busca de un mejor comportamiento. Por el contrario, para aquellas muestras compuestas por árido y escoria de cobre sin la presencia de RAP, y que presentaron una baja rigidez, se esperaría un mejor resultado bajo una temperatura inferior a la de este ensayo, para así obtener una mayor vida a fatiga frente a la sollicitación de bajas deformaciones.

La adición de RAP altera la inclinación de la recta de regresión sin tener una tendencia clara, debido a la influencia de los demás agregados y a su comportamiento visco-elástico, a su vez aquellas mezclas que contienen un 7,5% de EC presentan una mayor horizontalidad, debido a que aquellas mezclas que posean una mayor inclinación presentan una vida a fatigas más regular frente a todos los niveles de deformación estudiados.

Los modelos de regresión lineal obtenidos presentan una alta confiabilidad, debido a que las variables poseen una elevada correlación y proporcionalidad, a causa de que la vida a fatiga presentada por las mezclas para los tres niveles de deformación tiene un comportamiento lineal.

La utilización de escoria de cobre como agregado para mejorar la vida a fatiga de mezclas asfálticas es viable, pero es necesario investigar su comportamiento frente a otros parámetros de ensayo, para representar la totalidad de sus posibles comportamientos. En consecuencia, la utilización de deformaciones bajo 300 µm/m, temperaturas inferiores o superiores a 20°C, diversas frecuencias y la aplicación de cargas sinusoidales bajo esfuerzos constantes permitirían representar a cabalidad su conducta.

Agradecimientos

Los resultados presentados pertenecen a investigaciones financiadas por los proyectos FONDECYT Iniciación N° 11140889 (CONICYT) y DID S-2014-27 (DID UACH). Los autores desean agradecer a las empresas BITUMIX S.A, Química Latinoamericana, GIMACH LTDA., y al Ministerio de Obras Públicas de la Región de Los Ríos por las donaciones de los materiales y el apoyo suministrado.

Bibliografía

- [1] J. P. Arellano, "El cobre como palanca de desarrollo para Chile," *Estud. Públicos*, vol. 127, pp. 123–159, 2012.
- [2] A. Nazer, O. Pavez, F. Rojas, and C. Aguilar, "Una revisión de los usos de las escorias de cobre," *Iberomet XI. X Conamet/sam (del 2 al 5 noviembre del 2010, viña del mar, Chile)*, 2010.
- [3] M. Pasetto and N. Baldo, "Resistance to permanent deformation of base courses asphalt concretes made with RAP aggregate and steel slag," in

International Conference on Asphalt Pavements, 2014a Raleigh, NC, 1999, vol. 1208.

- [4] E. Manthos and A. NIKOLAIDES, "Stiffness and fatigue of AC20 recycled mixtures with 25% and 50% RAP," in *International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements, 6th, 2015, Thessaloniki, Greece, 2015*.
- [5] A. C. Raposeiras, A. Vargas-Ceron, D. Movilla-Quesada, and D. Castro-Fresno, "Effect of copper slag addition on mechanical behavior of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 119, pp. 268–276, 2016.
- [6] M. Pasetto and N. Baldo, "Fatigue performance and stiffness properties of Stone Mastic Asphalts with steel slag and coal ash," in *Asphalt pavements—proceedings of the international conference on asphalt pavements, ISAP, 2014*, vol. 82, pp. 881–889.
- [7] M. Pasetto and N. Baldo, "Fatigue characterization of modified asphalt concretes by means of dissipated energy approaches," *Bitum. Mix. Pavements VI*, p. 379, 2015.
- [8] M. Pasetto and N. Baldo, "Fatigue Performance of Recycled Hot Mix Asphalt: A Laboratory Study," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2017, 2017.
- [9] S. Fernández-Cerdas, J. P. Aguiar-Moya, and L. G. Loria-Salazar, "FASE II: CARACTERIZACIÓN DE PAVIMENTO ASFALTICO REICLADO (RAP) EN EL LABORATORIO," Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR, 2014.
- [10] UNE-EN 12697-24, Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 24: Resistencia a la fatiga. AENOR, MADRID, 2013.
- [11] AASHTO T 245-15, Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. AASHTO, Whashington D.C., 2015.
- [12] Manual de Carreteras Vol.5, Especificaciones Técnicas Generales de Construcción, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, 2016.
- [13] Manual de Carreteras Vol.5, Especificaciones y Métodos de Muestreo, ensayo y control, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, 2016.
- [14] C. Santibáñez, Evaluación de la Influencia de la Escoria de Cobre en Mezclas Asfálticas con Altos Contenidos de RAP Frente al Ensayo de Sensibilidad al Agua, Tesis, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, UACH, Valdivia, 2016.
- [15] R. Bilbao, Utilización de Escoria de Cobre Como Sustituto de Árido en Mezclas Asfálticas con RAP: Análisis de Comportamiento Ante el Ensayo de Tracción Indirect y Módulo Resiliente, Tesis, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, UACH, Valdivia, 2015.
- [16] R. Baeza, Evaluación del Comportamiento Mecánico Frente al Agua de Mezclas Asfálticas con Altos Porcentajes de Pavimento Asfáltico Reciclado y Escoria de Cobre, Tesis, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, UACH, Valdivia, 2016.