



Evaluación de la durabilidad a fatiga de mezclas semicalientes con adición de zeolita natural y RAP.

Evaluation of fatigue durability of warm mix asphalt with addition of natural zeolite and RAP.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido

19-04-2018

Aceptado

25-05-2018

Publicado

09-11-2018

Palabras Clave:

Mezcla asfáltica
Comportamiento a fatiga
Mezclas semicalientes
RAP
Zeolita natural

Article history:

Received

19-04-2018

Accepted

25-05-2018

Available

09-11-2018

Keywords:

Asphalt mixture
Fatigue behavior
Warm mix asphalt
RAP
Natural zeolite

P. Loren¹, L. Mardones¹, G. Valdes¹, A. Calabi-Floody¹, E. Sanchez-Alonso¹

¹Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de la Frontera, Temuco, Chile.
gonzalo.valdes@ufrontera.cl, teléfono: +56-45-2325680.

Resumen

Este artículo presenta los resultados de una evaluación del deterioro por fatiga en mezclas asfálticas semicalientes y semicalientes recicladas con adición de pavimento asfáltico reciclado (RAP), las cuales se comparan con una mezcla convencional de referencia (HMA). La falla por fatiga es uno de los mecanismos de deterioro más frecuentes en los pavimentos flexibles. Se caracteriza por la producción de una microfisuración inicial, y debido a la repetición de las cargas producidas por el tráfico, el deterioro va progresando hasta producir el fallo por fatiga del pavimento. Para el estudio experimental, se evaluaron cinco mezclas asfálticas desarrolladas en el proyecto IDEA/CONYCIT, denominado "Desarrollo y Diseño de Mezclas Asfálticas de Mayor Eficiencia Energética y Bajo Impacto Ambiental", de las cuales, dos son mezclas asfálticas semicalientes con distintos porcentajes de adición de zeolita natural 0,3% y 0,6% y tres son mezclas asfálticas semicalientes recicladas con tasas de adición de RAP 10%, 20% y 30%. Todas cumplen con la normativa nacional vigente. Para la realización de este estudio, se evalúa el daño por fatiga mediante el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas de la norma UNE-EN 12697-24:2004+A1:2007. Adicionalmente, se evaluaron los parámetros de módulo de rigidez y densidad cuyos procedimientos están normados por la norma europea UNE-EN 12697-26:2012 y la normativa chilena MCV8 8.302.38, respectivamente. Una vez obtenidas las leyes de fatiga para cada mezcla, se realizan análisis de durabilidad de pavimentos. Para esto, se propone una estructura de pavimento compuesta de capas de mezcla asfáltica, capas granulares y subrasante. Se evalúan diferentes espesores de pavimento, los cuales mediante el método de diseño empírico mecanicista se determinan las durabilidades de las mezclas en estas estructuras de pavimento. Los resultados globales muestran que al utilizar las mezclas semicalientes con adición de zeolita natural, se pueden obtener desempeños similares al ser comparadas con una mezcla HMA convencional. Resultado diferente es el obtenido por las mezclas semicalientes recicladas con distintos contenidos de RAP, debido a que se obtienen mayores rigideces. En este contexto, se recomienda usar este tipo de mezclas, de forma similar a las mezclas de alto módulo en capas intermedias de estructuras de pavimento para así aumentar la duración a la fatiga.

Abstract

This paper shows the results of an evaluation for fatigue deterioration in warm mix asphalt mixtures (WMA) and WMA with the addition of recycled asphalt pavement (RAP) which are compared with a conventional reference mixture (HMA). Fatigue failure is one of the most frequent deterioration mechanisms in flexible pavements. It is characterized by the production of an initial micro cracking, and the repetition of loads produced by the traffic, the deterioration progresses until producing the fatigue fail of the pavement. For the experimental study, five asphalt mixtures developed in the project IDEA / CONYCIT, called " Desarrollo y Diseño de Mezclas Asfálticas de Mayor Eficiencia Energética y Bajo Impacto Ambiental " were evaluated, which two are asphalt mixtures with different percentages of addition of natural zeolite 0.3% and 0.6% and three are recycled asphalt mixes with 10%,

20% and 30% RAP addition cups. All mixtures fulfill the Chilean standard. To complete this study, the fatigue damage is evaluated by means of the fatigue indirect tensile, UNE-EN 12697-24:2004+A1:2007 standard. Additionally, the stiffness modules and density whose procedures are regulated by the UNE-EN UNE-EN 12697-26:2012 and the Chilean standard MCV8 8.302.38 were evaluated respectively. When the fatigue laws for each evaluated mixtures were obtained, a durability analysis of pavements was realized. For this, a type pavement structure composed of wearing asphalt layer, granular layers and subgrade was proposed. Different pavement thicknesses were evaluated by the mechanical empirical design method determining the asphalt mixtures durability in these pavement structures. The results showed that using the WMA with the addition of natural zeolite, similar performances were obtained in relation to conventional HMA mixture. Different results obtained by recycled WMA because of higher stiffness compared to HMA. As a result, it is recommended to use this type of mixtures, similar to the high modules mixtures, in intermediate layers of pavement structures to increase the duration to fatigue of the pavement.

1. Introducción.

Una realidad a nivel mundial es el gran porcentaje de pavimentos construidos con asfalto. En Europa se estima que más del 90% de caminos y carreteras son pavimentos flexibles construidos con asfalto. Así mismo, en Estados Unidos más del 92% de las estructuras de pavimentos están fabricadas con dicho material [1]. Chile, en toda su extensión, posee una red vial de aproximadamente 82.000 km. De esta red, solo un 25% corresponde a una red vial pavimentada, y del total de los caminos pavimentados, un 86% corresponde a pavimento asfáltico [2]. El alto porcentaje de utilización de este material a nivel global hace que la industria de pavimentación asfáltica busque nuevas soluciones de ingeniería para avanzar hacia prácticas de construcción más sostenibles. Los enfoques generales para mejorar la sostenibilidad de la industria de la pavimentación vial se basa principalmente en dos aspectos: a) la reutilización de materiales provenientes de la propia industria que permite la reducción del contenido de ligante y áridos vírgenes en las mezclas y b) la reducción de la energía consumida y las emisiones generadas en el proceso de la producción de las mezclas [3]. Esto permite indicar, que la industria de los pavimentos enfrenta la necesidad de reducir impactos ambientales relacionados con la utilización de materias primas, el uso de energía y emisiones [4].

En el contexto anterior, la industria de la construcción de carreteras se ha enfocado en mejorar o igualar las propiedades mecánicas de las mezclas mediante desarrollos de nuevas tecnologías más sustentables. Una de éstas, es la fabricación de mezclas asfálticas semicalientes (WMA) que se caracterizan por permitir su fabricación y colocación a menores temperaturas. Para ello, utilizan aditivos químicos, sintéticos o naturales [5], [6]. Otra línea de trabajo, es mediante la reutilización de pavimentos en desuso o pavimentos asfálticos reciclados (RAP) [5]. El RAP se genera a través del fresado de los pavimentos luego de ocurrido

la degradación de éstos debido a la acción del tráfico y a las condiciones climáticas a lo largo de la vida útil [7]. Ambas técnicas pueden ser utilizadas conjuntamente en el desarrollo de mezclas más sostenibles ambientalmente.

Uno de los deterioros más frecuentes en los pavimentos asfálticos es la fisuración por fatiga. Este deterioro se debe a la acumulación de daño producto de cargas repetidas de tráfico pesado bajo ciertas condiciones climáticas establecidas. Este fenómeno hace que los pavimentos se deterioren gradualmente producto de la formación de micro fisuras iniciales, las cuales se fusionan en una red, dando lugar a macro grietas y colapso estructural [8]. La respuesta a la fatiga de las mezclas asfálticas generalmente se evalúa a través de ensayos cíclicos o dinámicos de laboratorio, donde las mezclas asfálticas se someten a ciclos de carga sinusoidal. A medida que aumenta el número de ciclos, se produce una pérdida significativa en la rigidez del material [8]. En contexto, la literatura indica que la utilización de aditivos WMA mejora el rendimiento de la fatiga de las mezclas bituminosas [5]. Por el contrario, algunos estudios indican que al adicionar RAP a las mezclas podría disminuir la vida a la fatiga debido a la presencia de ligante envejecido [9]. Sin embargo, existen estudios que mencionan que cuanto mayor sea la rigidez, mayor vida y resistencia al fenómeno de fatiga tendrá la mezcla [10].

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, en este estudio se evalúa el daño por fatiga en mezclas asfálticas semicalientes con incorporación de zeolitas naturales y mezclas semicalientes recicladas (con adición de RAP y zeolitas naturales) mediante el método de tracción indirecta en probetas cilíndricas, de acuerdo a la norma UNE EN 12697-24:2004+A1:2007. Adicionalmente, se presenta un análisis de durabilidad de estructuras de pavimento de diferentes espesores compuestos por las mezclas evaluadas.

2. Estudio experimental

En este apartado se presenta una descripción del plan experimental, materiales y métodos utilizados para la evaluación del daño por fatiga en mezclas asfálticas semicalientes con adición de zeolita natural, así como mezclas asfálticas semicalientes con adición de RAP en diferentes porcentajes.

2.1 Plan experimental

En el plan experimental se consideró un ligante tipo CA-24 para las seis mezclas evaluadas, **Tabla 1**. En primer lugar se encuentra la mezcla de referencia denominada HMA, posteriormente las mezclas asfálticas semicalientes con adición de zeolita natural en

0,3% y 0,6% denominadas WMA/03 y WMA/06, respectivamente. Finalmente, se encuentran las mezclas semicalientes recicladas con adición de zeolita natural en 0,6% y RAP en distintos porcentajes: 10%, 20% y 30%. Estas se han nombrado como WMA/R10, WMA/R20 y WMA/R30, respectivamente. El porcentaje óptimo de cemento asfáltico, granulometría y temperaturas de compactación fueron obtenidos en estudios previos por medio de diseño de mezclas acorde al procedimiento Marshall que se especifica en la normativa Chilena [11] [12]. El porcentaje de cemento asfáltico utilizado fue de un 5,4% sobre el peso de los áridos, mientras que la temperatura de fabricación para las mezclas semicalientes con adición de zeolitas WMA fue de 135°C (20°C menos que la mezcla de referencia), y las mezclas semicalientes recicladas WMA/R10, WMA/R20 y WMA/R30 fue de 125°C, 135°C y 145°C, respectivamente.

Tabla 1 Nomenclatura y descripción de mezclas evaluadas.

Mezcla	Descripción	Temperatura de fabricación (°C)
HMA	Mezcla asfáltica de referencia o patrón	155
WMA/03	Mezcla asfáltica semicaliente con adición de zeolita de 0,3 % s/a	135
WMA/06	Mezcla asfáltica semicaliente con adición de zeolita de 0,6 % s/a	135
WMA/R10	Mezcla asfáltica semicaliente reciclada con adición de zeolita de 0,6 % s/a y 10% de RAP	125
WMA/R20	Mezcla asfáltica semicaliente reciclada con adición de zeolita de 0,6 % s/a y 20% de RAP	135
WMA/R30	Mezcla asfáltica semicaliente reciclada con adición de zeolita de 0,6 % s/a y 30% de RAP	145

2.2 Materiales: áridos y ligante

Para este estudio se utilizó una mezcla asfáltica semidensa tipo IV-A-12, ampliamente utilizada en Chile para la construcción de capas de rodadura e intermedia, **Figura 1**. Los áridos utilizados fueron de origen fluvial y su caracterización se presenta en la **Tabla 2**. Los ligantes asfálticos utilizados fueron de tipo CA-24 y sus características son las que indican en la **Tabla 3** (se utilizó el menos viscoso en la mezclas semicalientes recicladas con RAP). La caracterización de la zeolita natural del tipo clinoptilolita-mordenita micronizada se observa en la **Tabla 4**. El RAP utilizado fue obtenido mediante el fresado en las obras de mantenimiento y rehabilitación del bypass Temuco. La caracterización del RAP utilizado se registra en la **Tabla 5**.

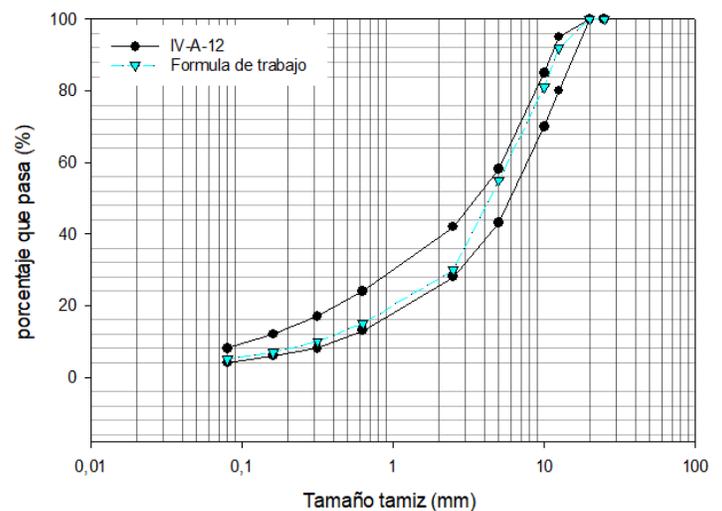


Figura 1 Granulometría de mezcla IV-A-12 utilizada en el estudio.

Tabla 2 Propiedades físicas de los áridos.

	ENSAYO	NORMATIVA	RESULTADO	LÍMITE
FRACCIÓN GRUESA	Desgaste Los Ángeles (máx.)	MCV5 8.202.11	18,4%	25%
	Desintegración en sulfato de sodio (máx.)	MCV5 8.202.17	2,4%	12%
	Partículas chancadas (mín.)	MCV5 8.202.6	97,3%	90%
	Partículas lajadas (máx.)	MCV5 8.202.6	2,7%	10%
	Adherencia método estático (mín.)	MCV5 8.302.29	>95%	95%
	Adherencia método dinámico (mín.)	MCV5 302.31	>95%	95%
FRACCIÓN FINA	Índice de plasticidad	MCV5 8.102.4	NP	NP
	Adherencia Rledel – Weber (mín.)	MCV5 8.302.30	0-9	0-5
	Desintegración sulfato de sodio (máx.)	MCV5 8.202.17	1,4%	15%
MEZCLA DE ÁRIDOS	Sales solubles (máx.)	MCV5 8.202.14	0,5%	2%
	Equivalente de arena (mín.)	MCV5 8.202.9	81%	50%

Tabla 3 Propiedades de los cementos asfálticos utilizados.

ENSAYOS	RESULTADOS CA24 (1)	RESULTADOS CA24 (2)	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO
Viscosidad Absoluta a 60°C (P)	3730	3000	Min. 2400	MC 8.302.15
Penetración, 25°C, 100g, 5s (dmm)	60	52	Min. 40	MC 8.302.3
Ductilidad a 25°C, 5cm/min (cm)	> 100	> 100	Min. 100	MC 8.302.8
Mancha Heptano Xilol (%Xilol)	< 30	< 30	Max. 25	MC 8.302.7
Punto de Inflamación copa abierta (°C)	> 232	> 232	Min. 232	MC 8.302.9
Punto de Ablandamiento (°C)	52,0	50,0	Informar	MC 8.302.16
Solubilidad en Tricloroetileno (%)	99,8	99,5	Min. 99.0	MC 8.302.11
Índice de Penetración (IP)	-0.2	-1.1	Min. -1.5 - Max 1.0	MC 8.302.18
ENSAYOS DE PELÍCULA DELGADA ROTATORIA				
Perdida por calentamiento (%)	0,02	0,02	Max. 0.8	MC 8.302.33
Viscosidad Absoluta a 60°C (Residuo)(P)	8800	6300	Informar	MC 8.302.15
Ductilidad de residuo, 25°C, 5cm/min (cm)	> 100	> 100	Min. 100	MC 8.302.8
Índice de durabilidad (ID)	2.4	2.1	Max. 3.5	Residuo/Original

Tabla 4 Caracterización de la zeolita natural micronizada

IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO	
Descripción	Zeolita natural clinoptilolita-mordenita
Nombre químico	Aluminosilicatos cálcico potásico magnésico hidratado
Granulometría utilizada	0 – 0,173 [mm]
CARÁCTERÍSTICAS MINERALÓGICAS	
Componentes zeolítico principal	Clinoptilolita-Mordenita
Otros componentes	Plagioclasa, Esmectita y Cuarzo
Color	Marfil
CARÁCTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS	
Composición química (%)	SiO_2 : 64,19 TiO_2 : 0,51 Al_2O_3 : 11,65 Fe_2O_3 : 2,53 MnO : 0,03 MgO : 0,66 Na_2O : 0,75 K_2O : 1,60 P_2O_5 : 0,03 PxC : 14,64
Capacidad de intercambio catiónico (cic)	86,82 a 112,88 [$cmol/kg$]
Superficie específica (método bet)	446 a 480 [$m^2 g^{-1}$]
Estabilidad térmica	< 450 °C
Estabilidad química	8,9
DENSIDAD	
	0,661 [g/cm^3]

Tabla 5 Caracterización del RAP utilizado.

Fracción RAP	0/5	5/20
Contenido de ligante (% por peso de mezcla)	7,5	3,3
Tamaño de tamiz (mm)	Porcentaje que pasa (%)	
20	100	100
12,5	100	73
10	100	56
5	100	29
2,5	70	18
0,63	35	11
0,315	25	8
0,16	19	5
0,08	15	4

2.3 Métodos utilizados

El módulo de rigidez fue determinado por medio del procedimiento que indica la norma UNE-12697-26:2012 anexo C, ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY). Se denomina módulo resiliente o de rigidez a aquel que durante pruebas de carga repetida y luego de un cierto número de ciclos de carga, permanece constante [13]. Los impulsos de carga deben ser aplicados de tal forma que sean impulsos repetidos

que se alternen con periodos de descanso. Se deben aplicar, al menos 10 impulsos de acondicionamiento para permitir que el equipo se ajuste a la magnitud de la carga y a su duración. Para el cálculo del módulo de rigidez medido se utilizan las mediciones de 5 impulsos de carga [14]. Las probetas fueron acondicionadas a 20°C y los ensayos fueron realizados a la misma temperatura de acondicionamiento.

El comportamiento a fatiga fue determinado por medio del ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas realizado según las especificaciones descritas en el anexo E de la norma europea UNE-EN 12697-24:2006+A1. Se ensayaron cinco probetas por cada nivel de tensión y éstas fueron acondicionadas y ensayadas a 20°C. El ensayo de fatiga proporciona el número de ciclos que resiste la mezcla hasta su fallo. El tipo de criterio de fallo convencional, que es el utilizado en este procedimiento, se define como el número de aplicaciones de carga necesario para que las deformaciones alcancen el doble de su valor inicial [15]. La ley de fatiga se determinó de acuerdo a lo indicado en la ecuación (1).

$$\varepsilon = k_1 * N^{k_2} \quad (1)$$

Donde,

- ε : deformación;
- N: número de aplicaciones de carga;
- k_1, k_2 : constantes del material.

2.4 Análisis de durabilidad

El análisis de durabilidad en las mezclas se realizó fijando parámetros base de un pavimento tipo. El método utilizado para determinar la durabilidad a fatiga del material fue el método empírico mecanicista. Éste se basa en dos componentes; el

primero, el componente mecánico que analiza los esfuerzos y deformaciones que se producen en una estructura de pavimento. El segundo, el componente empírico que relaciona la respuesta mecánica del pavimento con leyes de fatiga determinadas experimentalmente. Se utilizó el software de uso libre PITRA-PAVE para el análisis estructural de pavimentos flexibles el cual permite obtener esfuerzos, deformaciones y deflexiones ante determinadas cargas [16]. Los parámetros base para el análisis de durabilidad de las mezclas se exponen en la **Tabla 6**.

Tabla 6 Parámetros base para análisis de durabilidad de mezclas.

Módulo (MPa)	Poisson (μ)	Espesor (m)	Descripción
184,34	0,35	0,25	Capas granulares
76,83	0,35	∞	Suelo de fundación CBR 10%

Se analizaron diferentes espesores para la capa del pavimento asfáltico en un rango de [5-30] cm con 5 cm de diferencia entre capas. Además se evaluaron capas de pavimento mixto en las cuales las mezclas de mayor módulo se encuentran en la parte intermedia dejando como capa superior e inferior la mezcla de referencia (HMA). Para ese análisis se evaluaron capas de pavimento en un rango de [15-30] cm aumentando en 3 cm el espesor como se observa en la **Figura 2**.

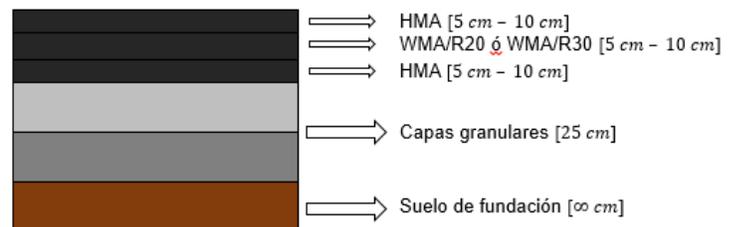
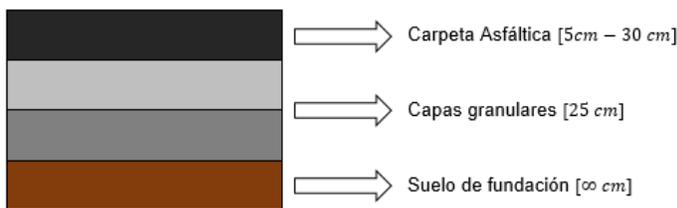


Figura 2 Estructuras de pavimentos analizadas.

3. ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos para las densidades y módulos de rigidez promedios de las mezclas evaluadas se presentan en la **Figura 3**. Se observa que aquellas mezclas con adición de 0,3% y 0,6% de zeolita natural presentan densidades similares a la mezcla de referencia patrón registrando leves aumentos de 0,25% y 0,46%, respectivamente. Este aumento puede atribuirse a una disminución del porcentaje de huecos por la adición de zeolita natural como material fino ya que, según indica Sengoz et al. (2017), las zeolitas se comportan como partículas de relleno

mineral [5]. Estos resultados concuerdan con lo señalado por Wozzuk y Franus (2016), quien registró mínimos aumentos en la densidad al adicionar zeolita natural [17]. Así mismo, las mezclas con mayor adición de RAP 20% y 30%, mostraron un aumento levemente mayor de densidad 1,7% y 1,9%, respectivamente. Esto puede deberse a la presencia de zeolita natural en un 0,6% como material fino y a una mayor concentración de finos en el pavimento reciclado. La mezcla con adición de RAP en un 10% presentó un comportamiento similar a la de zeolita natural 0,6%.

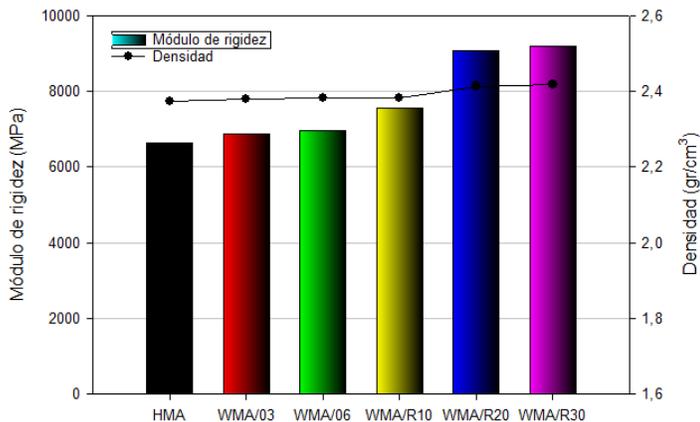


Figura 3 Módulos de rigidez y densidades de las mezclas evaluadas.

Las mezclas semicalientes con adición de zeolita natural de 0,3% y 0,6% registran valores de módulo de rigidez levemente superiores al obtenido por la mezcla patrón de referencia, 3,6% y 5,1%, respectivamente. Resultados similares se observan en estudios realizados en donde existe aumento del módulo de

rigidez al adicionar zeolita natural [17]. En las mezclas semicalientes con tasas de 10%, 20% y 30% de RAP se observan mayores incrementos en el módulo de rigidez con respecto a la mezcla HMA de referencia, con un 14%, 37% y 39%, respectivamente. Estos incrementos en el módulo de rigidez de las mezclas semicalientes con adición de RAP se deben principalmente a que el RAP incorpora un ligante asfáltico envejecido que cuando se mezcla con el ligante nuevo, resulta una ligante combinado de mayor rigidez [18].

La Figura 4 y la Tabla 7 muestran las leyes de fatiga obtenidas para la mezcla patrón y las mezclas semicalientes evaluadas. Las mezclas WMA con adición de 0,3% y 0,6% de zeolita natural presentan leyes de fatiga muy similares a la mezcla de referencia, con valores de deformación y pendientes equivalentes. A diferencia de los resultados obtenidos, Sengoz (2017) indica que los aditivos químicos y sintéticos, así como la zeolita natural, influyeron mostrando un aumento en rendimiento en términos de números de ciclo de carga para similar nivel de tensión aplicado en mezclas semicalientes con respecto a una mezcla patrón [5].

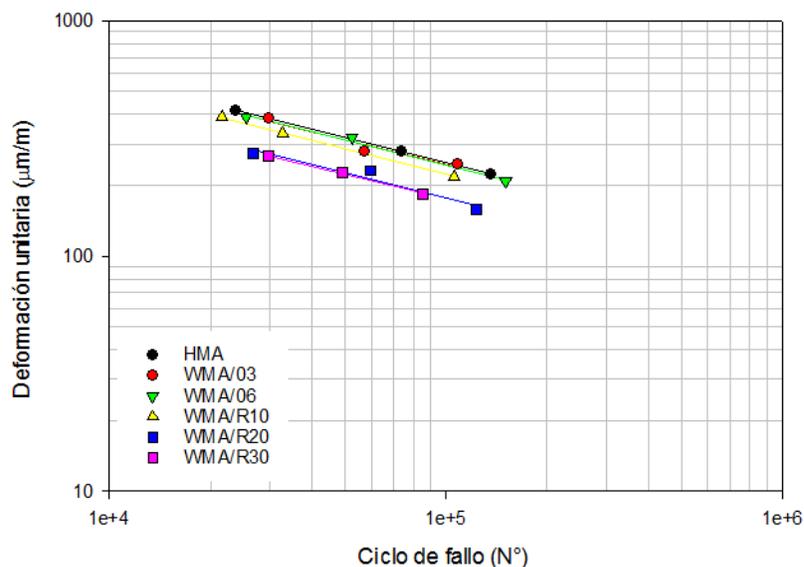


Figura 4 Leyes de fatiga mezclas evaluadas.

Para aquellas mezclas con mayor cantidad de RAP (WMA/R20 y WMA/R30), se registran menores valores de deformación a igual número de ciclos de aplicación de carga. Según estudios anteriores, investigadores como Kim et al. (2017) sugiere que existe una disminución de la vida a fatiga de las mezclas con adición de RAP debido a que ligante envejecido rigidiza la mezcla [18]. Resultado diferente, fue el obtenido por Pasetto y Baldo (2017), en el cual exponen que las mezclas con adición inferior a

40% de RAP (independiente del porcentaje agregado) se caracterizan por una mayor vida a fatiga [9]. En la misma línea, Silva et al. (2012) establecen que una mezcla fabricada con un 100% de RAP presenta mejores resultados a la resistencia por fatiga que una HMA convencional [19]. Por otra parte, la mezcla con adición de 10% de RAP mostró un comportamiento intermedio para el nivel de deformación a igual número de ciclo de carga.

Tabla 7 Valores de parámetros y coeficientes de leyes de fatiga.

Mezcla	$\epsilon(\mu\text{m}/\text{m})$	k_2	$\epsilon(10^6)(\mu\text{m}/\text{m})$	r^2	Módulo Dinámico (MPa)
HMA	15010	-0,356	110	0,999	3677
WMA/03	14069	-0,352	109	0,938	3770
WMA/06	14660	-0,356	107	0,988	3903
WMA/R10	14804	-0,364	97	0,999	4921
WMA/R20	10449	-0,354	79	0,937	5902
WMA/R30	9868	-0,350	78	0,996	6080

A priori, no se puede establecer la durabilidad de una mezcla a fatiga solo por sus valores de la ley de fatiga y módulos, puesto que ésta debe evaluarse como parte de una estructura de

pavimento. En este contexto, la **Figura 5** muestra los resultados del análisis de durabilidad de las mezclas evaluadas en una estructura de pavimento de espesor variable.

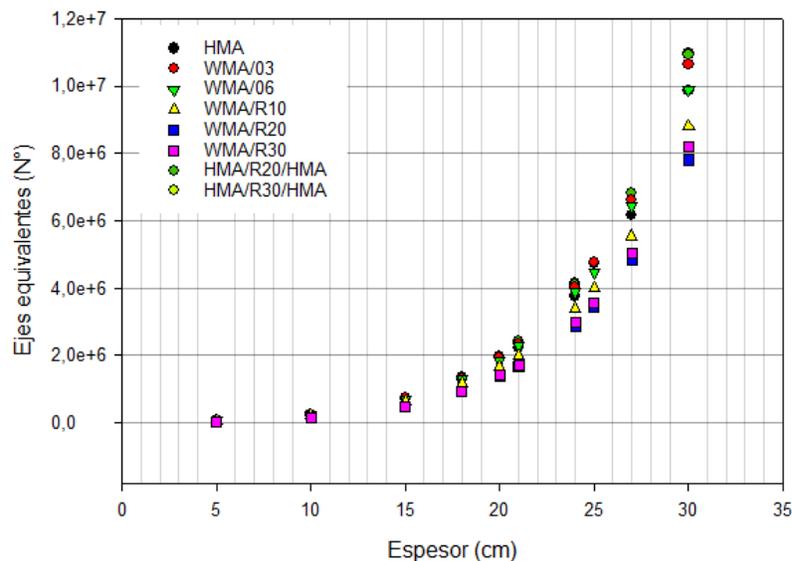


Figura 5 Durabilidad de mezclas evaluadas en estructuras de pavimento de espesor y composición variable.

Las mezclas WMA/03 y WMA/06 mostraron una ligera disminución de durabilidad en los primeros tramos de espesor de pavimento, entre 5 cm y 15 cm, con una disminución máxima de durabilidad de 6% en comparación con la HMA de referencia. Para el tramo de 25 cm, la mezcla WMA/03 presentó un comportamiento similar a la HMA resistiendo la misma cantidad de ejes equivalentes, mientras que WMA/06 mantuvo una disminución constante de 6%. El tramo final evaluado muestra que la mezcla WMA/03 aumenta en 8% la durabilidad, mientras que WMA/06 presenta un comportamiento igual a la de HMA resistiendo la misma cantidad de ejes equivalentes.

Las mezclas semicalientes con mayor incorporación de RAP (WMA/R20 y WMA/R30) presentaron una disminución más pronunciada de durabilidad en los primeros tramos de espesor de pavimento, entre 5 cm – 15 cm, disminuyendo en un rango de 48% a 30%, respectivamente. De manera similar, en los tramos de mayor espesor, entre 25 cm y 30 cm, la durabilidad se reduce en un 23% aproximadamente en comparación con la HMA de referencia. Estos resultados difieren del obtenido por Celauro et al. (2010), quien indica que mediante un proceso innovador en la fabricación se puede obtener mezclas de "alto rendimiento" para capas superficiales de carreteras para altos niveles de tráfico



pesado, en regiones con climas cálidos, utilizando porcentajes altos de materiales reciclados (hasta 50%) [20]. La mezcla WMA/R10 presentó un comportamiento más estable en donde durante todos los tramos de espesor disminuye la durabilidad en un 15% en comparación con la HMA de referencia. Sin embargo, al combinar estas mezclas en una estructura de pavimento con una mezcla patrón la respuesta de la estructura fue diferente. Se evaluaron estructuras combinadas de pavimento HMA - WMA/R30/ - HMA y HMA - WMA/R20/ - HMA. Estas estructuras mostraron un mejor desempeño en los tramos de 15 cm a 30 cm, aumentando la durabilidad del pavimento hasta en un 8% en comparación con estructura compuesta solamente con HMA de referencia. Esto se produce debido a la mayor capacidad estructural que le otorga las mezclas más rígidas en la capa intermedia a la estructura de pavimento analizada, efecto similar al logrado en los pavimentos de larga duración con la utilización de mezclas de alto módulo en la capa intermedia [21].

4. CONCLUSIONES

Las mezclas semicalientes con adición de zeolita natural en 0,3% y 0,6% presentan comportamientos a fatiga muy similares a la mezcla de referencia, al igual que en las propiedades de módulo de rigidez y densidad. Esto implica que al reducir 20 °C la temperatura de fabricación de las mezclas, la durabilidad de éstas es similar a la HMA de referencia.

A medida que las mezclas incorporan mayor cantidad de RAP aumenta la rigidez de las mezclas y su comportamiento a fatiga registra menores deformaciones a igual número de ciclos de carga. Sin embargo, en comparación con la HMA de referencia, las mezclas con mayores contenidos de RAP presentan una menor resistencia a la vida a la fatiga si se utilizan en toda la estructura de capas asfálticas del pavimento. El fenómeno de envejecimiento del ligante adherido al RAP afecta el rendimiento del ligante combinado, especialmente en aquellas mezclas con altos contenidos de RAP. Sin embargo, estas mezclas al tener mayor rigidez proporcionan mayor capacidad estructural al pavimento. Si esto es tomado en consideración, permite aumentar la durabilidad del pavimento si son utilizadas como parte intermedia de la estructura. Este comportamiento sería similar a los pavimentos de larga duración, en los cuales por diseño presentan una capa intermedia que tiene como principal característica ser una mezcla de alto módulo.

5. AGRADECIMIENTOS

Este artículo es el resultado de las investigaciones realizadas en el marco de los proyectos FONDEF IDEA N° ID15110235 financiado por CONICYT y el Proyecto DI18-0053 financiado por la Universidad de La Frontera.

6. REFERENCIAS

- [1] European Asphalt Pavement Association and National Asphalt Pavement Association, *The Asphalt Paving Industry A Global Perspective - 2nd edition*. 2011.
- [2] Ministerio de Obras Públicas de Chile. Dirección de Vialidad: Departamento de Gestión Vial, "Red Vial Nacional: Dimensionamiento y características," 2016.
- [3] J. Santos, G. Flintsch, and A. Ferreira, "Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 116, pp. 15–31, 2017.
- [4] A. M. Rodríguez-Alloza, A. Malik, M. Lenzen, and J. Gallego, "Hybrid input-output life cycle assessment of warm mix asphalt mixtures," *J. Clean. Prod.*, vol. 90, no. February 2015, pp. 171–182, 2015.
- [5] B. Sengoz, A. Topal, J. Oner, M. Yilmaz, P. A. Dokandari, and B. V. Kok, "Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures with Recycled Asphalt Pavement," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, pp. 117–127, 2016.
- [6] D. Singh, A. Habal, P. K. Ashish, and A. Kataware, "Evaluating suitability of energy efficient and anti-stripping additives for polymer and Polyphosphoric acid modified asphalt binder using surface free energy approach," *Constr. Build. Mater.*, vol. 158, pp. 949–960, 2018.
- [7] J. V. S. de Melo and G. Trichês, "Evaluation of properties and fatigue life estimation of asphalt mixture modified by organophilic nanoclay," *Constr. Build. Mater.*, vol. 140, pp. 364–373, 2017.
- [8] I. Isailović, M. P. Wistuba, and A. C. Falchetto, "Experimental study on asphalt mixture recovery," *Mater. Struct.*, vol. 50, no. 4, p. 196, 2017.
- [9] M. Pasetto and N. Baldo, "Unified approach to fatigue study of high performance recycled asphalt concretes," *Mater. Struct.*, vol. 50, no. 2, p. 113, 2017.
- [10] H. Alexander, R. Quintana, O. Ignacio, L. Vergara, W. Darío, and F. Gómez, "Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto Behavior of a warm mix asphalt made in an asphalt plant," *Ing. y Desarro. Univ. del Norte*, vol. 35, no. 1, pp. 152–173, 2017.
- [11] M. J. Valdebenito and M. García, "Diseño Marshall de mezcla semicaliente con adición de Zeolitas Naturales," Tesis de Titulación. Universidad de La Frontera. 2016.
- [12] L. Sánchez, "Diseño Marshall de mezcla semicaliente con adición de RAP y de Zeolitas Naturales." Tesis de Titulación. Universidad de La Frontera. 2016.
- [13] J. Moreno, Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas. Tesis de Titulación. Universidad Politécnica de Cataluña. 2005.



- [14] AEONOR, UNE-EN 12697-26 Mezclas bituminosas. Método de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 26: Rigidez. 2012.
- [15] AEONOR, UNE-EN 12697-26 Mezclas bituminosas. Método de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 24: Resistencia a la fatiga. 2008.
- [16] Universidad de Costa Rica, "Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales," 2017. [Online]. Available:
<http://www.lanamme.ucr.ac.cr/index.php/centro-de-descarga/pitra-pave/descarga-pitra-pave.html>.
- [17] A. Wozuk and W. Franus, "Properties of the Warm Mix Asphalt involving clinoptilolite and Na-P1 zeolite additives," *Constr. Build. Mater.*, vol. 114, pp. 556–563, 2016.
- [18] D. Kim, A. Norouzi, S. Kass, T. Liske, and Y. R. Kim, "Mechanistic performance evaluation of pavement sections containing RAP and WMA additives in Manitoba," *Constr. Build. Mater.*, vol. 133, pp. 39–50, 2017.
- [19] H. M. R. D. Silva, J. R. M. Oliveira, and C. M. G. Jesus, "Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 60, pp. 38–48, 2012.
- [20] C. Celauro, C. Bernardo, and B. Gabriele, "Production of innovative, recycled and high-performance asphalt for road pavements," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, no. 6, pp. 337–347, 2010.
- [21] D. Newcomb, R. Willis, and D. Timm, "Perpetual Asphalt Pavements," vol. 49, pp. 1–45, 2004.