

IAG130-01-2013
CARACTERIZACIÓN DEL DESEMPEÑO A FATIGA MEDIANTE EL
ENFOQUE FENOMENOLÓGICO Y DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS CHILENAS
CARACTERIZAÇÃO DO DESEMPENHO A FADIGA MEDIANTE O
ENFOQUE FENOMENOLÓGICO E DE DISIPACIÓN DE ENERGIA DE
MISTURAS ASFÁLTICAS CHILENAS

Gabriel García Saá, Ph.D., Ing. Civ.
Universidad Técnica Federico Santa María
Santiago, Chile
gabriel.garcia@usm.cl

Esteban Marín Gaete
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
mauricio.toroe@alumnos.usm.cl

Rodrigo Delgadillo Sturla, Ph.D, Ing. Civ.
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
rodrigo.delgadillo@usm.cl

Carlos Wahr Daniel, Ing. Civ.
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
carlos.wahr@usm.cl

Resumen

El comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas en caliente (MAC), ha sido caracterizado tradicionalmente usando un enfoque fenomenológico, donde se relaciona el nivel de deformación (o esfuerzo) con el número de ciclos para alcanzar una condición de falla especificada (N_f). Aunque existen varios tipos de ensayos para lograr esta caracterización, en los últimos años se ha extendido el uso de la viga a flexión cargada en cuatro puntos. Por otra parte, aun cuando el enfoque tradicional es simple, no proporciona una relación única entre la vida a fatiga y la deformación, lo cual dependerá de las propiedades del material, de la duración del pulso de carga y de la temperatura, entre otros. Es así, como se han desarrollado otros métodos, basados en la disipación de energía, que buscan unificar esta relación por medio de alguna propiedad fundamental. La Universidad Técnica Federico Santa María, se encuentra ejecutando el proyecto FONDEF D09/1174, donde se estudia el comportamiento de MAC usadas en la rehabilitación de pavimentos deteriorados, para desarrollar mezclas optimizadas con desempeño garantizado. La caracterización del comportamiento a fatiga de estas mezclas, es fundamental para poder garantizar su desempeño. El objetivo de este trabajo, es presentar los resultados de los ensayos de viga a flexión cargada en cuatro puntos, a deformación controlada, con onda de carga tipo

sinusoidal a 10 Hz y 20°C, realizados sobre cinco MAC: IV-A-12 con betún convencional y modificado, M-10 con betún modificado y SMA con dos tipos de fibras. La caracterización a fatiga de estas mezclas se realizó desarrollando las curvas del tipo fenomenológico, así como también aplicando la razón de cambio de la energía disipada (valor de plató).

Resumo

O comportamento a fadiga das misturas asfálticas em quente (MAC), tem sido caracterizado tradicionalmente usando um enfoque fenomenológico, onde se relaciona o nível de deformação (ou esforço) com o número de ciclos para atingir uma condição de falha especificada (N_f). Ainda que existem vários tipos de ensaios para conseguir esta caracterização, nos últimos anos estendeu-se o uso da viga a flexão carregada em quatro pontos. Por outra parte, ainda que o enfoque tradicional é simples, não proporciona uma relação única entre a vida a fadiga e a deformação, o qual dependerá das propriedades do material, da duração do pulso de ónus e da temperatura, entre outros. É assim, como se desenvolveram outros métodos, baseados na dissipação de energia, que procuram unificar esta relação por médio de alguma propriedade fundamental. A Universidade Técnica Federico Santa María, encontra-se executando o projecto FONDEF D09/1174, onde se estuda o comportamento de MAC usadas na reabilitação de pavimentos deteriorados, para desenvolver misturas optimizadas com desempenho garantido. A caracterização do comportamento a fadiga destas misturas, é fundamental para poder garantir seu desempenho. O objectivo deste trabalho, é apresentar os resultados dos ensaios de viga a flexão carregada em quatro pontos, a deformação controlada, com onda de ónus tipo sinusoidal a 10 Hz e 20°C, realizados sobre cinco MAC: IV-A-12 com betún convencional e modificado M-10 con betún modificado y SMA con dos tipos de fibras. La caracterización a fatiga de estas mezclas se realizó desarrollando las curvas del tipo fenomenológico, bem como também aplicando a razão de mudança da energia dissipada (valor de plató).

INTRODUCCIÓN

Aunque en Chile el diseño de pavimentos flexibles se realiza principalmente por medio del método AASHTO 93, se hace evidente la necesidad de implementar métodos basados en las leyes de la mecánica, incorporándoles los ajustes locales necesarios. Es decir, se debe seguir la tendencia mundial de migrar hacia algún método empírico-mecanicista.

Como un primer paso en la introducción de métodos empírico-mecanicistas para el diseño, la Universidad Técnica Federico Santa María, se encuentra ejecutando el proyecto FONDEF D09/1174, donde se estudia el comportamiento de mezclas asfálticas en caliente (MAC) usadas en la rehabilitación de pavimentos deteriorados, para optimizar y garantizar el desempeño de estas mezclas. La caracterización del comportamiento a fatiga, es fundamental para poder garantizar el desempeño de estas mezclas.

El fenómeno de la fatiga en pavimentos flexibles, se manifiesta esencialmente de dos maneras. El agrietamiento de abajo hacia arriba, asociado a las deformaciones de tracción al fondo de la capa asfáltica y el agrietamiento de arriba hacia abajo, el cual se asocia a la distribución no uniforme de las presiones de contacto tanto horizontal como verticalmente, entre otros factores. En Chile, de acuerdo a los antecedentes disponibles, el deterioro predominante ha sido el agrietamiento de

abajo hacia arriba. Por otra parte, actualmente existen varios tipos de equipos para medir la resistencia a la fatiga de MAC en laboratorio. Sin embargo, desde la implementación del programa SHRP en EE.UU., el ensayo de vigas sometidas a flexión en cuatro puntos ha sido uno de los más frecuentemente utilizados para caracterizar la vida a fatiga de las MAC (Pais y Harvey, 2012). En base a estos antecedentes, en el proyecto que dio origen a este estudio, se seleccionó el ensayo de fatiga de vigas sometidas a flexión en cuatro puntos como el más adecuado.

Por otra parte, para la caracterización del comportamiento a fatiga de las MAC, usualmente se han utilizado cuatro tipos de enfoques: el fenomenológico (o tradicional), la mecánica del daño continuo, la mecánica de la fractura y el de la energía y disipación de energía. En el contexto del presente estudio, el enfoque tradicional y el de la disipación de energía fueron seleccionados, debido a su simplicidad y a la disponibilidad de datos provenientes de otros estudios para comparar los resultados.

El objetivo del presente artículo es caracterizar, por medio del enfoque tradicional y de la razón de cambio de la energía disipada (valor de plató), el desempeño a fatiga de cinco MAC utilizadas en Chile.

MATERIALES UTILIZADOS Y CONDICIONES DE ENSAYO

Este trabajo, incluye la caracterización de cinco mezclas asfálticas en caliente: IV-A-12 con betún convencional (IV-A-12-C), IV-A-12 con betún modificado con SBS (IV-A-12-M), M-10 con betún modificado con SBS y SMA con dos tipos de fibras (pellet de celulosa con asfalto, SMA-P y otra solo con fibras de celulosa, SMA-F). La Tabla 1 muestra el tipo y contenido de asfalto y los vacíos de aire de cada mezcla utilizada y la Tabla 2 las granulometrías.

Los ensayos de fatiga realizados, siguieron las recomendaciones de la norma AASHTO T 321-07 “Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending”. La vida a fatiga, se determinó mediante ensayos de viga a flexión cargada en cuatro puntos, en un equipo servo-hidráulico, a deformación controlada, con onda de carga tipo sinusoidal a 10 Hz y 20°C. Se usaron probetas paralelepípedas de 380 mm de largo, 50 mm de altura y 63 mm de ancho, extraídas de placas de MAC compactadas con un compactador de rodillo de acero. En cada ensayo, la rigidez inicial se determinó como aquella medida al ciclo número 50 y el criterio de falla utilizado fue la reducción de la rigidez inicial al 50%.

Tabla 1: Tipo y contenido de asfalto y vacíos de aire de cada mezcla

Mezcla	Asfalto (Grado PG)	Contenido de Asfalto (%)	Vacíos de Aire (%)
IV-A-12-C	64-22	5,1	5,0
IV-A-12-M	70-28	5,1	5,0
M-10	70-22	5,3	10
SMA-P	70-22	6,8	2,9
SMA-F	70-22	6,0	6,0

Tabla 2: Granulometría de las mezclas asfálticas

TAMIZ		MEZCLA			TAMIZ		SMA (ambas) % que pasa
		IV-A-12-C % que pasa	IV-A-12-M % que pasa	M-10 % que pasa			
mm	ASTM				mm	ASTM	
20	3/4"	100	100	-	12.5	1/2"	100
12.5	1/2"	89	90	100	11.2	7/16"	99
10	3/8"	77	74	81	9.5	3/8"	83
5	N° 4	50	47	24	8	5/16"	63
2.5	N° 8	34	33	16	5.6	#3 1/2	39
0.63	N° 30	16	15	10	4.75	#4	34
0.315	N° 50	11	11	--	2.36	#8	24
0.16	N° 100	9	8	--	2	#10	23
0.08	N° 200	5.7	6	6	0.6	#30	16
					0.3	#50	13
					0.16	#100	12
					0.075	#200	10
					0.063	#230	10

CARACTERIZACIÓN FENOMENOLÓGICA O TRADICIONAL

Un modelo fenomenológico es aquel que presenta una relación observada que no ha sido derivada de análisis teóricos o de la mecánica de pavimentos. Varios modelos han sido propuestos para predecir el agrietamiento por fatiga. Éstos, fundamentalmente, se dividen en dos tipos principales, los que se basan en la deformación unitaria y aquellos que se basan en la deformación unitaria y el módulo del material. Por otra parte, una gran cantidad de modelos han sido desarrollados por diferentes organismos (Shell, Asphalt Institute, etc.) y que proporcionan una relación entre las propiedades de la mezcla, la respuesta del pavimento y las repeticiones de carga para fallar. No obstante, estos modelos deben ser validados con ensayos de laboratorio, bajo las condiciones locales, para evaluar su aplicabilidad.

Los ensayos de laboratorio, muestran claramente la existencia de una relación entre la deformación unitaria de tracción en la fibra más alejada del eje neutro, en una viga sometida a flexión, y la vida a fatiga. Esta misma relación ha sido extendida al agrietamiento de pavimentos, estableciendo que la tracción unitaria al “fondo” de la capa asfáltica (ϵ_t), está relacionada al número de repeticiones de cargas hasta la aparición de grietas en el pavimento (N_f), con un cierto factor de corrección para compensar las diferencias entre el laboratorio y el terreno (en cuyo caso se denomina función de transferencia). La relación de laboratorio más simple y la que se ha utilizado en este trabajo, es la ecuación 1, donde no se ha considerado un factor de corrección.

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{K_2} \quad (1)$$

Donde:

N_f = vida a fatiga, ciclos;

ϵ_t = deformación unitaria de tracción en la fibra más alejada del eje neutro, mm/mm;

K_1 , K_2 = coeficientes determinados experimentalmente.

Los coeficientes K_1 y K_2 , se determinan ajustando una regresión lineal (K_1 es el intercepto y K_2 la pendiente) a los datos ensayados a diferentes niveles de deformación y varían con cambios en las propiedades del material, la frecuencia de carga y la existencia de periodos de reposo entre cargas (Adhikari et al., 2009). El coeficiente K_2 , usualmente varía en el rango entre 3 y 6, mientras que K_1 puede variar significativamente (Ghuzlan y Carpenter, 2003). Por otra parte, K_1 y K_2 están relacionados, por lo que podría usarse un solo parámetro para describir la relación de fatiga de las MAC (Pais y Minhoto, 2010).

La Tabla 3 presenta los resultados de los ensayos de fatiga de las mezclas estudiadas. Los coeficientes K_1 y K_2 , corresponden a los parámetros de la ecuación 1 expresando ϵ_t en “ μ strain” ($\text{mm/mm} \times 10^{-6}$), con sus correspondientes coeficientes de correlación. También se han agregado los parámetros N_{500} , que representan el número de ciclos que cada mezcla resistió al ser sometida a 500 μ strain y ϵ_6 , que es la deformación unitaria de tracción (en μ strain) para resistir 1000000 de ciclos de carga. Estos dos criterios pueden ser utilizados para determinar el comportamiento relativo de una mezcla respecto de otra. Como se infiere de los resultados, aplicando el criterio N_{500} , el mejor desempeño lo alcanza la mezcla SMA-P, seguida de la IV-A-12-M, la SMA-F, la M-10 y finalmente, la IV-A-12-C. Por otra parte, aplicando el criterio ϵ_6 , las mezclas se ordenan prácticamente de la misma manera, excepto para las mezclas IV-A-12-M y SMA-P, que en este caso se invierte el orden. Esto se debe, a que las ecuaciones de cada mezcla tienden a ser paralelas, excepto para las mezclas en cuestión, que se intersectan entre 600 y 700 μ strain. Evidentemente, la caracterización por medio de la curva completa, refleja mejor el comportamiento de cada mezcla, pero, eso implica un gran trabajo de laboratorio (ensayos al menos a 4 niveles de deformación). El otro extremo lo representa el parámetro N_{500} , que necesita ensayos a un solo nivel de deformación.

Tabla 3: Resultados de ensayos de fatiga

Mezcla	Intercepto (K_1)	Pendiente (K_2)	Correlación (R^2)	N_{500} (Ciclos)	ϵ_6 ($\text{mm/mm} \times 10^{-6}$)
IV-A-12-C	5.08E+13	3.818	0.9927	2661	104
IV-A-12-M	5.57E+19	5.51	0.9823	50413	312
M-10	2.81E+14	3.747	0.9861	14404	180
SMA-P	1.52E+17	4.596	0.9819	63896	271
SMA-F	8.75E+14	3.89	0.9929	21060	199

Como se observa en la Figura 1, los valores de K_2 están dentro del rango que indica la literatura (entre 3 y 6). Además, como se expuso anteriormente, K_1 y K_2 están fuertemente relacionados ($R^2 = 0.97$). Por esta razón, podría usarse un solo parámetro para describir la relación de fatiga, reduciendo el número de ensayos a uno solo, que podría ser un nivel de deformación alto para que el ensayo fuese rápido. Combinando la ecuación 1 y la correlación de la Figura 1, se tiene la ecuación 2 que podría usarse para determinar K_2 . Se hace presente, que el valor adecuado de ϵ_t para aplicar la ecuación 2, no se pudo determinar en este estudio, dado la reducida base de datos. Por lo tanto, se requeriría expandir esta base de datos para proponer algún valor.

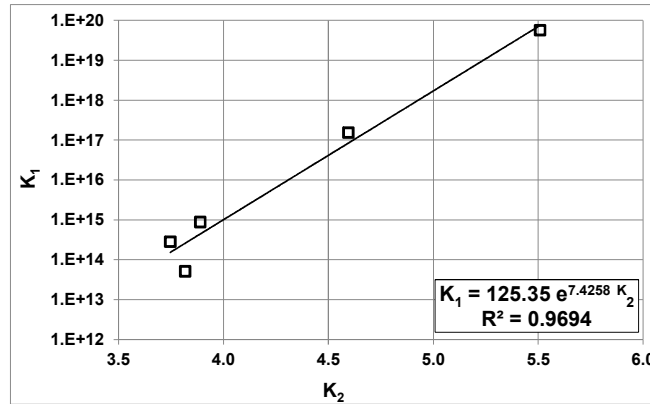


Figura 1: Relación K_2 vs. K_1 para todas las mezclas juntas

$$N_f = 125.35 e^{7.4258 K_2} \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{K_2} \quad (2)$$

CARACTERIZACIÓN POR MEDIO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Como demostraron los resultados de la caracterización fenomenológica, los parámetros de estos modelos son claramente dependientes del tipo de material. Otros investigadores (Carpenter et al., 2003), han mostrado que además, estos modelos son dependientes del modo de carga (deformación o esfuerzo constante, carga continua o con reposo, etc.), frecuencia y temperatura. Básicamente, estos modelos tradicionales no pueden capturar todas las situaciones que ocurren en un pavimento real. Por lo tanto, es altamente conveniente migrar desde un enfoque tradicional, hacia uno basado en propiedades fundamentales. En este estudio, se eligió el enfoque de la *razón de cambio de la energía disipada* (RCED) (Shen y Carpenter, 2007), para caracterizar las cinco mezclas de una manera fundamental, pero a la vez simple, utilizando la misma información que entrega el equipo al realizar el ensayo de fatiga aplicado en este trabajo.

El cambio en energía disipada entre dos ciclos, dividida por la energía disipada en el primero de los ciclos, está representada por la ecuación 3.

$$RCED = \frac{(ED_{n+1} - ED_n)}{ED_n} \quad (3)$$

Donde:

RCED = razón de cambio de la energía disipada;

ED_n = energía disipada en el ciclo de carga n ;

ED_{n+1} = energía disipada en el ciclo de carga $n+1$.

Esta razón proporciona una indicación cierta del daño que está ocurriendo en la mezcla entre los dos ciclos considerados. Así, el porcentaje de energía que ingresa al sistema y que produce daño en un ciclo, se puede determinar directamente durante el ensayo de fatiga. La curva de daño representada por RCED en función del número de ciclos, se puede dividir en tres etapas, como se

muestra en la Figura 2 a). La parte de interés es la etapa II (etapa de plató), donde RCED permanece prácticamente constante, hasta el dramático incremento en la etapa III, la cual es el comienzo de la falla verdadera. Ésto, representa la fractura final con propagación inestable de grietas. En términos prácticos, el valor de la RCED en el punto donde se alcanza el 50% de reducción de la rigidez inicial, se define como el valor de plató (VP). Shen y Carpenter, 2005, demostraron que existe una relación única entre VP (en inglés, Plateau Value, PV) y el número de ciclos donde la rigidez inicial se reduce al 50% (N_{f50}), para todas las MAC, todos los modos de carga (deformación controlada o esfuerzo controlado), todos los niveles de carga (normal y nivel de daño bajo) y varias condiciones de ensayo (frecuencia, periodos de reposo, etc.), la que se muestra en Figura 2 b). En esta figura, aunque aparece una correlación para el nivel de daño normal y otra para el nivel de daño bajo, se demostró estadísticamente, que todos los datos pueden ser representados por una única correlación, la de nivel de daño normal.

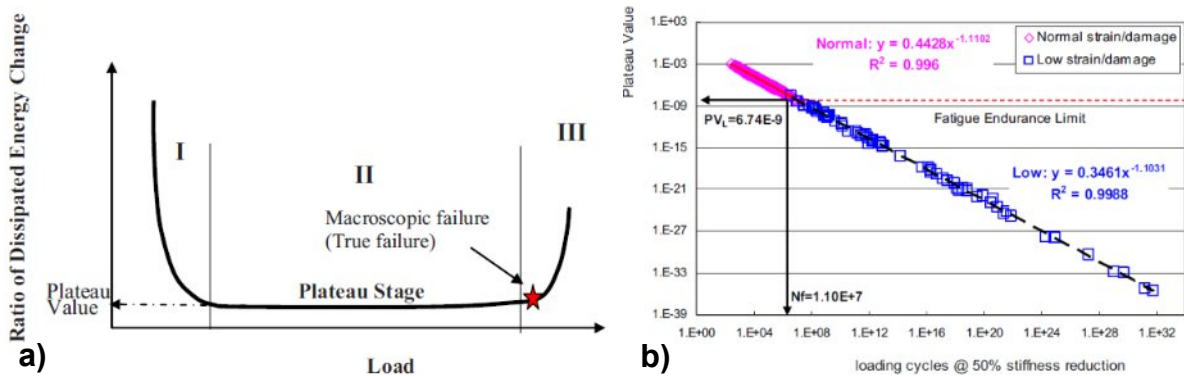


Figura 2: Valor de plató: a) curva RCED típica, b) VP vs. N_{f50} para 98 MAC (Shen y Carpenter, 2005)

Puesto que VP es un parámetro fundamental de energía, se puede determinar a partir de las propiedades del material y los niveles de carga. Shen y Carpenter, 2007, encontraron que VP es función de la deformación de tracción, la rigidez a flexión, un parámetro volumétrico que depende del contenido de asfalto y los vacíos de aire de la mezcla, y un parámetro granulométrico (ecuación 4). Una vez conocido VP, la vida a fatiga se puede calcular en base a la relación única entre VP y N_f para nivel de daño normal mostrada en Figura 2 b), de acuerdo a ecuación 5.

$$VP = 44.422\varepsilon^{5.140}S^{2.993}PV^{1.850}PG^{-0.4063} \quad (4)$$

$$N_f = 0.4801VP^{-0.9007} \quad (5)$$

Donde:

ε = deformación unitaria de tracción, mm/mm;

S = rigidez inicial a flexión de la MAC del ensayo de fatiga en laboratorio, MPa;

PV = parámetro volumétrico, $PV = \frac{VA}{(VA + V_b)}$;

VA = vacíos de aire de la mezcla, %;

V_b = contenido de asfalto por volumen, %, $V_b = 100 \frac{G_{mb} \cdot P_{ca}}{G_b}$;

G_{mb} = densidad bruta de la mezcla, %;

P_{ca} = contenido de asfalto por peso total de la mezcla, %;

G_b = peso específico del bitumen;

PG = parámetro granulométrico, $PG = \frac{P_{TMN} - P_{TCP}}{P_{200}}$;

P_{TMN} = agregado pasando tamiz de tamaño máximo nominal, %;

P_{TCP} = agregado pasando tamiz de control primario;

$TCP = TMN \times 0.22$;

P_{200} = agregado pasando tamiz No 200 (0,075 mm), %.

La Figura 3 a) muestra los VP obtenidos para cada condición de ensayo (diferentes niveles de deformación) y mezcla. Como se observa, todos los puntos forman una relación “única”, con una alta correlación ($R^2 = 0.9913$). Sin embargo, para poder aplicar el modelo predictivo de las ecuaciones 4 y 5, se debe demostrar que la relación de la Figura 3 a) es la misma que la mostrada en Figura 2 b). La Figura 3 b) muestra la comparación estadística entre la relación encontrada con los datos de este estudio y aquella propuesta por Shen y Carpenter. Como se aprecia, todos los puntos se distribuyen en torno a la línea de igualdad con un coeficiente $R^2 = 0.9854$, lo que indicaría que las relaciones de las Figuras 2 b) y 3 a) son estadísticamente equivalentes y, por lo tanto, la ecuación 5 puede usarse para los resultados de las cinco MAC de este estudio.

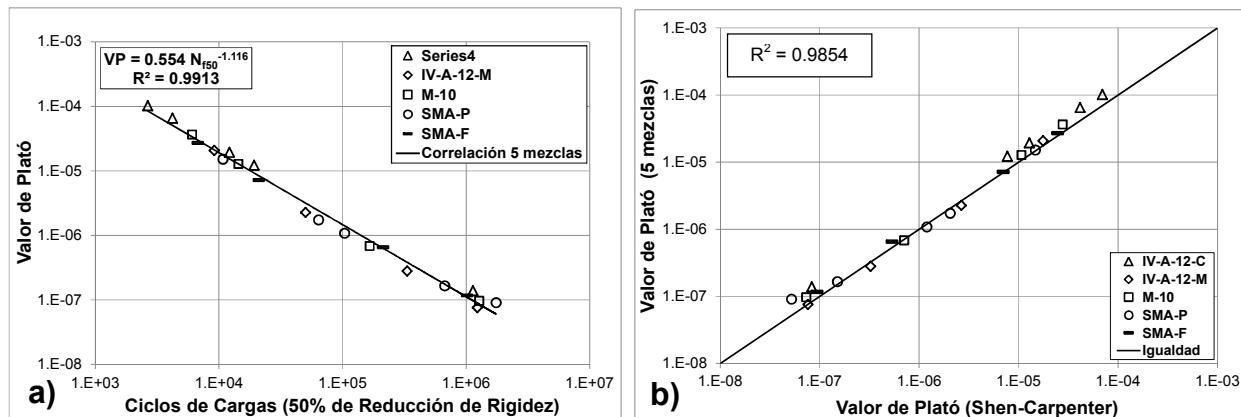


Figura 3: Valores de plató: a) de las 5 MAC estudiadas, b) de este estudio vs. la relación propuesta por Shen y Carpenter

Luego de aplicar los datos de las 5 MAC en las ecuaciones 4 y 5, se compararon los resultados de N_f obtenidos en laboratorio versus los estimados por medio de la ecuación 5. Como se aprecia en la Figura 4 a), la estimación es poco precisa ($R^2 = 0.5563$), tiene un sesgo significativo (0.5885) y, en general, sobrestima los valores medidos en laboratorio. Por otra parte, cuando se analiza la estimación para cada mezcla por separado, parece que el efecto predominante en la dispersión observada es el tipo de bitumen. Por ejemplo, comparando las mezclas IV-A-12-C y IV-A-12-M, la primera usa bitumen convencional (PG 64-22) y es la más sobrestimada de todas, mientras que la segunda usa el bitumen con mayor modificación (PG 70-28) y es la más subestimada. Esto estaría indicando que la ecuación 4 es inadecuada para reflejar el comportamiento viscoelástico del material de manera realista. Aún así, como se demostró, la ecuación 5 sigue siendo aplicable.

Dado lo anterior, se exploraron varios modelos alternativos a la ecuación 4 buscando minimizar los errores de cada estimación. El modelo más promisorio resultó ser el que considera el módulo

de rigidez (G^* , en MPa) y el ángulo de fase (δ , en radianes) del asfalto, medidos a la misma temperatura y frecuencia que el ensayo de fatiga (20°C y 10Hz). También incluye los parámetros ε y PV, con el mismo significado y unidades que en la ecuación 4, pero no incluye los parámetros S y PG, pues resultaron insensibles en la modelación. La ecuación 6 muestra el nuevo modelo.

$$VP = 1.66 \cdot 10^7 \varepsilon^{4.44} PV^{1.28} G^{*4.40} \delta^{23.28} \quad (6)$$

Usando las ecuaciones 6 y 5, en la Figura 4 b) se observa que este nuevo modelo es muy preciso ($R^2 = 0.9164$), tiene poco sesgo (0.2181) y, en general, subestima los valores de laboratorio.

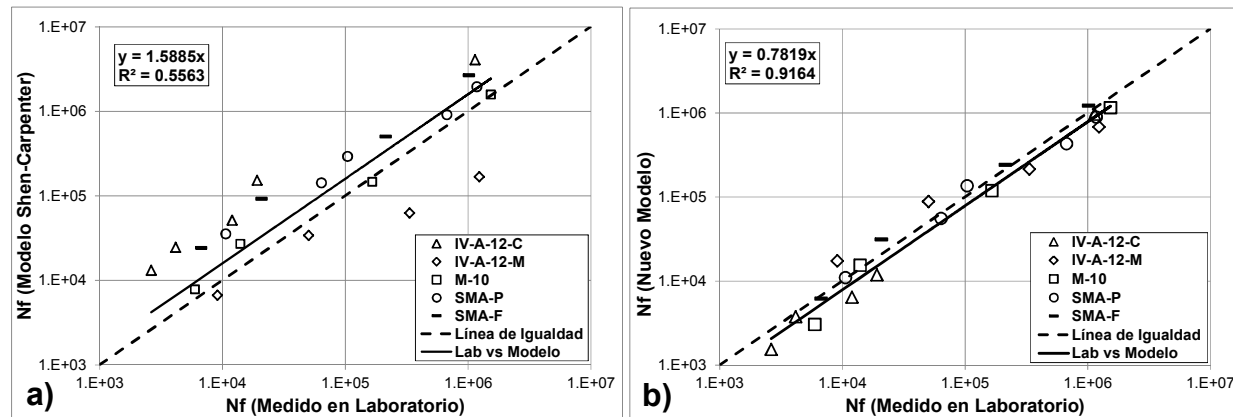


Figura 4: Evaluación de modelos: a) Modelo Shen-Carpenter, b) Nuevo modelo

Lo interesante del nuevo modelo, es que ya no requiere ensayo de fatiga alguno (a diferencia de la ecuación 4 que requiere determinar S), pues se basa sólo en las propiedades de la mezcla y el bitumen, que también son necesarias para estimar el módulo dinámico de la mezcla.

CONCLUSIONES

Se caracterizó el desempeño a fatiga de cinco MAC utilizadas en Chile, por medio del enfoque tradicional y también mediante la RCED. Los parámetros fenomenológicos K_1 y K_2 obtenidos, mostraron una fuerte correlación ($R^2 = 0.97$). K_2 estuvo dentro del rango indicado en la literatura (3 a 6). Así, se desarrolló una relación con un solo parámetro, lo que permitiría caracterizar otras mezclas, ensayando a un solo nivel de deformación. Sin embargo, se requiere expandir la base de datos actual para establecer ese nivel de deformación adecuado. En general, la mezcla IV-A-12-M mostró el mejor desempeño a fatiga, seguida por las mezclas SMA-P, SMA-F, M-10 y finalmente, la mezcla IV-A-12-C. Este orden se relacionó directamente con el tipo de bitumen utilizado (PG 70-28 la mejor y PG 64-22 la peor). Los criterios N_{500} y ε_6 , presentaron prácticamente los mismos resultados relativos entre las mezclas y tienen la ventaja de que requieren un menor número de ensayos que para determinar K_1 y K_2 . Con el objeto de capturar todas las situaciones que ocurren en un pavimento real, se aplicó un modelo basado en una propiedad de energía fundamental (valor de plató) propuesto por Shen y Carpenter, el que se combina con algunas propiedades del material para estimar N_f . Este modelo fue poco preciso ($R^2 = 0.5563$), mostró un sesgo significativo (0.5885) y sobrestimó los valores de laboratorio. Dado lo anterior, se propuso un nuevo modelo, el que considera la deformación de tracción a la cual se

quiere estimar N_f , un parámetro volumétrico de la mezcla y el módulo rigidez (G^*) y ángulo de fase (δ) del bitumen. Este nuevo modelo fue muy preciso ($R^2 = 0.9164$) y mostró poco sesgo (0.2181). Una de las ventajas fundamentales de este nuevo modelo, es que ya no se requiere ensayo de fatiga alguno para estimar N_f . Otra ventaja, es que utiliza las mismas propiedades que requieren algunos modelos para estimar el módulo dinámico de la mezcla, lo cual permitiría una mejor integración en un método de diseño de pavimentos empírico-mecanicista.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se basa en los resultados del proyecto FONDEF D09/1174, financiado parcialmente por CONICYT, consistente en el estudio del comportamiento de mezclas asfálticas utilizadas en la rehabilitación de pavimentos deteriorados. Se agradece la participación en este proyecto, de las empresas: Constructora Asfalcura S.A., Ruta del Maipo Sociedad Concesionaria S.A., Abertis Autopistas Chile Ltda., Sociedad Concesionaria Autopista Central S.A. y del Laboratorio de Ensayes de Materiales y Control de Obras (LEMCO) de la Universidad Técnica Federico Santa María.

REFERENCIAS

- Adhikari, S., Shen, S., You, Z. (2009). Evaluation of Fatigue Models of Hot-Mix Asphalt Through Laboratory Testing. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2127. pp. 36-42.
- Carpenter, S., Ghuzlan, K, Shen, S. (2003). Fatigue Endurance Limit for Highway and Airport Pavement. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1832. pp. 131-138.
- Ghuzlan, K, Carpenter, S. (2003). Traditional Fatigue Analysis of Asphalt Concrete Mixtures. [CD-ROM] 82th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Pais, J., Harvey, J. (2012). Proceeding of the Third Conference on Four-Point Bending, Davis, CA, USA.
- Pais, J., Minhoto, M. (2010). The Prediction of Fatigue Life of Asphalt Mixtures Using Four-Point Bending Tests. 24th ARRB Conference – Building on 50 years of road and transport research, Melbourne, Australia 2010.
- Shen, S., Carpenter, S. (2005). Application of Dissipated Energy Concept in fatigue Endurance Limit Testing. [CD-ROM] 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Shen, S., Carpenter, S. (2007). Development of an Asphalt Fatigue Model Based on Energy Principles. [CD-ROM] Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 76.