

IAG129-01-2013
MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS EN CALIENTE UTILIZADAS EN CHILE
MEDIDA E ESTIMATIVA DO MÓDULO DINÂMICO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS EM QUENTE UTILIZADAS EM CHILE

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

Mauricio Toro Estay
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

La tendencia actual en el diseño estructural de pavimentos, es aplicar procedimientos empírico-mecanicistas de diseño. Estos procedimientos, requieren la caracterización de las mezclas asfálticas en caliente (MAC) por medio de su relación esfuerzo-deformación, es decir el módulo, pero como función de la frecuencia de carga y temperatura. En Chile, el diseño estructural de pavimentos flexibles se basa fundamentalmente en el método AASHTO 93, complementado con algunos criterios basados en el método Shell. Actualmente, la Universidad Técnica Federico Santa María se encuentra ejecutando el proyecto FONDEF D09/1174, consistente en el estudio del comportamiento de mezclas asfálticas utilizadas en la rehabilitación de pavimentos deteriorados, para desarrollar una mezcla especial cuyo desempeño esté garantizado. En este contexto, se ha comenzado a determinar el módulo de las MAC mediante el ensayo del módulo dinámico (IE^*I) en compresión uni-axial, como lo recomienda la nueva Guía de Diseño Empírica-Mecanicista Interina AASHTO 2008. Por otra parte, dado que en Chile no existe una disponibilidad generalizada de equipos para medir IE^*I , es altamente deseable un método alternativo al ensayo de laboratorio, que permita estimar su valor de manera rápida, confiable y con la mínima información disponible de actividades rutinarias. Este trabajo, presenta los resultados de la caracterización, por medio de sus curvas maestras e isócronas, de cinco mezclas asfálticas: IV-A-12 con betún convencional y modificado, M-10 con betún modificado y SMA con dos tipos de fibras. Con los valores de IE^*I medidos en laboratorio, cuatro modelos para estimar el módulo dinámico fueron evaluados: Witczak Original, Witczak Modificado, Hirsch y

Al-Khateeb. El modelo Hirsch resultó ser el más promisorio. En general, ambos modelos Witczak sobrestimaron IE^*I . En cambio, los modelos Hirsch y Al-Katheeb lo subestimaron.

Resumo

A tendência atual no projeto estrutural de pavimentos é aplicar procedimentos empíricos-mecanicistas de desenho. Estes procedimentos requerem a caracterização das misturas de asfalto quente (MAC), por meio da sua relação de tensão-deformação, isto é o módulo, mas como uma função da frequência da carga e da temperatura. No Chile, o desenho estrutural de pavimentos flexíveis é baseado fundamentalmente no método da AASHTO 93, complementado com alguns critérios baseados no método da Shell. Atualmente, na Universidade Técnica Federico Santa María está em execução o projeto FONDEF D09/1174, incorporado no estudo do comportamento de misturas asfálticas utilizadas na reabilitação de pavimentos deteriorados, para desenvolver uma mistura especial cujo desempenho está garantido. Neste contexto, começaram a determinar o módulo MAC mediante o ensaio do módulo dinâmico (IE^*I) em compressão uniaxial, conforme recomendado pela nova Guia de Desenho Empírica-Mecanicista Interina AASHTO 2008. Por outro lado, dado que no Chile não existe uma disponibilidade generalizada de equipamentos para medir o IE^*I , é altamente desejável um método alternativo aos testes de laboratório que permite estimar o seu valor de forma rápida, confiável e com o mínimo de informação disponível para atividades rotineiras. Este documento apresenta os resultados da caracterização, através das suas curvas mestras e isócronas, de cinco misturas de asfalto: IV-A-12, com betume modificado e convencional, M-10 com betume modificado e SMA com dois tipos de fibras. Com os valores do IE^*I medidos em laboratório, foram avaliados quatro modelos para estimar o módulo dinâmico: Witczak Original, Witczak Modificado, Hirsch e Al-Khateeb. O modelo Hirsch foram o mais promissor. Em geral, ambos modelos Witczak superestimaram o IE^*I . No entanto, os modelos Hirsch e Al-Katheeb o subestimaram.

INTRODUCCIÓN

La tendencia actual en el diseño estructural de pavimentos, es aplicar procedimientos empírico-mecanicistas de diseño. Un impulso muy importante en este sentido, ha sido la introducción de la nueva Guía de Diseño de Pavimentos Empírica-Mecanicista Interina AASHTO 2008 (GDPEM). Para la aplicación de estos métodos empírico-mecanicistas, las mezclas asfálticas en caliente (MAC) requieren ser caracterizadas por medio de su relación esfuerzo-deformación, es decir el módulo, pero como función de la frecuencia de carga y temperatura.

En Chile, el diseño estructural de pavimentos flexibles se basa fundamentalmente en el método AASHTO 93, complementado con algunos criterios basados en el método Shell. Actualmente, la Universidad Técnica Federico Santa María se encuentra ejecutando el proyecto FONDEF D09/1174, consistente en el estudio del comportamiento de mezclas asfálticas utilizadas en la rehabilitación de pavimentos deteriorados, para desarrollar una mezcla especial cuyo desempeño esté garantizado. Dentro de este proyecto, se ha comenzado a determinar, por primera vez en el país, el módulo de las MAC mediante el ensayo del módulo dinámico (IE^*I) en compresión uniaxial, como lo recomienda la GDPEM. Actualmente, no existe una disponibilidad generalizada, a nivel nacional, de equipos para medir IE^*I , lo que hace altamente deseable un método alternativo al ensayo de laboratorio (Nivel 1 de datos según GDPEM), que permita estimar su valor de

manera rápida, económica, confiable y con la mínima información disponible que pueda ser obtenida de ensayos rutinarios.

En la actualidad, existen dos enfoques más utilizados para estimar el módulo dinámico sin la necesidad de realizar el ensayo de laboratorio. El primero, se basa en utilizar ecuaciones predictivas obtenidas por medio de modelos de regresión multivariada. En este caso, la capacidad predictiva de cada ecuación se evalúa comparando los $|E^*|$ medidos en laboratorio con los estimados con las ecuaciones, aplicándolo a las mezclas más representativas y seleccionando aquella ecuación de mejor predictibilidad para ser utilizada en reemplazo del ensayo (Birginsson et al., 2005; Dongré et al., 2005; García, 2009; Shen et al., 2013). En este enfoque, normalmente se requerirá calibrar la ecuación más promisorio usando las condiciones locales. El segundo enfoque, desarrollado recientemente, consiste en estimar el módulo dinámico usando la metodología de la redes neuronales artificiales (Ceylan et al., 2009; Martínez et al., 2009). Sin embargo, este último enfoque requiere la conformación de una base de datos extensa y robusta para generar estimaciones confiables, lo que no es el caso en el contexto del presente trabajo.

En base a estas consideraciones, el objetivo de este artículo es presentar los resultados de la caracterización, por medio de sus curvas maestras e isócronas, de cinco mezclas asfálticas: IV-A-12 con betún convencional y modificado, M-10 con betún modificado y SMA con dos tipos de fibras. Además, con los valores del $|E^*|$ medidos en laboratorio, evaluar los modelos predictivos Witczak Original, Witczak Modificado, Hirsch y Al-Khateeb y seleccionar el más promisorio.

MODELOS PARA ESTIMAR EL MÓDULO DINÁMICO EVALUADOS

Hay varios modelos disponibles para estimar $|E^*|$, la mayoría son empíricos o semiempíricos y requieren las propiedades volumétricas de la mezcla y las características del asfalto como datos de entrada. A continuación, se presentan los modelos evaluados.

Modelo Witczak Original

Esta ecuación se basa en una base de datos de 2750 mediciones de $|E^*|$ con 205 MAC diferentes, 23 tipos de asfaltos convencionales y modificados. Un valor de R^2 de 0.96 fue obtenido en el desarrollo de este modelo.

$$\log|E^*| = -1.249937 + 0.029232 \rho_{200} - 0.001767 (\rho_{200})^2 - 0.002841 \rho_4 - 0.058097 V_a - 0.802208 \left(\frac{V_{\text{beff}}}{V_{\text{beff}} + V_a} \right) + \frac{3.871977 - 0.0021 \rho_4 + 0.003958 \rho_{38} - 0.000017 (\rho_{38})^2 + 0.00547 \rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351 \log(f) - 0.393532 \log(\eta))}} \quad (1)$$

Donde:

$|E^*|$ = módulo dinámico, 10^5 psi;

η = viscosidad del bitumen, 10^6 Poise;

f = frecuencia de carga, Hz;

V_a = contenido de vacíos de aire, %;

V_{beff} = contenido de bitumen efectivo, % por volumen;

ρ_{34} = % acumulado retenido en tamiz 19-mm (3/4);

ρ_{38} = % acumulado retenido en tamiz 9.5-mm (3/8);
 ρ_4 = % acumulado retenido en tamiz 4.76-mm (No. 4);
 ρ_{200} = % que pasa el tamiz 0.075-mm (No. 200).

Modelo Witczak Modificado

Se utilizó una base de datos de 7400 puntos con 346 MAC. Este modelo incluye propiedades del bitumen que son consistentes con las exigidas en el método SUPERPAVE de grados por desempeño. En el desarrollo de este nuevo modelo, se obtuvo un R^2 igual a 0,9.

$$\begin{aligned}
 \log(|E^*|) = & -0.349 + 0.754 \left(|G_b^*|^{-0.0052} \right) \cdot \left(6.65 - 0.032\rho_{200} + 0.0027\rho_{200}^2 - 0.01\rho_4 - 0.0001\rho_4^2 \right. \\
 & \left. + 0.006\rho_{38} - 0.00014\rho_{38}^2 - 0.08V_a - 1.06 \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} \right) \right) \\
 & + \frac{2.56 + 0.03V_a + 0.71 \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} \right) + 0.012\rho_{38} + 0.0001\rho_{38}^2 - 0.01\rho_{34}}{1 + e^{(-0.7814 - 0.5785 \log |G_b^*| + 0.8834 \log(\delta_b))}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Donde:

$|E^*|$ = módulo dinámico, psi;
 ρ_{200} = % (por peso de agregado total) pasando el tamiz 0.075-mm (No. 200);
 ρ_4 = % acumulado (por peso) retenido en tamiz 4.76-mm (No. 4);
 ρ_{34} = % acumulado (por peso) retenido en tamiz 19-mm (3/4-in.);
 ρ_{38} = % acumulado (por peso) retenido en tamiz 9.5-mm (3/8-in.);
 V_a = contenido de vacíos de aire (por volumen de la mezcla), %;
 V_{beff} = contenido de bitumen efectivo (por volumen de la mezcla), %;
 $|G_b^*|$ = módulo de corte dinámico del bitumen, psi;
 δ_b = ángulo de fase del bitumen asociado con $|G_b^*|$, grados.

Modelo Hirsch

Es un modelo racional, aunque semiempírico. Se basa en una versión de la ley de mezclas, la cual combina los elementos de las fases en serie y en paralelo.

En este modelo, $|E^*|$ es directamente estimado en base al módulo dinámico de corte del asfalto ($|G_b^*|$), los vacíos en el agregado mineral y los vacíos llenos con asfalto, según ecuaciones 3 y 4. Un total de 18 mezclas con 8 diferentes asfaltos, conformando una base de datos de 206 puntos, fueron utilizadas en el desarrollo de este modelo, obteniéndose un R^2 igual a 0.982.

$$|E^*| = Pc \left[4,200,000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 |G_b^*| \left(\frac{VFA \cdot VMA}{10,000} \right) \right] + (1 - Pc) \left[\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4,200,000} + \frac{VMA}{VFA \cdot 3 |G_b^*|} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$P_c \frac{\left(20 + \frac{VFA \cdot 3|G_b^*|}{VMA}\right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFA \cdot 3|G_b^*|}{VMA}\right)^{0.58}} \quad (4)$$

Donde:

- $|E^*|$ = módulo dinámico, psi;
- $|G_b^*|$ = módulo de corte dinámico del bitumen, psi;
- VMA= vacíos en el agregado mineral, %;
- VFA = vacíos llenos con bitumen, %;
- Pc = factor de contacto del agregado.

Modelo Al-Khateeb

Este modelo semiempírico, al igual que el modelo Hirsch, fue derivado de la ley de mezclas, considerando un sistema de fases sólo en paralelo, donde el comportamiento mecánico de la mezcla es simplemente la suma de las respuestas de esas fases (Al-Khateeb et al., (2006)). En este modelo, $|E^*|$ es directamente estimado en base al módulo dinámico de corte del asfalto ($|G_b^*|$) y los vacíos en el agregado mineral, por lo que es más simple que el modelo Hirsch. Un total de seis bitúmenes (dos convencionales y cuatro modificados) y un tipo de agregados con una sola granulometría fueron utilizados para desarrollar este modelo.

$$|E^*| = 3 \left(\frac{100 - VMA}{100} \right) \left[\frac{\left(90 + 1,45 \left(\frac{|G_b^*|}{VMA} \right)^{0.66} \right)}{1100 + \left(0,13 \left(\frac{|G_b^*|}{VMA} \right)^{0.66} \right)} \right] |G_b^*|_g \quad (5)$$

Donde:

- $|E^*|$ = módulo dinámico, Pa;
- $|G_b^*|$ = módulo de corte dinámico del bitumen, Pa;
- $|G_b^*|_g$ = módulo de corte dinámico del bitumen en estado vítreo, Pa;
- VMA= vacíos en el agregado mineral, %;

MATERIALES UTILIZADOS Y CONDICIONES DEL ENSAYO EN LABORATORIO

Este trabajo, incluye la caracterización de cinco mezclas asfálticas en caliente utilizadas en Chile: 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, 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 de cada mezcla utilizada y la Tabla 2 las granulometrías de las mismas.

En el contexto del presente estudio, el ensayo de módulo dinámico se realizó siguiendo las recomendaciones de la norma AASHTO T 62-03 “Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures”. La norma, considera determinar el módulo dinámico aplicando un

esfuerzo de compresión uniaxial del tipo “haversine” (la mitad de uno menos el coseno, $\text{hav}(x) = \frac{1}{2}(1-\cos(x))$), sobre probetas extraídas de mezclas compactadas en compactador giratorio, de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura. Los ensayos se realizaron a cinco temperaturas (-10, 4, 21, 37 y 54°C) y seis frecuencias (0,1; 0,5; 1,0; 5; 10 y 25 Hz).

Tabla 1: Tipo y contenido de asfalto de cada mezcla

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

Tabla 2: Granulometría de las mezclas asfálticas

TAMIZ		MEZCLA			TAMIZ		SMA (ambas) % que pasa
		IV-A-12-C	IV-A-12-M	M-10			
mm	ASTM	% que pasa	% que pasa	% que pasa	mm	ASTM	% que pasa
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 POR MEDIO DE CURVAS MAESTRAS E ISÓCRONAS

Curvas maestras

Una curva maestra representa la respuesta de una mezcla asfáltica a una temperatura de referencia seleccionada (en este caso, $T_r = 21^\circ\text{C}$), sobre un amplio rango de frecuencias. Para construir una curva maestra, se utiliza el principio de superposición tiempo-temperatura, el cual describe el comportamiento viscoelástico de bitúmenes y mezclas asfálticas. Dado que se utilizaron cinco temperaturas para determinar $|E^*|$ en laboratorio, al aplicar el principio de superposición, los datos obtenidos a temperaturas inferiores a T_r (-10 y 4°C) se desplazaron horizontalmente hacia la derecha y aquellos correspondientes a temperaturas mayores a T_r (37 y 54°C), se desplazaron horizontalmente hacia la izquierda, hasta formar una curva suave como las

mostradas en la Figura 1. Para cada mezcla, la curva maestra se construyó ajustando una función sigmoïdal, por medio de una optimización no lineal de mínimos cuadrados.

Como muestra la Figura 1, para todo el rango de frecuencias, las mezclas SMA-P y SMA-F, presentan los mayores niveles de IE^*I con ambas alcanzando prácticamente los mismos valores. Las otras tres mezclas, muestran niveles similares de módulo entre ellas en el rango de frecuencias bajas (entre 0,0001 y 1 Hz), pero diferenciándose claramente de las mezclas SMA. En el resto del rango de frecuencias, las cinco mezclas tienden a valores de módulos de un orden de magnitud similar. A la frecuencia de 0,0001 Hz, la mezcla SMA-P es la que alcanza el mayor módulo (186 MPa) y la IV-A-12-C el menor (77 MPa). En cambio, a 10.000 Hz, la mezcla SMA-P es la que alcanza el mayor IE^*I (21.622 MPa) y la M10 el menor (15.094 MPa).

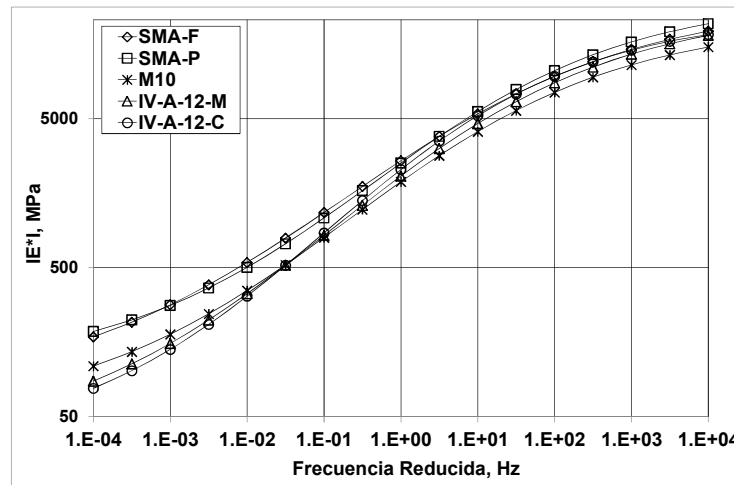


Figura 1: Curvas maestras de las MAC estudiadas (T_r = 21°C)

Curvas isócronas

En la interpretación de los resultados de ensayos viscoelásticos, en términos del potencial desempeño del pavimento, la representación por medio de curvas isócronas es más recomendable que el uso de curvas maestras. Una curva isócrona, es simplemente un gráfico de alguna función viscoelástica, tal como el módulo dinámico, como función de la temperatura pero a una frecuencia constante. Para la construcción de las isócronas, se utiliza la misma información que se requiere para las curvas maestras, sólo que en la función sigmoïdal se fija la frecuencia.

Se seleccionó una frecuencia de 10 Hz para construir las isócronas, por cuanto este valor representa condiciones predominantes de los pavimentos de carreteras. Por otra parte, el rango de temperaturas se extendió entre los -10 a los 50°C. En la Figura 2 a) y b), se muestran las isócronas para cada una de las mezclas en un plano aritmético y semi-logarítmico, respectivamente. El fundamento, es que en el plano aritmético se puede apreciar mejor el comportamiento a bajas temperaturas, mientras que en el semi-logarítmico, el de altas temperaturas.

En la Figura 2 a), se puede apreciar que para -10°C, las mezclas se ordenan de mayor a menor módulo como sigue: SMA-P (27.864 MPa), SMA-F (25.527 MPa), IV-A-12-M (23.857 MPa),

IV-A-12-C (22.678 MPa) y M-10 (19.521 MPa). En cambio, en la Figura 2 b), se ve que para 50°C, el orden es: SMA-F (652 MPa), SMA-P (558 MPa), M-10 (427 MPa), IV-A-12-M (382 MPa) y IV-A-12-C (369 MPa).

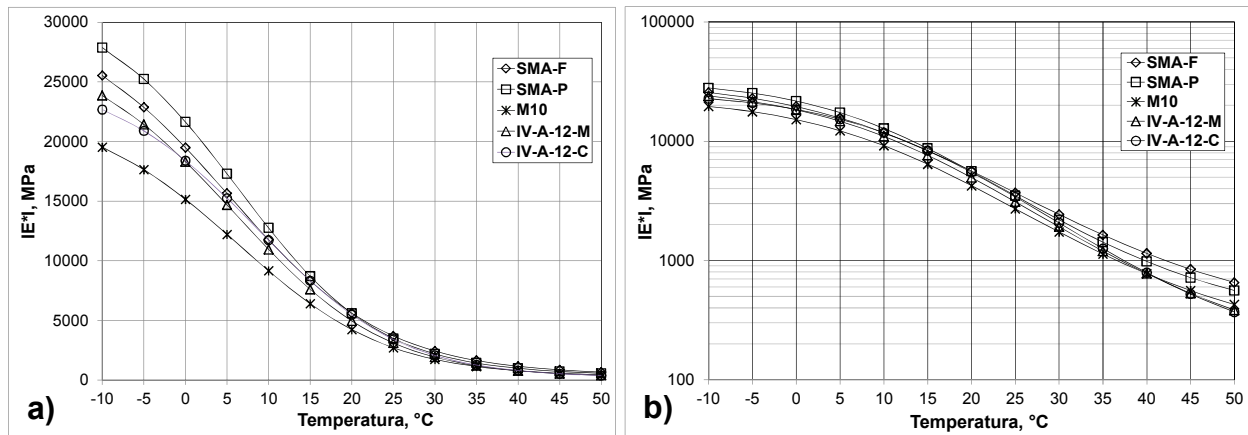


Figura 2: Curvas isócronas de las MAC estudiadas (Frecuencia = 10 Hz): a) en escala aritmética, b) en escala semi-logarítmica

EVALUACIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS

La evaluación de los modelos predictivos, se llevó a cabo comparando los IE^*I medidos en laboratorio con respecto a los IE^*I estimados con los modelos, en el rango de frecuencias de 0,0001 a 10.000 Hz, a 21°C y considerando todas las mezclas del estudio en conjunto.

La Figura 3 muestra los resultados de las evaluaciones de cada modelo. En cada gráfico de la Figura 3, se ha determinado una regresión lineal con intercepto igual a cero. La pendiente de la regresión representa el sesgo de la estimación. Por otra parte, el valor del coeficiente de correlación (R^2) representa la precisión de la predicción. Un modelo que sea absolutamente preciso tendrá un valor de R^2 igual a 1 y uno que no tenga sesgo, tendrá una pendiente igual a 1. Notar que la aplicación de lo anterior, permite calibrar las predicciones de IE^*I en términos del sesgo, de acuerdo a las condiciones locales. La pendiente de la ecuación de regresión representa el “factor de calibración”, F_c , (en estricto rigor, el inverso de la pendiente). Así, al multiplicar cada valor de IE^*I estimado por el factor de calibración, se obtendrá una predicción sin sesgo. Por lo tanto, el modelo mejor evaluado, debería ser aquel que mostrara el mayor R^2 , siendo el sesgo un factor secundario de evaluación, por cuanto éste, eventualmente puede eliminarse con la aplicación del factor de calibración.

De acuerdo a lo expuesto, se puede afirmar que el modelo Hirsch presentó el mejor resultado, al obtener el mayor R^2 (0,96), le siguió el modelo Witczak Modificado ($R^2 = 0,84$), luego el Witczak Original ($R^2 = 0,57$) y finalmente, el modelo Al-Khateeb ($R^2 = 0,39$). Ambos modelos Witczaks tienden a sobrestimar el valor de IE^*I , mientras que los modelos Hirsch y Al-Khateeb a subestimarlos. Consecuentemente, se selecciona el modelo Hirsch como el más promisorio. Ya que la pendiente de la ecuación de regresión de la Figura 3 c) es 0,5032, el inverso de ese valor será 1,99. Por lo tanto, se propone un factor de calibración $F_c = 2$, para las condiciones y mezclas incluidas en este estudio, al aplicar el modelo Hirsch. Esto quiere decir, que al multiplicar por F_c

el lado derecho de la igualdad en ecuación 3, se obtendrían estimaciones sin sesgo, manteniéndose el mismo coeficiente de correlación mostrado en Figura 3 c).

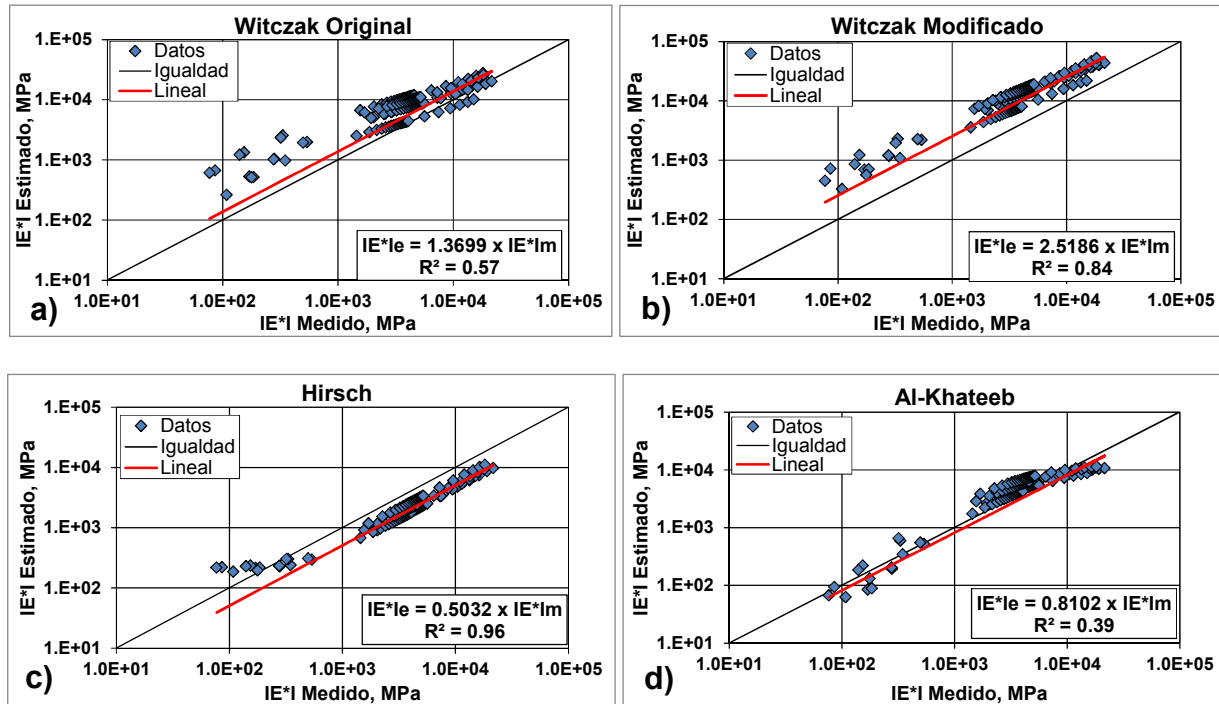


Figura 3: IE^*I medido vs. IE^*I estimado con los modelos: a) Witczak Original, b) Witczak Modificado, c) Hirsch y d) Al-Khateeb

Notar en la Figura 3, que para todos los modelos, en el rango de IE^*I medidos entre 80 y 550 MPa, se observa una menor exactitud en los resultados, siguiendo una tendencia algo distinta al resto. Analizando los datos de los ensayos de laboratorio, se pudo determinar que aquellos realizados a la temperatura de 54°C , presentaron una variabilidad mucho mayor que en el resto de ellas y, por lo tanto, deben tomarse con cautela.

CONCLUSIONES

Se han caracterizado cinco mezclas asfálticas utilizadas en Chile. Para cada una de ellas, se desarrollaron sus curvas maestras e isócronas, lo que permite conocer el valor de IE^*I para un amplio rango de frecuencias (0,0001 y 10.000 Hz) y temperaturas (-10 y 50°C). Con esta información, es posible aplicar un método empírico-mecanicista de diseño de pavimentos. No obstante lo anterior, se debe ser cauteloso al emplear e interpretar los resultados de IE^*I a altas temperaturas, pues mostraron una mucha mayor variabilidad que en el resto del rango. Por otra parte, se evaluaron cuatro modelos predictivos para estimar IE^*I de manera rápida, económica confiable y con la mínima información disponible que pueda ser obtenida de ensayos rutinarios. El modelo Hirsch presentó el mejor resultado ($R^2 = 0,96$), le siguió el modelo Witczak Modificado ($R^2 = 0,84$), luego el Witczak Original ($R^2 = 0,57$) y finalmente, el modelo Al-Khateeb ($R^2 = 0,39$). Ambos modelos Witczaks tienden a sobrestimar el valor de IE^*I , mientras que los modelos Hirsch y Al-Khateeb a subestimarlos. Se seleccionó el modelo Hirsch como el

más promisorio, pero para obtener estimaciones sin sesgo con este modelo, se propuso un factor de calibración $F_c = 2$, para las condiciones y mezclas incluidas en este estudio. Finalmente, en el contexto de las mezclas utilizadas en este estudio, se puede establecer como conclusión general, que el modelo Hirsch modificado con el factor de calibración propuesto, es adecuado para generar estimaciones razonables y suficientemente exactas de IE^*I , para ser usadas en el diseño empírico-mecanicista de pavimentos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se basa en los resultados del proyecto FONDEF D09/1174, 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

- Al-Khateeb, G., Shenoy, A., Gibson, N., Harman, T. (2006). A new simplistic model for dynamic modulus predictions of asphalt paving mixtures. [CD-ROM]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75.
- Birgisson, B., Sholar, G., and Roque, R. (2005). Evaluation of Predicted Dynamic Modulus for Florida Mixtures. 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Paper No. 05-1309, Washington D.C.
- Ceylan, H., Gopalakrishnan, K, Kim, S. (2009). Looking to the future: the next-generation hot mix asphalt dynamic modulus prediction models. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 10, No 5, pp. 341-352.
- Dongré, R., Myers, L., D'Angelo, J., Paugh, C., and Gudimettla, J. (2005). Field Evaluation of Witczak and Hirsch Models for Predicting Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 74.
- García, G. (2009). Evaluación de los modelos Witczak, Nuevo Witczak y Hirsh para predecir módulos dinámicos de mezclas asfálticas en caliente. Anales del XV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Lisboa, Vol. 2, pp. 833-842.
- Martínez, F., Angelone, S., Giovanon, O. (2009). Un modelo de estimación del módulo dinámico de mezclas asfálticas utilizando redes neuronales. Anales del XV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Lisboa, Vol. 2, pp. 883-892.
- Shen, S., Yu, H., Willoughby, K.A, DeVol, J.R., Uhlmeyer, J. (2013). Local practice of assessing Dynamic Modulus Properties for Washington mixtures. 92th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Paper N° 13-4181, Washington D.C.