

VALIDACION DE UN MODELO MICROMECHANICO DE ESTIMACION DEL MODULO DINAMICO DE MEZCLAS ASFALTICAS

Dr. Ing. Silvia Angelone

Laboratorio Vial – Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras I.M.A.E
Fac. de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad de Rosario
Riobamba y Berutti - (2000) – Rosario – Argentina
Teléfono 0341-4808538 Interno 136 - Fax: 0341-04808540
Correo Electrónico: sangelon@fceia.unr.edu.ar

MSc. Ing. Marina Cauhapé Casaux

Laboratorio Vial – Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras I.M.A.E
Fac. de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad de Rosario
Riobamba y Berutti - (2000) – Rosario – Argentina
Teléfono 0341-4808538 Interno 136 - Fax: 0341-04808540
Correo Electrónico: marina_cc02@yahoo.com.ar

Dr. Ing. Fernando Martínez

Laboratorio Vial – Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras I.M.A.E
Fac. de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad de Rosario
Riobamba y Berutti - (2000) – Rosario – Argentina
Teléfono 0341-4808538 Interno 136 - Fax: 0341-04808540
Correo Electrónico: fermar@fceia.unr.edu.ar

Resumen

La modelación micromecánica es empleada para la determinación de las propiedades efectivas de un material heterogéneo como son las mezclas asfálticas, considerando las propiedades inherentes a los distintos componentes individuales (ligante asfáltico, agregados, vacíos), sus concentraciones volumétricas y sus formas geométricas. En una etapa anterior de investigación se ha desarrollado un modelo racional de estimación del módulo dinámico $|E^*|$ de las mezclas asfálticas introduciendo los conceptos de la micromecánica mediante un modelo esférico de relativa sencillez y fundamentado en un esquema conceptual válido de la Mecánica Aplicada. En esa oportunidad, el modelo desarrollado fue ajustado utilizando la información contenida en una base de datos que recopila ordenadamente más de 1000 resultados de módulos dinámicos, características de los ligantes y propiedades granulométricas y volumétricas de mezclas asfálticas típicas usadas en Argentina.

A los efectos de validar y valorar la capacidad predictiva del modelo esférico desarrollado, éste ha sido aplicado a los resultados de otra base de datos compilada con la misma información que la precedente pero elaborada usando otros tipos de mezclas, ligantes y técnica experimental de determinación del módulo dinámico.

Este trabajo presenta, luego de una breve descripción del modelo desarrollado, la validación del mismo mediante una comparación de los módulos dinámicos $|E^*|$ experimentalmente medidos y los estimados mediante este modelo y la valoración de la capacidad predictiva mediante criterios estadísticos.

1. INTRODUCCION

En la actualidad, el diseño estructural de los pavimentos flexibles tiende a aplicar principios racionales en los que los materiales son caracterizados mediante propiedades mecánicas fundamentales a ser aplicadas en modelos analíticos que permitan calcular tensiones, deformaciones y desplazamientos. En el caso de las mezclas asfálticas, la propiedad fundamental considerada como dato de entrada de estos modelos estructurales es el Módulo Dinámico $|E^*|$. Si bien los modelos de cálculo se han visto favorecidos por el avance de la computación que ofrece cada vez mayores prestaciones a más bajo costo, no ha ocurrido lo mismo con las técnicas de caracterización de materiales para determinar en laboratorio esta propiedad mecánica fundamental ya que se requieren equipamientos sofisticados de alto costo y personal altamente capacitado para operarlos.

Con el objeto de disponer de valores suficientemente confiables del módulo dinámico $|E^*|$ para ser introducidos en esos métodos de diseño se han propuesto distintas ecuaciones y modelos de predicción del módulo dinámico $|E^*|$ usando la composición en volumen, granulometría y propiedades individuales de los componentes de la mezcla asfáltica como factores de predicción. Estos modelos de predicción de carácter empírico presentan el inconveniente de que la ley o relación funcional que vincula esos factores de predicción con la respuesta de los mismos es propuesta "a priori". Una metodología diferente considera el desarrollo de un modelo fundamental de estimación del módulo dinámico de las mezclas asfálticas de base racional sustentado por los principios de la micromecánica.

Un modelo de ese tipo se ha desarrollado en una etapa previa de investigación ^[1] sobre la base de cuatro premisas básicas: que el modelo sea de relativa sencillez conceptual, que se asiente sobre un esquema teórico válido en el marco de la Mecánica Aplicada, que la aparente contradicción entre la sencillez del modelo y la complejidad del comportamiento de

las mezclas asfálticas requiera un número limitado de factores calibración y que la información experimental con que debe alimentarse el modelo para obtener la estimación buscada resulte de ensayos convencionales (granulometría de agregados, consistencia del ligante, composición volumétrica, etc.).

El objetivo de este trabajo es aplicar ese modelo a los resultados contenidos en una base de datos compilada con la información de distintos tipos de mezclas, ligantes, composiciones granulométricas y técnicas experimentales de determinación del módulo dinámico a los efectos de validar y valorar la capacidad predictiva del mismo. Luego de una breve descripción del modelo desarrollado, este trabajo presenta la validación del mismo mediante una comparación de los módulos dinámicos $|E^*|$ experimentalmente medidos y los estimados mediante el modelo y la valoración de la capacidad predictiva mediante criterios estadísticos.

2. MODELOS MICROMECHANICOS APLICADOS A MEZCLAS ASFALTICAS

La modelación micromecánica es empleada para la determinación de las propiedades efectivas de un material heterogéneo a partir de las propiedades inherentes a los distintos componentes, sus concentraciones volumétricas y sus formas geométricas. Numerosos modelos analíticos han sido desarrollados a partir del trabajo fundamental de Eshelby^[2] que han sido usados para investigar un amplio rango de materiales compuestos.

La modelación micromecánica es una metodología actualmente vigente para investigar las propiedades de másticos y mezclas asfálticas variando de formulaciones muy simples a expresiones analíticas más complicadas, métodos numéricos o simulaciones computacionales.

Si bien las mezclas asfálticas tienen un comportamiento marcadamente viscoelástico, una simplificación comúnmente adoptada es considerar las propiedades del ligante asfáltico a una dada temperatura y frecuencia de sollicitación como elásticas al igual que para los agregados y aplicar estas propiedades en los modelos de manera de estimar las propiedades del compuesto a esa misma frecuencia y temperatura^[3, 4, 5, 6].

Las expresiones más simples de estimación han sido desarrolladas a partir de la Ley de Mezclas. De una manera más compleja, el Esquema Auto-Consistente Generalizado^[7, 8, 9] proporciona una única solución para el material compuesto considerado como una esfera única embebida en un medio homogéneo infinito con una propiedad efectiva desconocida. Otros investigadores han desarrollado un modelo formado por una combinación de múltiples fases en serie y paralelo respetando principios micromecánicos pero introduciendo factores empíricos de ajuste. Finalmente, diversos autores^[4, 5, 10, 11] han desarrollado soluciones analíticas en 2 dimensiones aplicando modelos de 3 y 4 capas adoptando distintas hipótesis de estado plano de tensiones, de deformaciones o axisimetría.

3. EL MODELO ESFERICO DESARROLLADO

El modelo que ha desarrollado es de tipo tridimensional como una extensión de los modelos analíticos en 2 dimensiones en el que cada agregado es considerado como una esfera recubierta por una película de espesor constante del mástico asfáltico y embebida en un medio esférico equivalente y homogéneo de tamaño finito de mezcla asfáltica cuyas propiedades efectivas son desconocidas como se muestra en corte en la Figura 1.

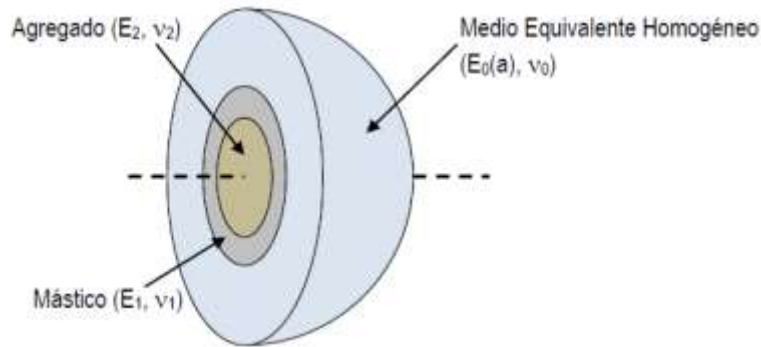


Figura 1: Modelo esférico propuesto

3.1 Desarrollo teórico del modelo propuesto

Usando el concepto de medio equivalente introducido por Eshelby ^[1] la capa más exterior puede ser considerada como un medio equivalente a la mezcla combinada de las dos otras capas interiores (agregado y mástico) y donde las propiedades de esa capa más externa son entonces aquellas de la mezcla asfáltica de tal manera que la misma que es micromecánicamente inhomogénea, puede ser tratada como un material compuesto macromecánicamente homogéneo ^[4, 5, 12, 13].

La Figura 2 presenta las características geométricas y mecánicas de los componentes del modelo donde:

- a : radio de un agregado pétreo
- (b-a) : espesor de la película de mástico que lo rodea
- (c-b) : espesor del medio equivalente en el que están embebidos.
- $E_0(a), \nu_0$: módulo elástico y relación de Poisson del medio equivalente
- E_1, ν_1 : módulo elástico y relación de Poisson del mástico
- E_2, ν_2 : módulo elástico y relación de Poisson del agregado pétreo
- p : presión radial uniformemente distribuida sobre la superficie exterior de radio c
- p_1 : tensión radial uniformemente distribuida en la interface de radio b
- p_2 : tensión radial uniformemente distribuida en la interface de radio a

El medio equivalente, el mástico y el agregado son considerados materiales isótropos y linealmente elásticos.

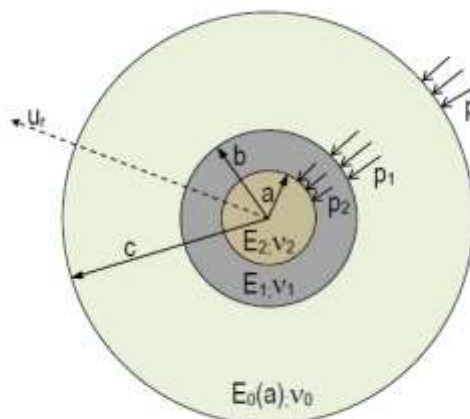


Figura 2: Detalle de componentes del modelo

Para las capas de agregado, mástico y medio equivalente perfectamente adheridas entre ellas es posible obtener analíticamente los desplazamientos radiales u_{0c} en la superficie límite de radio $r = c$, u_{0b} y u_{1b} en la superficie límite de radio $r = b$, y u_{1a} y u_{2a} en la superficie de radio $r = a$.

De acuerdo a esta notación el primer subíndice "0", "1" y "2" representa diferentes dominios (medio equivalente, mástico y agregado respectivamente) y el segundo subíndice "a" "b" y "c" representa diferentes límites como se presenta en la Figura 3.

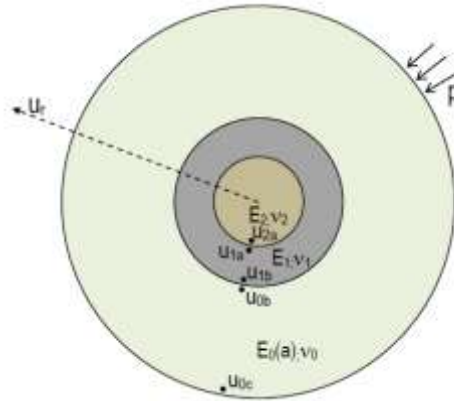


Figura 3: Homogeneización por compatibilidad de desplazamientos

Aplicando la teoría de la elasticidad, los desplazamientos pueden ser calculados como ^[14]:

$$u_{0c} = \frac{1}{E_0(a)} \left[\frac{(1+v_0)b^3c(p-p_1)}{2(c^3-b^3)} + (1-2v_0) \frac{pc^3-p_1b^3}{(c^3-b^3)} c \right] \quad (1)$$

$$u_{0b} = \frac{1}{E_0(a)} \left[\frac{(1+v_0)c^3b(p-p_1)}{2(c^3-b^3)} + (1-2v_0) \frac{pc^3-p_1b^3}{(c^3-b^3)} b \right] \quad (2)$$

$$u_{1b} = \frac{1}{E_1} \left[\frac{(1+v_1)a^3b(p_1-p_2)}{2(b^3-a^3)} + (1-2v_1) \frac{p_1b^3-p_2a^3}{(b^3-a^3)} b \right] \quad (3)$$

$$u_{1a} = \frac{1}{E_1} \left[\frac{(1+v_1)b^3a(p_1-p_2)}{2(b^3-a^3)} + (1-2v_1) \frac{p_1b^3-p_2a^3}{(b^3-a^3)} a \right] \quad (4)$$

$$u_{2a} = \frac{(1-2v_2)}{E_2} p_2 \cdot a \quad (5)$$

Como la totalidad de la mezcla asfáltica equivalente puede ser tratada como un medio macroscópicamente homogéneo, el desplazamiento en la superficie límite $r = c$ también puede ser expresada como:

$$u_c = \frac{(1-2\nu_0)}{E_0(a)} p \cdot c \quad (6)$$

Entonces, por continuidad de los desplazamientos resulta:

$$\begin{aligned} u_c &= u_{0c} \\ u_{0b} &= u_{1b} \\ u_{1a} &= u_{2a} \end{aligned} \quad (7)$$

Resolviendo simultáneamente las ecuaciones (1) a (7) y mediante un laborioso trabajo matemático es posible llegar a:

$$E_0(a) = \left\{ \frac{(1-2\nu_0)b}{C \cdot a^2 \cdot (1-J) + D(b^4 - J \cdot a^3 b)} \right\} \cdot E_1 \quad (8)$$

con:

$$C = \frac{(1+\nu_1)ab}{2(b^3 - a^3)} \quad (9)$$

$$D = \frac{(1-2\nu_1)}{(b^3 - a^3)} \quad (10)$$

$$J = \frac{Cb^2 + Db^3a}{E_1/E_2 \cdot F + Cb^2 + Da^4} \quad (11)$$

$$F = (1-2\nu_2)a \quad (12)$$

Conocidas las propiedades elásticas del agregado y el mástico, la dimensión del agregado y el espesor del mástico, el módulo elástico de la mezcla asfáltica como medio equivalente $E_0(a)$ puede ser calculado con la ecuación (8).

3.2 Consideraciones para una mezcla asfáltica real

Para su aplicación al caso real de una mezcla asfáltica compuesta con agregados de una dada distribución granulométrica, contenido volumétrico de ligante y vacíos es necesario realizar una serie de consideraciones como se describe a continuación.

3.2.1 Consideraciones sobre la granulometría

En primera instancia se ha considerado que las partículas de tamaño menor a 0.075 mm (pasante #200) forman con el ligante el mástico asfáltico y que los agregados pétreos son perfectamente esféricos.

La curva granulométrica real se ha discretizado en 17 grupos con una dimensión única correspondiente a su diámetro medio. La ecuación (8) permite la estimación del módulo elástico $E_0(a)$ para una dada dimensión del agregado por lo que la integración para cada

grupo discretizado resulta del aporte proporcional de cada categoría dimensional del agregado pétreo de acuerdo a su concentración en volumen de la forma:

$$E_0(a) = \sum_{i=1}^{17} (E_0(a_i) \cdot v_i) \quad (13)$$

donde:

$E_0(a_i)$: módulo elástico del medio equivalente para el agregado de radio a_i

v_i : porcentaje en volumen de agregados de tamaño a_i

3.2.2 Consideraciones sobre el módulo elástico del mástico

El mástico asfáltico se ha considerado compuesto por el ligante asfáltico y la totalidad de las partículas minerales de tamaño menor a 0.075 mm (filler) por lo que la concentración en volumen de filler respecto al mástico resulta:

$$\phi_f = \frac{V_f}{V_f + V_b} \quad (14)$$

con:

V_f : volumen de agregados de tamaño menor a 0.075 mm (volumen de filler)

V_b : volumen de ligante asfáltico

Se ha adoptado que las propiedades de los materiales asfálticos a una temperatura y una frecuencia son de carácter elástico de tal manera que el stiffness de asfalto S_{bit} es equivalente a su módulo elástico E_{bit} para esas condiciones de sollicitación ^[15]. Para esta estimación se ha utilizado un modelo micromecánico simplificado habiéndose adoptado para la relación de Poisson del ligante $\nu_{bit} = 0.45$ y para el mástico $\nu_1 = 0.40$ resultando entonces:

$$E_1 = \left(\frac{G_c}{G_m} \right) \cdot S_{bit} \cdot \frac{(1 + \nu_1)}{(1 + \nu_{bit})} \quad (15)$$

con:

G_c : módulo de corte del mástico

G_m : módulo de corte del ligante.

3.2.3 Consideraciones sobre el espesor del mástico asfáltico

El espesor promedio de la película de mástico asfáltico ha sido estimado a partir del contenido de asfalto y del porcentaje y superficie específica del conjunto de agregados asumiendo simplificada que cada partícula del agregado de tamaño mayor a 0.075 mm está cubierta por una película esférica de mástico asfáltico de espesor constante. Este espesor es calculado con el contenido volumétrico de mástico y la distribución discretizada de la granulometría de los agregados de tal manera que el volumen total que recubre los agregados es igual al volumen de mástico disponible.

3.2.4 Consideraciones sobre las propiedades elásticas del agregado pétreo

Con un criterio simplificativo se ha adoptado un valor único de $E_2 = 50000$ MPa.

3.2.5 Consideraciones sobre los vacíos de la mezcla asfáltica

Se ha considerado que los vacíos son burbujas esféricas embebidas en un material compuesto sin vacíos. Entonces se ha aplicado un proceso de cálculo en dos pasos: en el primero, se estima el módulo efectivo del medio equivalente mediante las ecuaciones (8) a (13); en el segundo, se asume a ese medio equivalente envolviendo a las burbujas de aire para obtener un nuevo módulo elástico de un material compuesto conformado por la mezcla asfáltica y sus vacíos como se muestra en el Figura 4.

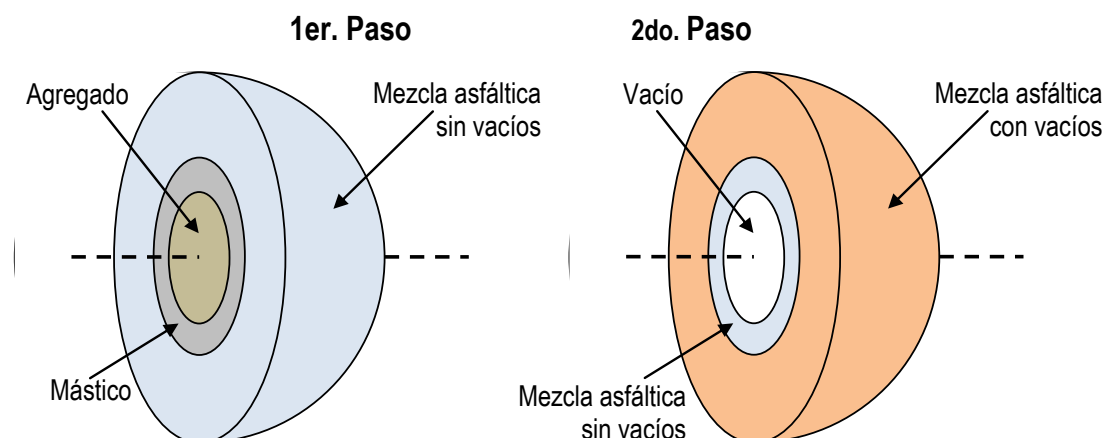


Figura 4: Consideración de los vacíos de la mezcla

Asumiendo que el módulo elástico de los vacíos es nulo, las ecuaciones (8) a (10) se modifican como:

$$E_0 = \left\{ \frac{(1-2\nu_0)b_1}{C_1 \cdot a_1^2 + D_1 \cdot b_1^4} \right\} \cdot E_0(a) \quad (16)$$

$$C_1 = \frac{(1+\nu_0)a_1b_1}{2(b_1^3 - a_1^3)} \quad (17)$$

$$D_1 = \frac{(1-2\nu_0)}{(b_1^3 - a_1^3)} \quad (18)$$

con:

a_1 : radio del vacío esférico de aire

b_1 : radio del vacío esférico de aire recubierto de la mezcla asfáltica sin vacíos

$E_0(a)$: módulo elástico de la mezcla asfáltica sin vacíos

E_0 : módulo elástico de la mezcla asfáltica con vacíos.

Para poder aplicar estas ecuaciones se necesita conocer el diámetro de los poros de aire b_1 . Se ha definido un tamaño medio D_m de los poros de cada mezcla como el diámetro del poro que permitiría pasar el 50% de los vacíos existentes. Castelblanco ^[16] ha mostrado que los vacíos de aire tienen una distribución de tamaños aleatoria variando entre una dimensión mínima y una máxima que puede ser descripta mediante una función probabilística de Weibull observándose que existe una correlación entre el diámetro medio de los poros D_m y el contenido total de vacíos V_a como se presenta en el Figura 5.

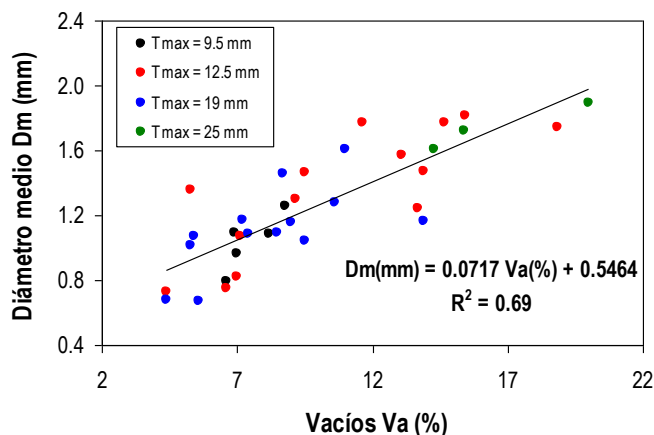


Figura 5: Relación entre el contenido total y el diámetro medio de los vacíos

Esta relación resulta:

$$Dm = 0.0717 \cdot Va(\%) + 0.5464 \quad (19)$$

donde:

Dm : diámetro medio de los poros de aire (mm) ($Dm = 2 \cdot a_1$)

Va : contenido total de vacíos (%).

Tanto para la mezcla asfáltica sin vacíos como con vacíos, se ha adoptado simplifcadamente un valor de la relación de Poisson $\nu_0 = 0.45$. Dado que el volumen de los vacíos más los de la mezcla asfáltica sin vacíos debe totalizar el 100% y se ha asumido que todos los vacíos tiene un tamaño uniforme igual a Dm, el espesor necesario de la capa esférica de mezcla asfáltica sin vacíos $t_1 = b_1 - a_1$ resulta:

$$t_1 = \frac{a_1}{\sqrt[3]{\left(\frac{Va}{100}\right)}} - a_1 \quad (20)$$

4. MATERIALES EMPLEADOS

A los efectos de valorar la capacidad predictiva del modelo desarrollado y la calidad de las estimaciones que produce se ha recurrido a utilizar los resultados incluidos en una base de datos compilada por Witczak y Mirza^[17] en la Universidad de Maryland. Esta base de datos ha sido adoptada por cuanto recopila datos de 35 mezclas asfálticas de muy diferentes características elaboradas con asfaltos convencionales y modificados. Estas mezclas fueron ensayadas de manera de determinar sus propiedades volumétricas, granulométricas y características de los ligantes así como el módulo dinámico $|E^*|$ en compresión uniaxial a distintas frecuencias y temperaturas totalizando 1850 conjuntos de datos. La Tabla 1 resume las principales características incluidas en la base de datos así como el rango de variación de las mismas respecto a sus valores máximos y mínimos.

5. VALIDACION DEL MODELO ESFERICO DESARROLLADO

Mediante un procedimiento secuencial que refleja el desarrollo analítico del modelo se ha estimado el módulo dinámico de una manera sistemática para todas las mezclas asfálticas

incluidas en la base de datos. La Figura 6 muestra la comparación de los resultados estimados mediante el modelo desarrollado y los medidos experimentalmente para las 35 mezclas incluidas en la base de datos (1850 puntos de comparación) en un espacio bi-logarítmico.

Tabla 1: Variación de las características de las mezclas consideradas

	Características	Máximo	Mínimo
Parámetros de las mezclas	Vacios (%)	11.3	2.3
	% Asfalto	6.3	3.6
Ligante	T _{a&b} (°C)	70.0	50.0
	Pen ₂₅ (1/10 mm)	79.6	26.9
Granulometría (% que pasa)	#3/4	99.9	78.0
	#3/8	88.3	55.0
	#4	60.1	27.0
	#8	37.0	17.0
	#40	12.9	9.5
	#200	7.1	4.0
Condiciones Experimentales	Temperatura (°C)	54.4	-17.8
	Frecuencia (Hz)	25.0	0.1
	E* (MPa)	42800	50

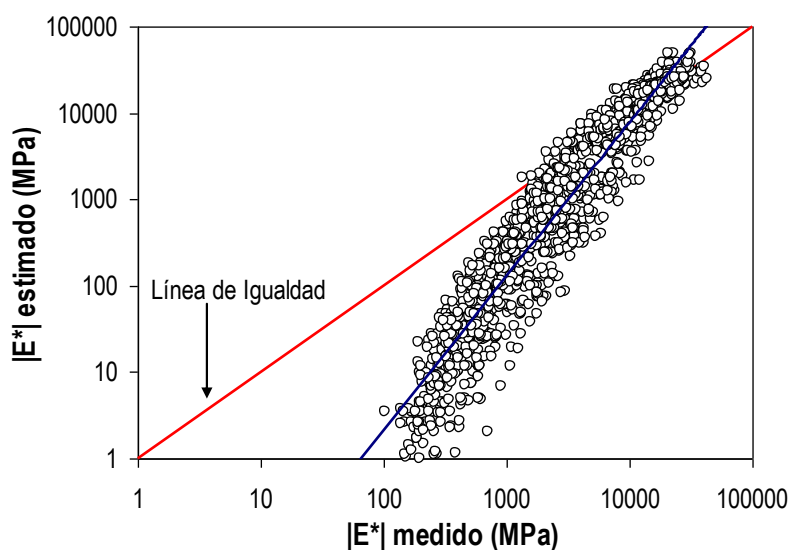


Figura 6: Comparación de valores medidos y estimados por el modelo

Para evaluar la calidad de la estimación resultante del modelo esférico desarrollado se ha utilizado un criterio estadístico de “buen ajuste” propuesto por Witczak y otros ^[18] y mostrado en la Tabla 2. Las estadísticas incluyen la relación entre el error típico de la estimación de los valores y la desviación estándar de valores medidos (S_e/S_y) y el coeficiente de correlación, R^2 .

La Tabla 3 presenta la evaluación de estos modelos de estimación de acuerdo con ese criterio subjetivo propuesto y para los resultados expresados en espacios aritmético y logarítmico.

Según el criterio de “buen ajuste”, la calidad de las estimaciones producidas por el modelo varían de Bueno a Excelente en los espacios aritméticos o logarítmicos.

Tabla 2: Criterio estadístico subjetivo de “buen ajuste”

Criterio	R ²	Se/Sy
Excelente	≥ 0.90	≤ 0.35
Bueno	0.70 – 0.89	0.36 – 0.55
Adecuado	0.40 – 0.69	0.56 – 0.75
Pobre	0.20 – 0.39	0.76 – 0.89
Muy Pobre	≤ 0.19	≥ 0.90

Tabla 3: Evaluación de las estimaciones del modelo desarrollado

Espacio	R ²	Se	Sy	Se/Sy	Evaluación
Aritmético	87.9 %	3321.5	8384.0	0.396	Bueno/Bueno
Logarítmico	92.4 %	0.338	0.660	0.512	Excelente/Bueno

La evaluación visual y cualitativa muestra que los puntos de comparación se sitúan apretadamente a lo largo de una línea recta indicando que el modelo es capaz de producir estimaciones razonables. Sin embargo esta distribución de puntos difiere notablemente de la línea de igualdad resultando que el modelo desarrollado es adecuado para aquellos valores más altos del módulo dinámico y tiende a subvalorar aquellos más bajos.

Los valores elevados del módulo dinámico corresponden a temperaturas bajas o altas frecuencias donde el mástico asfáltico presenta elevada rigidez inmovilizando a las partículas del agregado pétreo y siendo en consecuencia éste, el mayor responsable de la respuesta mecánica.

Por el contrario, los bajos valores del módulo elástico corresponden a las altas temperaturas o las bajas frecuencias de sollicitación donde la menor rigidez del asfalto permite el desarrollo del aporte friccional por trabazón de los granos minerales como mayor responsable de la respuesta mecánica de la mezcla asfáltica en esas condiciones. Dado que el modelo desarrollado no toma en cuenta este aporte friccional con las partículas minerales rodeadas del mástico asfáltico sin contacto entre ellas, este comportamiento observado resulta en consecuencia lógico.

Por ello y de acuerdo con las hipótesis planteadas para el desarrollo del modelo de estimación, se ha introducido un factor de ajuste o calibración de naturaleza empírica que salva la aparente contradicción entre la sencillez del modelo y la complejidad del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas.

6. INTRODUCCION DE UN FACTOR DE AJUSTE EMPIRICO

Las mayores discrepancias entre valores medidos y estimados resultan en el rango de los bajos valores de módulo dinámico habiéndose atribuido estas diferencias a la incapacidad del modelo de capturar el aporte friccional de los agregados pétreos. Los bajos valores de módulo dinámico resultan en condiciones de temperaturas más altas o frecuencias más bajas o de una manera equivalente, para bajos valores del módulo de rigidez del ligante Sbit. Por otro lado, el desarrollo de esa resistencia friccional se verá favorecida cuanto

mayor sea la concentración de agregados pétreos y su granulometría por lo que finalmente se ha considerado introducir un factor de ajuste F_c dependiente de la rigidez del ligante asfáltico y el contenido relativo de agregados pétreos de la forma:

$$F_c = \left(k_1 \cdot \frac{V_g}{V_g + V_b} \cdot S_{bit}^{k_2} + k_3 \right) \quad (13)$$

con:

F_c : factor de ajuste

$k_1 - k_3$: coeficientes de correlación

V_g : contenido volumétrico de agregados

V_b : contenido volumétrico de ligante

Estos coeficientes k_1 a k_3 se han determinado mediante la función Solver en la hoja de cálculo Excel minimizando la suma de los errores cuadráticos de los valores experimentales y los del modelo ajustado $|E^*|$, (en espacio, bi-logarítmico).

La expresión final para la estimación del módulo dinámico $|E^*|$ resultante del modelo esférico con el factor de ajuste:

$$|E^*| = E_0 \cdot F_c = E_0 \cdot \left(7.050 \cdot \frac{V_g}{V_g + V_b} \cdot S_{bit}^{-0.659} + 0.865 \right) \quad (14)$$

donde:

E_0 : módulo dinámico de la mezcla estimado por el modelo sin factor de ajuste

$|E^*|$: módulo dinámico de la mezcla estimado por el modelo con factor de ajuste

La Figura 7 muestra la comparación entre valores medidos y estimados con el ajuste empírico propuesto en tanto que la Tabla 4 presenta la evaluación de la bondad de las estimaciones.

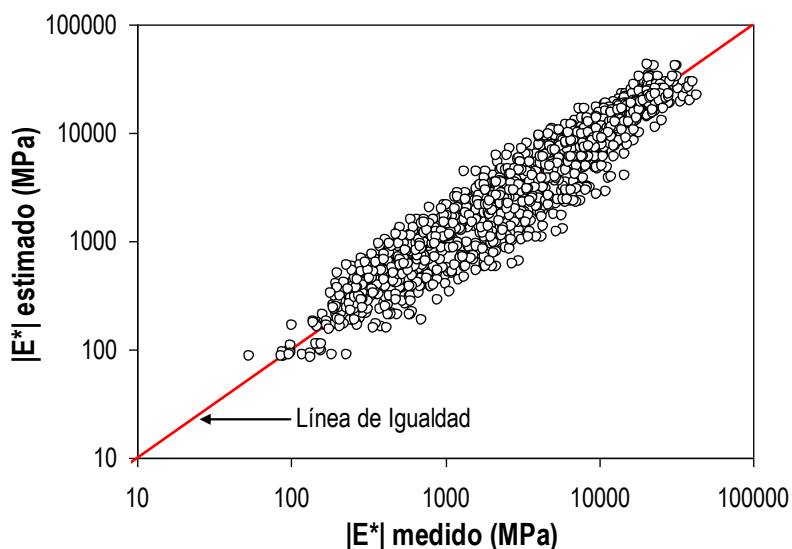


Figura 7 Comparación de módulos medidos y estimados ajustados por el modelo

Tabla 4: Evaluación de las estimaciones del modelo ajustado

Espacio	R ²	Se	Sy	Se/Sy	Evaluación
Aritmético	88.2%	2770.5	8384.1	0.330	Bueno/Excelente
Logarítmico	92.4%	0.179	0.660	0.271	Excelente/Excelente

El modelo ajustado presenta una distribución homogénea alrededor de la línea de igualdad sin sesgo apreciable. La valoración de la aptitud del modelo resulta Bueno/Excelente para el espacio aritmético y Excelente/Excelente para el espacio bi-logarítmico.

Del análisis de los resultados obtenidos, es posible concluir que el modelo desarrollado es capaz de producir estimaciones del módulo dinámico suficientemente confiables y adecuadas para las mezclas asfálticas comprendidas en la base de datos usada para el ajuste del mismo aplicando principios válidos de la micromecánica.

7. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo tridimensional como extensión de los modelos analíticos en 2 dimensiones en el que cada agregado es considerado como una esfera recubierta por una película de espesor constante del mástico asfáltico y embebida en un medio esférico equivalente y homogéneo de tamaño finito de mezcla asfáltica cuyas propiedades efectivas son desconocidas.

Este medio equivalente considera a la mezcla como una combinación de las dos otras capas interiores (agregado y mástico) y donde las propiedades de esa capa más externa son entonces aquellas de la mezcla asfáltica. Luego, la mezcla asfáltica es tratada como un material compuesto macromecánicamente homogéneo.

Para su aplicación al caso real de una mezcla asfáltica compuesta con agregados de una dada distribución granulométrica, contenido volumétrico de ligante y vacíos se han realizado una serie de consideraciones referidas a la distribución granulométrica de los agregados, el módulo elástico y espesor de la película del mástico y la influencia de los vacíos.

El modelo desarrollado ha sido aplicado sistemáticamente a todas las mezclas asfálticas incluidas en una base de datos compilada en la Universidad de Maryland comprendiendo mezclas asfálticas con ligantes convencionales y modificados con polímeros siguiendo un procedimiento secuencial e implementado en una hoja de cálculo Excel.

La comparación de valores estimados por el modelo y los medidos experimentalmente muestra que el modelo micromecánico resulta adecuado para aquellos valores más altos del módulo dinámico y tiende a subvalorar aquellos más bajos.

De acuerdo a las premisas básicas para el desarrollo del modelo de estimación se ha introducido un factor de calibración de naturaleza empírica que involucra el módulo de rigidez del ligante S_{bit} y el contenido relativo de agregados pétreos.

El modelo ajustado no presenta sesgo apreciable con un coeficiente de correlación $R^2 = 92.4\%$. La valoración de la aptitud del modelo resulta Bueno/Excelente para el espacio aritmético y Excelente/Excelente para el espacio bi-logarítmico.

Se destaca que este modelo de estimación del módulo dinámico de las mezclas asfálticas es de base racional y satisface la premisa básica adoptada referida a que sólo requiere conocer las características generales de la mezcla habitualmente determinadas durante la formulación de la misma.

Del análisis de los resultados obtenidos, es posible concluir que el modelo desarrollado produce resultados del módulo dinámico suficientemente confiables y adecuados para las mezclas asfálticas elaboradas con ligantes convencionales o modificados con polímeros aplicables en procedimientos de diseño empírico-mecanísticos de pavimentos.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Martínez, F. O. "Desarrollo de un modelo micromecánico de estimación del módulo dinámico de mezclas asfálticas". Memorias del XVIII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Comisión Permanente del Asfalto, 2015. ISBN 978-950-630-031-9.
- [2] Eshelby, J. D. "The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems". Proceedings Royal Society, Serie A, No. 241. pp.376-396. 1957. London.
- [3] You, Z., and W. G. Buttlar. "Discrete element modeling to predict the modulus of asphalt concrete mixtures". Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 17, 2004, pp. 140–146.
- [4] Buttlar, W. G., and Z. You. "Discrete element modeling of asphalt concrete: a microfabric approach". Transportation Research Record, No. 1757, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2001, pp. 111–118.
- [5] Shu, X., and B. Huang. "Dynamic modulus prediction of HMA mixtures based on the viscoelastic micromechanical model". Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 20, No. 8, 2008, pp. 530–538.
- [6] Shu, X., and B. Huang. "Micromechanics-based dynamic modulus prediction of polymeric asphalt concrete mixtures". Composites Part B: Engineering, Vol. 39, No. 4, 2008, pp. 704–713.
- [7] Buttlar, W. G., Roque, R. " Evaluation of empirical and theoretical models to determine asphalt mixture stiffnesses at low temperatures". Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 65. 1996.
- [8] Christensen, R.M. and Lo, K. H. " Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models". Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Volume 27, Issue 4, August 1979, Pages 315–330.
- [9] Shashidhar, N. and Shenoy, A. "On Using Micromechanical Models to Describe the Dynamic Mechanical Behavior of Asphalt Mastics". Proceedings of the 79th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D. C., 2000.
- [10] Buttlar, W. G., Bozkurt, D., Al-Khateeb, G. G. and Waldhoff, A. S., "Understanding asphalt mastic behavior through micromechanics". Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington D. C. 1999.
- [11] Li, G., Li, Y., Metcalf, J. B. and Pang, S. "Elastic modulus prediction of asphalt concrete". Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 11, No. 3, August, 1999.
- [12] Huang, B., Shu, X., Li, G. and Chen, L. "Analytical modeling of three-layered HMA mixtures". International Journal of Geomechanics, Vol. 7, No. 2, April 1, 2007.
- [13] Di Benedetto, H., Olard, F., Sauzéat, C. and Delaporte, B. " Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: from binders to mixes". International Journal Road Materials and Pavement Design, Vol. 5, Special Issue, p. 163-202, 2004.
- [14] Saada, A. S. "Elasticity, theory and applications". J. Ross Publishing, 2nd. Edition, 2009. ISBN 13:978-1-60427-019-8.

- [15] Hashin, Z. and Shtrikman, S. " A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials". Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Volume 11, Issue 2, March–April 1963, Pages 127–140.
- [16] Castelblanco, A. "Probabilistic analysis of air void structure and its relationship to permeability and moisture damage of hot mix asphalt". MSc. Thesis, Texas A&M University, 2004.
- [17] Witczak, M. and Mirza, W. "Dynamic Modulus Database", University of Maryland, 1999.
- [18] Witczak, M., Pellinen T., El-Basyouny M. "Pursuit of the simple performance test for asphalt concrete fracture/cracking". Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, USA. 2002.