

AJUSTE ECUACION DE PREDICCIÓN WITCZAK MODELO NCHRP 1-37A DEL MODULO DINAMICO ($|E^*|$) DE MEZCLAS ASFALTICAS

Ing José Joaquín Lara R

Resumen- La tendencia mundial es desarrollar métodos de diseño empírico -mecánico (M-E), debido a las deficiencias de los métodos empíricos, como el AASHTO -93. En este trabajo se propone una metodología de ajuste local a la ecuación de Witzak NCHRP 1-37A de la nueva Guía AASHTO. Así mismo, se presenta una ecuación no sigmoidal que considera la correlación de las variables individuales con el módulo dinámico $|E^*|$ por medio del coeficiente de Spearman.

Se analizaron nueve (9) diferentes mezclas asfálticas en caliente, se compararon los resultados del módulo dinámico de laboratorio con los obtenidos con la fórmula de predicción de Witzak en la nueva Guía para el Diseño Mecánico - Empírico de Pavimentos MEPDG de la AASHTO 2004. Con base en análisis estadístico, se propusieron ajustes locales a los coeficientes de la ecuación sigmoidal NCHRP 1-37A. Por otra parte, mediante métodos de análisis de correlación no lineal multivariado, se propuso un modelo alternativo para estimar el valor del módulo dinámico $|E^*|$, a partir de aspectos volumétricos de la mezcla asfáltica y la viscosidad del cemento asfáltico.

En el estudio se concluyó que: (a) se obtienen un mejor valor del coeficiente de correlación de la ecuación modificada con respecto a la ecuación original de Witzak 1-37A y (b), las ecuaciones no sigmoidales pueden ser simples y producir resultados similares a la sigmoidal con igual o mayor confiabilidad estadística.

Palabras clave: Witzak, Módulos dinámicos, Mezclas asfálticas.

Abstract- The global trend is to develop empirical-mechanistic (M-E) design methods, due to the shortcomings of empirical methods, such as AASHTO -93. In this work, a local adjustment methodology is proposed to the Witzak equation NCHRP 1-37A of the new AASHTO Guide. Likewise, a non-sigmoidal equation is presented that considers the correlation of the individual variables with the dynamic module $|E^*|$ by means of the Spearman coefficient. Nine (9) different hot asphalt mixtures were analyzed, the results of the dynamic laboratory module were compared with those obtained with the Witzak prediction formula in the new AASHTO 2004 Guide for the Mechanical-

Empirical Design of Pavements MEPDG. Based on the statistical analysis, local adjustments were proposed to the coefficients of the sigmoidal equation NCHRP 1-37A; Finally, by multivariate non-linear correlation analysis methods, an alternative model was proposed to estimate the value of the dynamic module E^* , from the volumetric aspects of the asphalt mix and the viscosity of the asphalt cement.

The study concluded that: (a) better values of the correlation coefficient of the modified equation are obtained with respect to the original equation of Witzak 1-37A and (b), the non-sigmoidal equations can be simple and produce results similar to the sigmoidal with equal or greater statistical reliability.

Keywords: Witzak, Dynamic modulus, Asphalt Mix.

I. INTRODUCCIÓN

A) Antecedentes

La construcción y mantenimiento de carreteras son actividades que demandan una alta inversión. Las mezclas asfálticas representan un alto porcentaje del valor económico de los pavimentos flexibles [1], por lo que la adecuada caracterización de la respuesta estructural del pavimento permitirá hacer diferentes análisis que estimen, con un adecuado grado de precisión, la sensibilidad entre las variables *costo-beneficio* en un proyecto vial.

Alrededor del año 2002, luego de muchos años de investigación, la AASHTO propuso un nuevo método de diseño denominado MEPDG. Este método emplea metodología mecanicista para el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones en la estructura del pavimento. El aspecto empírico del método de diseños es la estimación, por medio de ecuaciones de transferencia, de la evolución del deterioro estructural y funcional del pavimento en su vida útil [2]. Esta metodología aún está en proceso de calibración en muchos estados de América del Norte y otros países hacen sus propios ajustes.

El módulo dinámico es una característica de las mezclas asfálticas que evolucionan durante la vida útil del pavimento, debido a procesos de envejecimiento del cemento asfáltico, acumulación de fatiga, disminución progresiva de vacíos en las

mezclas asfálticas por efecto de cargas vehiculares, entre otros aspectos [3]. Por lo tanto, se requiere la definición de curvas maestras de las mezclas empleadas en los pavimentos, lo que permite determinar el valor del módulo dinámico para cualquier combinación de frecuencia y temperatura [4].

B) Modulo Dinámico de Mezcla Asfáltica en Caliente

El módulo dinámico (E^*) es la medida de la resistencia a deformación bajo cargas sinusoidal en las mezclas asfálticas. Es la entrada principal para caracterizar la capa de este material en la Guía de diseño de pavimento empírico mecanicista (MEPDG) de la AASHTO [5]. En la tabla 1, la ecuación Ec1 muestra la relación entre la amplitud de esfuerzo sinusoidal (stress) y la deformación unitaria sinusoidal (strain) como definición del módulo dinámico complejo E^* . El valor absoluto de ese valor es el módulo dinámico $|E^*|$. La fig. 1 esquematiza aspectos asociados a las cargas y deformaciones en el ensayo [6].

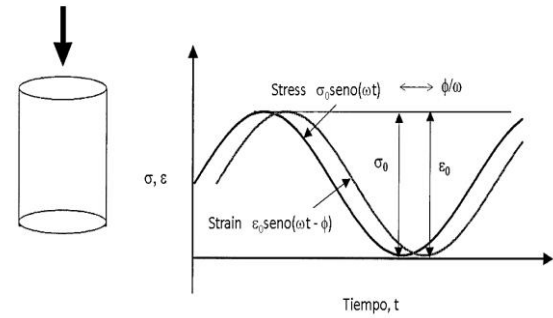


Fig. 1 Ensayo de módulo dinámico en mezclas asfáltica – desfase entre esfuerzo y deformación.

Fuente: Adaptado de [9]

C) Revisión de Literatura

Desde hace más de cinco décadas se han venido haciendo intentos para predecir el comportamiento estructural de las mezclas asfálticas, como respuesta a solicitudes externas en función del módulo elástico. La Guía de diseño de pavimentos AASHTO – 93 utiliza el módulo resiliente a temperatura estándar de 20°C; este se correlaciona con el coeficiente de aporte estructural (a_1). Uno de los problemas de este método de diseño es precisamente la actualización de este concepto con respecto a las mezclas modernas elaboradas con materiales que producen altos valores del módulo resiliente, por encima del máximo registrado en el nomograma de la AASHTO -93.

Las ecuaciones de correlación más simple intentan predecir el módulo elástico con base a parámetros de la mezcla asfáltica como la estabilidad y el flujo Marshall. Los métodos actuales y de mayor rigor técnico involucran aspectos volumétricos y de gradación de las mezclas asfálticas y parámetros reológicos del cemento asfáltico como el módulo dinámico de corte ($|G^*|$) y el ángulo de fase (δ). En la tabla 2 se identifican algunas de las ecuaciones de predicción del módulo de las mezclas asfálticas [10]. De ese amplio espectro de ecuaciones las más relevantes son las Witczak – Mirza de 1999, Witczak – Bari de 2006 y la de Hirsch de 2003 que reportan apropiados valores de los parámetros de bondad de ajuste estadístico.

TABLA 2
PRINCIPALES ECUACIONES DE PREDICCIÓN DEL MÓDULO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Modelo de Predicción $ E^* $	Año publicado
Van Der Poel	1954
Bonnaure	1977
Heukelom & Klomp	1969
Witczak primera ecuación	1972
Witczak '81	1981
Witczak, Miller y Uzan	1983
Witczak y Akhter	1989
Witczak, Leahy, Caves y Uzan	1996
Witczak y Fonseca	1996
Andrei, Witczak y Mirza (Modelo 1-37A)	1999
Hirsch, Cristensen, Pellinen y Bonaquist	2003
Witczak y Bari (Modelo 1-40D)	2006
Al-Khateeb	2006

Fuente: Adaptada de [10]

TABLA 1
ECUACIÓN MÓDULO DINÁMICO $|E^*|$

Descripción	Ecuación	Parámetros
Modulo dinámico complejo E^* Referencia: AASHTO T 342 -11 (2012)	Ec. 1 $E^* = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma_0 \cdot e^{i\omega t}}{\epsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \delta)}}$	Ec. 2 $= \frac{\sigma_0 \cdot \text{seno}(\omega t)}{\epsilon_0 \cdot \text{seno}(\omega t - \delta)}$
	Ec. 3 $ E^* = \left \frac{\sigma}{\epsilon} \right $	

Fuente: de [6]

El ensayo de módulo dinámico según la norma AASHTO T 342 -11 (2012) se realiza en probetas de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura, a temperaturas de 4.4°C hasta 54.4°C y frecuencias de aplicación de carga de 0.1 hasta 25 Hz [8].

La Guía MEPDG de la AASHTO requiere para el diseño de pavimentos en el nivel 1 de información realizar el ensayo de laboratorio de $|E^*|$ en la mezcla asfáltica a frecuencias de cargas y temperaturas de interés del proyecto. Para desarrollar la curva maestra es necesario, además, hacer ensayos de módulo de corte complejo del cemento asfáltico ($|G^*|$) y medir el ángulo de fase (δ) en un rango conveniente de temperaturas y a una frecuencia (ω) de 1.59 Hz (ensayo AASHTO T315).

En la tabla 3 se presentan algunas ecuaciones de correlación, en donde se pueden identificar los parámetros más relevantes considerados en el modelo.

TABLA 3
ECUACIONES PREDICTORAS DE MÓDULO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Autor/ Entidad	Parámetros	Ecuación
Instituto del asfalto, 1993	$ E_m $ V_b V_a T ρ_{200} λ	$ E_m = 100000 \cdot 10^{\beta_1}$ $\beta_1 = \beta_3 + 0.000005\beta_2 - 0.00189\beta_2 \cdot f^{-1.1}$ EC 4 $\beta_2 = \beta_4^{0.5} \cdot T^{\beta_5}$ $\beta_3 = 0.55383 + 0.028829(\rho_{200} \cdot f^{-0.1703}) - 0.03476V_a + 0.70377\lambda + 0.931757f^{-0.02774}$ EC 5 $\beta_4 = 0.483V_b$ EC 6 $\beta_5 = 1.3 + 0.49825 \log(f)$ EC 7 Donde f : frecuencia de aplicación de la carga, Hz T : Temperatura de la mezcla, °F ρ_{200} : porcentaje en peso del agregado que pasa la malla No. 200. V_a : Volumen de vacíos con aire, %. V_b : Volumen de asfalto en la mezcla, %. λ : Viscosidad del asfalto en 10^6 poises a 70°F.
Bonnaure et al. (1977) Van del Poel (Ecuación de S_b), Utilizadas con por la Shell y presentadas en nomogramas o programa Bands	S_m S_b V_g V_b t_w IP T_{RB} T	Para $5 \times 10^9 \text{ N/m}^2 < S_b < 10^9 \text{ N/m}^2$ $\log S_m = \frac{\beta_4 + \beta_3}{2} \cdot (\log S_b - 8) + \frac{\beta_4 - \beta_3}{2} \cdot \log S_b - 8 + \beta_2$ EC 8 Para $10^9 \text{ N/m}^2 < S_b < 3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ $\log S_m = \beta_2 + \beta_4 + 2.0959(\beta_1 - \beta_2 - \beta_4)(\log S_b - 9)$ EC 9 $\beta_1 = 10.82 - \frac{1.342(100 - V_g)}{V_g - V_b}$ EC 10 $\beta_2 = 8.0 + 0.056V_g + 0.000213V_g^2$ EC 11 $\beta_3 = 0.6 \cdot \log \left[\frac{1.37V_b^2 - 1}{1.33V_b - 1} \right]$ EC 12 $\beta_4 = 0.7582(\beta_1 - \beta_2)$ EC 13 $S_b = 1.157 \cdot 10^{-7} \cdot t_w^{-0.368} \cdot e^{-IP} \cdot (T_{RB} - T)^5$ EC 14 $IP = \frac{20 - 500A}{1 + 50A}$ EC 15 $A = \frac{\log(\text{pen a } T_1) - \log(\text{pen a } T_2)}{T_1 - T_2}$ EC 16 Dónde: S_m : Modulo de la mezcla, N/m^2 S_b : rigidez del cemento asfaltico t_w : Tiempo de aplicación de la carga. T_{RB} : Temperatura de punto de ablandamiento (anillo y bola) T : temperatura del ensayo IP : Índice de penetración del asfalto. $\text{pen a } T_1$: corresponde al resultado de la penetración a una temperatura T_1 $\text{pen a } T_2$: corresponde al resultado de la penetración a una temperatura T_2 V_g : Porcentaje en volumen del agregado V_b : Porcentaje en volumen del cemento asfáltico

<p>Witczak-Mirza Modelo NCHRP 1-37A</p>	<p>E^* p_{200} p_4 p_{38} p_{34} V_a V_{beff} f η</p>	$\log E^* = 3.750063 + 0.02932p_{200} - 0.001767(p_{200})^2 - 0.002841p_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \frac{V_{beff}}{(V_{beff} + V_a)} + \frac{3.871977 - 0.0021p_4 + 0.003958p_{38} - 0.000017(p_{38})^2 + 0.005470p_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351\log(f) - 0.393532\log(\eta))}}$ <p>Ec 17</p> <p>Dónde: E^*: Modulo dinámico, psi η: viscosidad del cemento asfáltico, 10^6 Poise f: Frecuencia de carga, Hz V_a: Huecos con aire en la mezcla asfáltica, % V_{beff}: Contenido efectivo de cemento asfáltico, % en volumen p_{34}: porcentaje (peso) acumulado retenido en la malla de 3/4" p_{38}: Porcentaje(peso) acumulado retenido en la malla de 3/8" p_4: Porcentaje (peso) acumulado retenido en la malla No. 4 p_{200}: Porcentaje (peso) que pasa la malla No.200</p>
<p>Witczak-Bari (NCHRP 1-140D)</p>	<p>E^* G_b^* d_b V_a V_{beff} p_4 p_{38} p_{34} p_{200}</p>	$\log E^* = -0.02 + 0.758(G_b^* ^{-0.0009}) \times \left[6.8232 - 0.03274P_{200} + 0.00431P_{200}^2 + 0.0104P_4 - 0.00012P_4^2 + 0.00678P_{38} - 0.00016P_{38}^2 - 0.0796V_a - 1.1689 \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} \right) \right] + \frac{1.437 + 0.03313V_a + 0.6926 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + 0.00891P_{38} - 0.00007P_{38}^2 - 0.0081P_{34}}{1 + e^{(-4.5868 - 0.8176\log G_b^* + 3.2738\log(\delta_b))}}$ <p>Ec 18</p> <p>Dónde: Los parámetros tienen el mismo significado que la Witczak-Mirza Modelo NCHRP 1-37A, y G_b^*: modulo cortante dinámico del cemento asfáltico, Pa d_b: ángulo de fase asociado a G_b^* del cemento asfáltico, en grados</p>

Fuente: [11], [12]

D) Modelo Witczak - Mirza NCHRP 1-37A

La Guía de diseño de pavimentos mecanicista – empírico (MEPDG) versión NCHRP 1 -37A, utiliza el modelo desarrollado por Witczak et al. en 1999 para predecir el módulo dinámico de las mezclas asfáltica $|E^*|$ durante la vida útil del pavimento, en el nivel 2 y nivel 3 de información. El modelo predictivo requiere la viscosidad del ligante a la temperatura de diseño, el tiempo de aplicación de la carga, parámetros volumétricos y de gradación de la mezcla asfáltica como datos de entradas [13].

La susceptibilidad térmica del cemento asfáltico se representa como un conjunto de valores, A y VTS, que son parámetros de ajustes determinado con la ecuación Ec19 y Ec 20. Lo anterior, se representa en la Fig 2.

La viscosidad se debe establecer, preferiblemente, a partir de ensayos con equipo Reómetro Dinámico de Corte (DSR por sus siglas en Ingles) y elaborar la curva de susceptibilidad térmica del cemento asfáltico.

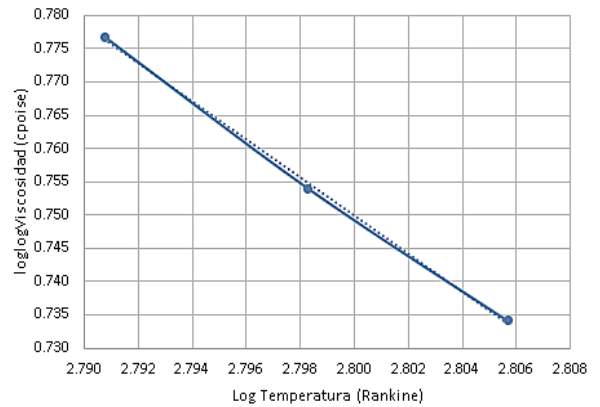


Fig. 2 Curva de susceptibilidad del cemento asfáltico $\log(\log(\eta)) = A + VTS\log(T^{\circ}R)$
Fuente: Propia

La ecuación de predicción 1-37A (Ec17) se presenta en forma segmentada para facilitar su manejo, como se muestra en la ecuación Ec22. En la tabla 5 se registran los componentes A, B y C respectivos.

TABLA 4
PARÁMETROS REOLÓGICOS MODELOS 1-37A

Parámetro	Ecuación	Descripción
Viscosidad	$\eta = \frac{ G^* }{10} \cdot \left(\frac{1}{\text{sen}\delta}\right)^{4.8628}$	Ec 19 Dónde: G* : Módulo cortante complejo del cemento asfáltico, en pascal (P) δ: Ángulo de fase del cemento asfáltico, en grados
Parámetros A – VTS	$\log(\log(\eta)) = A + VTS \log(T_R)$	Ec 20 η: Viscosidad, cP T _R : Temperatura en grados Rankine a la cual se determinó la viscosidad A, VTS parámetros de la recta de regresión.
Temperatura crítica	$\log(\log(\eta)) = 1.095 \text{ para } T_R < T_{\text{crítica}}$	Ec 21 10: frecuencia angular (w) en unidades de rad/s T _{crítica} : Temperatura en grado Rankine a la cual la viscosidad es igual a 2.7x10 ¹² cP (0.0027x10 ¹² Pa.s) [14].

Fuente: de [11]

$$\text{Log}|E^*| = A + B + C \quad \text{Ec 22}$$

TABLA 5
COMPONENTES DE LA ECUACIÓN 1-37A RE-ESCRITA

Componente de la Ecuación	Descripción
$A = 3.750063 + 0.02932p_{200} - 0.001767(p_{200})^2 - 0.002841p_4 - 0.058097V_a$	Ec23 Dónde: E* : Módulo dinámico, psi δ: viscosidad del cemento asfáltico, 10 ⁶ Poise f: Frecuencia de carga, Hz V _a : Huecos con aire en la mezcla asfáltica, %
$B = -0.802208 \cdot \frac{V_{b_{\text{eff}}}}{(V_{b_{\text{eff}}} + V_a)}$	Ec24 V _{b_{eff}} : Contenido efectivo de cemento asfáltico, % en volumen p ₃₄ : porcentaje acumulado retenido en la malla de 3/4"
$C = \frac{3.871977 - 0.0021p_4 + 0.003958p_{38} - 0.000017(p_{38})^2 + 0.005470p_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351\log(f) - 0.393532\log(\eta))}}$	Ec25 p ₃₈ : Porcentaje acumulado retenido en la malla de 3/8" p ₄ : Porcentaje acumulado retenido en la malla No. 4

Fuente: Propia

TABLA 6
ECUACIÓN SIGMOIDAL LOG|E*|

Parámetro	Ecuación	Descripción
log E* en función del tiempo reducido	$\log E^* = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \gamma \log(t_r))}}$	Ec 26 δ: Valor mínimo que podría adoptar el módulo dinámico. δ+α: Valor máximo que podría adoptar el módulo dinámico. β y γ: factor que depende de la forma de la curva; el primero tiene que ver la posición horizontal de la curva de cambio y el su concavidad y el segundo con la pendiente.
log E* en función de la frecuencia reducida	$\log E^* = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta - \gamma \log(f_r))}}$	Ec 27 t _r : tiempo de aplicación de carga reducido (trasladada) a la temperatura de referencia. f _r : frecuencia de aplicación de carga reducida (trasladada) a la temperatura de referencia.

Fuente: de [11]

E) Curvas Maestras

Las curvas maestras, en el caso de las mezclas asfálticas, son una herramienta que permite amplificar el rango de los resultados del ensayo de módulos dinámicos, dado que son predictoras del módulo para condiciones de carga y temperatura diferente a las del ensayo; además, permite hacer análisis comparativos de diversas mezclas [15].

El método para elaborar la curva maestra está basado en el principio de superposición *tiempo – temperatura* (matemáticamente, es una aplicación del principio de superposición de Boltzmann), el cual corresponde a efectos recíprocos en los materiales viscoelásticos. En el caso particular de las mezclas asfálticas, una disminución en la temperatura es equivalente a un aumento en el tiempo de aplicación de la carga y viceversa [16].

La curva maestra, adoptada por la MEPDG de la AASHTO, es una función sigmoïdal. La fig. 3 es un ejemplo de este tipo de curvas [17].

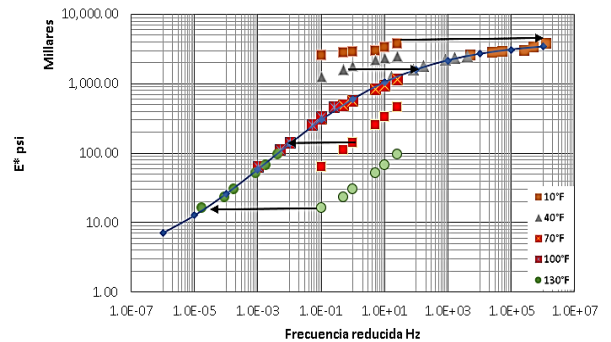


Fig. 3 Representación de curva maestra
Fuente: Propia

II. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

A) Base de datos de los Materiales y Ensayos

Los datos de este artículo corresponden a ensayos realizados sobre mezclas asfálticas con materiales pétreos de la región de Santander y Cundinamarca y corresponden a caracterización de materiales pétreos, diseño volumétrico de mezclas asfálticas por método Marshall, ensayos de módulos dinámicos $|E^*|$, módulo de Corte complejo ($|G^*|$) y el ángulo de fase (δ) en el cemento asfáltico.

Los materiales pétreos son productos de trituración de rocas de canteras (Cundinamarca) y fuentes aluviales (Santander) de la zona norte de Colombia (Santander) y de la zona Andina (Cundinamarca). Las gradaciones de las mezclas son las especificadas por la Federal Aviation Administration (FAA) y el Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS). Los cementos asfálticos base son de la refinería de Ecopetrol y otros fueron modificados con polímeros o mejoradores de adherencia, para obtener asfalto tipo I y Tipo V. En la tabla 7 se resumen las características reológicas de los ligantes utilizados y en la tabla 8 se presentan las principales características de las mezclas de este proyecto.

TABLA 7
CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DE LOS ASFALTOS UTILIZADO, SEGÚN ENSAYO CON EQUIPO DSR

Mezcla	Temp. °C	$ G^* $ (pascal)	δ°	A	VTS
M1, M2	70	5151	61.7	8.75342	-2.85909
	76	2375	64.1		
	82	1764	67.0		
M3	76	7137	57.9	8.22295	-2.65523
	82	4429	60.6		
	88	2747	63.6		
M4, M5, M6	58	5950	75.1	9.28828	-3.07063
	64	2870	77.0		
	70	1580	78.5		
M6	58	5950	75.1	9.28828	-3.07063
	64	2870	77.0		
	70	1580	78.5		
M7	70	4610	58.8	7.12631	-2.27482
	76	2770	59.0		
	82	1700	59.6		
M8, M9	64	3053.2	84.6	12.60249	-4.26237
	70	1236.7	86.5		

Fuente: Propia

B) Módulos Dinámicos de las Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas analizadas en este artículo son diversas en gradación. Las características de los asfaltos difieren en algunos casos y la respuesta estructural medida como modulo dinámico $|E^*|$ están en un amplio rango de valores desde 149 MPa hasta 21987 MPa

La fig. 4 es la representación de los módulos medidos. Las curvas maestras obtenidas con los resultados de los ensayos de laboratorio, utilizando factor de relevo de Arrhenius, son mostradas en la fig. 5.

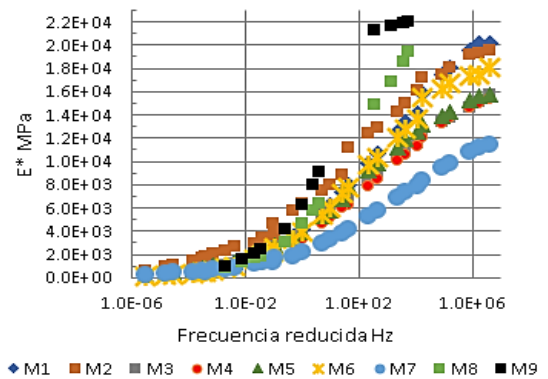


Fig. 4 Módulos dinámicos medidos
Fuente: Propia

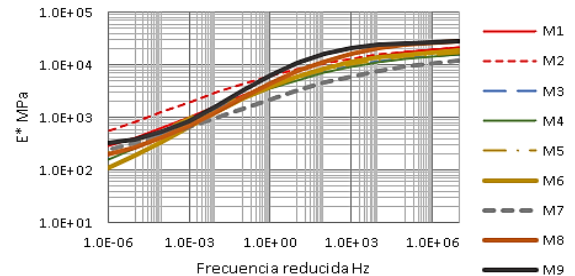


Fig. 5 Curvas maestras de mezclas del estudio
Fuente: Propia

TABLA 8
INFORMACIÓN DE LOS MATERIALES Y DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZADAS EN ESTE ESTUDIO

ID MIX		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Contenido asfalto en peso (%)		5.7	5.9	5.6	5.6	5.3	6.4	6.1	4.7	5.4
Volúmenes, %										
Aire en la mezcla	V _a	3.5	4.0	5.0	4.6	5.0	5.2	6.6	5.0	5.0
Aire en agregado mineral	VMA	15.1	15.6	16.2	15.5	15.8	16.5	19.0	21.1	21.6
Llenos con asfalto	VFA	76.82	74.36	69.14	70.32	68.35	68.48	65.26	76.30	76.85
Ligante efectivo	V _{beff}	11.6	12.6	11.2	10.9	10.8	11.3	12.4	16.1	16.6
Agregado mineral	V _g	84.9	84.4	83.8	84.5	84.2	83.5	81.0	78.9	78.4
Tipo de Cemento asfáltico		PG 75-30	PG 75-30	Tipo I (1)	60-70 (2)	60-70 (2)	60-70 (2)	Tipo I (1)	70-90	70-90
Viscosidad Brookfield a 135°C, aguja 27 12 rpm (pa.s)		2.79	1.23	3.989	-	-	-	-	-	-
Penetración (25°C, 100g, 5s) 0.1mm		-	-	60.3	68.5	68.5	66.8	49.8	71	71
Temperatura de punto ablandamiento T _{R&B} (°C)		-	-	58	50	50	49.5	74.5	44.8	44.8
Cemento asfáltico envejecido en RTFO		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Penetración (25°C, 100g, 5s) 0.1mm		-	-	42.9	47.7	47.7	50.1	-	54	54
Temperatura de punto ablandamiento T _{R&B} (°C)		-	-	67.5	56	56	58.3	-	48.8	48.8
Gradación (porcentaje acumulado que pasa)		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tamiz (No.)	mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3/4"	19.1	100	100	100	100	100	100	100	90	100
1/2"	12.7	93.3	90.73	83	82	84	84	100	76	90
3/8"	9.52	85.4	82.35	75	71	77	70	100	68.5	79
No.4	4.75	58.9	58.07	50	49	61	49	33	48.5	59.5
No.8	2.38	42	42.24	-	-	-	-	-	-	-
No. 10	2.00			30	29	37	29	21	37	37
No.16	1.19	33.6	33.37	-	-	-	-	-	-	-
No.30	0.59	25.8	25.97	-	-	-	-	-	-	-
No.40	0.28			13	13	16	14	12	19.5	19.5
No.50	0.297	17.8	16.94	-	-	-	-	-	-	-
No. 80	0.125			8	9.4	10	9		12.5	12.5
No.100	0.149	9.5	10.12	-	-	-	-	-	-	-
No.200	0.074	5.7	5.56	6	5.5	5.5	5.4	8.8	6	6
Tipo de mezcla (*)		FAA-P-401	FAA-P-401	MSC-2	MSC-19	MCD-19	MSC-2	Discont. F2	MD-1-9	MDC-2-96

(1) Con 10%GCR (2) con aditivo de adherencia (*) Según especificación de FAA (USA) e INVIAS Colombia

Fuente: Propia

III. EVALUACIÓN DE LA ECUACIÓN DE WITCZAK 1-37A

A) Estadística de los Datos de Módulos |E*| Medidos

La evaluación de la bondad predictiva de la ecuación de Witzak 1-37A se analiza en este aparte considerando los resultados de los ensayos realizados. La tabla 9 muestra algunos parámetros de estadística descriptiva de los valores de |E*| de laboratorio.

TABLA 9
ESTADÍSTICOS DE DATOS MÓDULOS MEDIDOS (MPa)

Numero de datos	233
Valor Mínimo	149
Valor máximo	21987
Media	6721
Media	4599
Desviación estándar	6120

Fuente: Propia

El histograma de los módulos medidos muestra un rango amplio de valores de |E*|, como se señaló previamente. La distribución de los datos es no-gaussiana y sesgada hacia los valores bajos de módulos dinámicos (menores a 5000 MPa), que representan el 70% de los valores medidos, como se aprecia

en la fig. 6. En el histograma de los módulos dinámicos de las mezclas individuales se observa que hay rangos de valores de modulo dinámicos no representados en el ensayo, como se muestra en la fig. 7. Esto último ratifica la importancia de las curvas maestras.

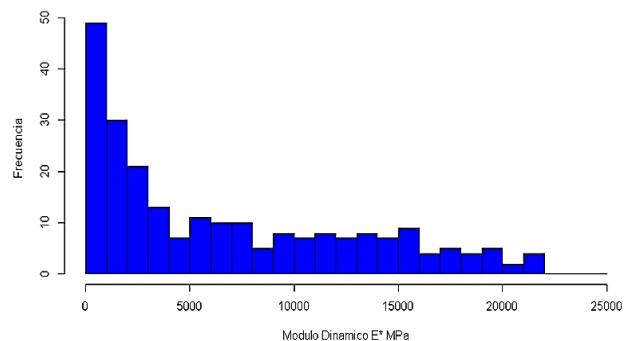


Fig. 6 Histograma de frecuencia módulos |E*| medidos
Fuente: Propia

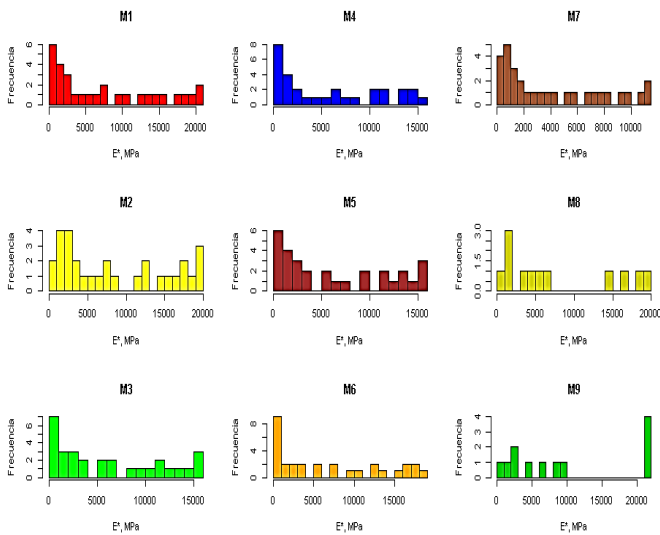


Fig. 7 Histograma de resultados de E* medidos en mezclas individuales
Fuente: Propia

B) Bondad de Ajuste

Para calificar el desempeño de los modelos evaluados y propuestos, se estimó la bondad de ajuste de las ecuaciones predictivas con respecto a los valores medidos, utilizando el coeficiente de determinación (Ec31) y el coeficiente de error (Ec32), como se muestra en la tabla 10 [18].

TABLA 10
PARÁMETROS DE BONDAD DE AJUSTES

Tipo	Ecuación	Definición
Relación del error estándar	$\frac{S_e}{S_y}$	Ec 28
Error estándar de la estimación	$S_e = \sqrt{\frac{\sum_1^n (E_i^* - \hat{E}_{pi}^*)^2}{n - k - 1}}$	Ec 29
Desviación estándar de los valores medidos	$S_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n (E_i^* - \bar{E}_m^*)^2}{n - 1}}$	Ec 30
Coefficiente de determinación del Ajuste	$R^2 = 1 - \frac{(n - k - 1) \left(\frac{S_e}{S_y}\right)^2}{(n - 1)}$	Ec 31
Coefficiente del error	$C = \frac{\sum_1^n E_i^* - \bar{E}_m^* }{n \bar{E}_m^*}$	Ec 32

Fuente: Adaptado de [19]

Con respecto al coeficiente del error (C), un valor muy cercano a cero indica que el modelo cumple con su objetivo [20].

C) Evaluación ecuación Witzcak 1-37A con módulos medidos.

La ecuación NCHRP 1-37A se desarrolló con 2750 puntos de módulos dinámicos medidos en 205 diferentes mezclas asfálticas [11]. La primera constante de la ecuación es 3.750063, cuando las unidades de $|E^*|$ son psi y -1.249937, cuando son 10^5 psi. Esta ecuación fue incorporada al software de la MEPDG de la AASHTO y el parámetro reológico del cemento asfáltico es la viscosidad [21].

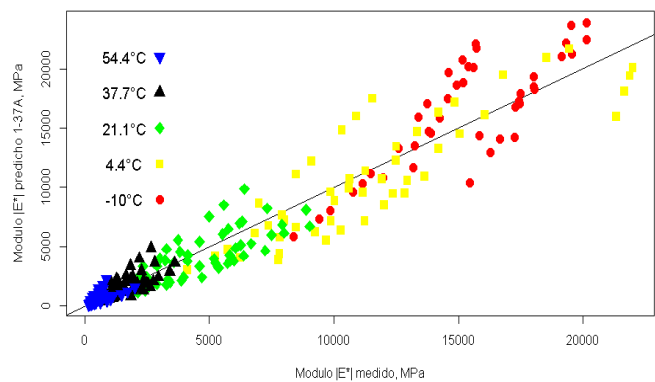
La fig. 8 muestra los valores medidos y predichos de los módulos dinámicos de este estudio, y la tabla 11, los estadísticos individuales de cada mezcla y de todas en conjunto de los módulos estimados por la Ecuación de Witzcak 1- 37A.

TABLA 11
ESTADÍSTICO BONDAD DE AJUSTES $|E^*|$ MEZCLAS INDIVIDUALES Y TODAS LAS MEZCLAS ECUACIÓN 1-37A ORIGINAL

Mezcla	Sy	Se	Se/Sy	R ²
M1	6960.9	1145.1	0.1645	0.9739
M2	6738.1	1819.0	0.2700	0.9296
M3	5439.6	2978.1	0.5475	0.7106
M4	5284.6	1567.1	0.2965	0.9151
M5	5553.4	2082.2	0.3750	0.8643
M6	6477.6	2271.9	0.3507	0.8812
M7	3806.0	925.6	0.2432	0.9429
M8	7289.4	1659.8	0.2277	0.9499
M9	8914.7	2452.7	0.2751	0.9312
Todas	6170.2	1910.2	0.3096	0.9046

Fuente: Propia

Fig. 8 Módulo $|E^*|$ predicho Ecuación 1-37A y Módulo E medido



Fuente: Propia

El ajuste en la totalidad de las predicciones se considera bueno, aun cuando en algunas mezclas individuales, como M5 y M6, baja esa calificación.

El coeficiente de error C, aplicado a las predicciones desagregadas por temperatura, muestra una mayor deficiencia de predicción para temperaturas de 37.7°C y 54.4°C (100°F y 130°F), rango de temperaturas en el cual operan en un alto

porcentaje de horas del día las mezclas asfálticas en países tropicales (tabla 12).

TABLA 12
VALOR DEL COEFICIENTE DEL ERROR DE PREDICCIÓN PARA DIVERSAS TEMPERATURAS ECUACIÓN 1-37A

Temperatura °C, (°F)	-10 (14)	4.4 (40)	21.1 (70)	37.7 (100)	54.4 (130)	-10 a 54.4 (14 a 130)
Coficiente del error	0.16	0.18	0.27	0.33	0.47	0.19

Fuente: Propia

D) Propuesta de Ajuste de Modelo Tipo Sigmoidal

Con los resultados de la caracterización de las mezclas asfálticas y la viscosidad (η) de los cementos asfálticos, y utilizando la función Solver de Excel, se realizó la optimización de error cuadrático de la ecuación sigmoidal propuesta por Witczak, con el fin de obtener coeficientes que permitan hacer un análisis comparativo de la bondad de ajuste de la ecuación original de Witczak y la propuesta en este estudio, con base en las características de las mezclas y materiales locales. La ecuación base es la Ec33.

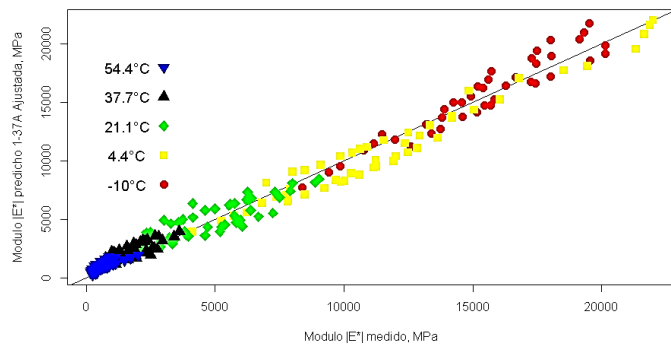
Ec 33

$$\text{Log}|E^*| = C_1 + C_2 p_{200} + C_3 (p_{200})^2 + C_4 p_4 + C_5 V_a + C_6 \frac{(Vb_{eff} + V_a)}{Vb_{eff}} + \frac{C_7 + C_8 p_4 + C_9 p_{38} + C_{10} (p_{38})^2 + C_{11} p_{34}}{1 + e^{(C_{12} + C_{13} \log(f) + C_{14} \log(\eta))}}$$

Los coeficientes originales y los obtenidos por ajuste con parámetros locales se muestran en la tabla 13.

En la figura 9 se puede observar que el ajuste propuesto con los valores de caracterización obtenidos de las mezclas analizadas es superior al calculado con los coeficientes de la ecuación original NCHRP 1-37A, sugerida en la Guía de diseño MEPDG de AASHTO.

Fig. 9 Módulo $|E^*|$ predicho con ecuación 1-37A ajusta y Módulo $|E^*|$ medido



Fuente: Propia

TABLA 13
COEFICIENTES DE AJUSTES ECUACIÓN ORIGINAL WITCZAK Y ECUACIÓN OPTIMIZADA EN ESTE ESTUDIO

Variables	Valor coeficiente	
	1-37A	Ajustado
C ₁	3.750063	4.795725
C ₂	0.029320	-0.682242
C ₃	-0.001767	0.026112
C ₄	-0.002841	-0.012601
C ₅	-0.058097	0.195572
C ₆	-0.802208	2.558143
C ₇	3.871977	2.149561
C ₈	-0.002100	0.020454
C ₉	0.003958	-0.025401
C ₁₀	-0.000017	0.000186
C ₁₁	0.005470	0.000377
C ₁₂	0.313351	0.286409
C ₁₃	-0.603313	-0.406671
C ₁₄	-0.393532	-0.543790

Fuente: Propia

De los parámetros de bondad de ajuste la fig. 10 representa el valor de R² y se muestra que, tanto para muestras individuales como para el total de la información, R² mejora apreciablemente con respecto a los de la ecuación 1-37A (tabla 14 y Fig. 10).

TABLA 14
ESTADÍSTICO BONDAD DE AJUSTES $|E^*|$ MEZCLAS INDIVIDUALES Y TODAS LAS MEZCLAS ECUACIÓN 1-37A AJUSTADA

Mezcla	Sy	Se	Se/Sy	R ²
M1	6960.9	807.9	0.1161	0.9870
M2	6738.1	531.8	0.0789	0.9940
M3	5439.6	1128.9	0.2075	0.9584
M4	5284.6	731.6	0.1384	0.9815
M5	5553.4	925.4	0.1666	0.9732
M6	6477.6	865.9	0.1337	0.9827
M7	3806.0	214.4	0.0563	0.9969
IDU1	7289.4	1250.7	0.1716	0.9716
IDU2	8914.7	1155.1	0.1296	0.9847
Todas	6170.2	861.0	0.1395	0.9831

Fuente: Propia

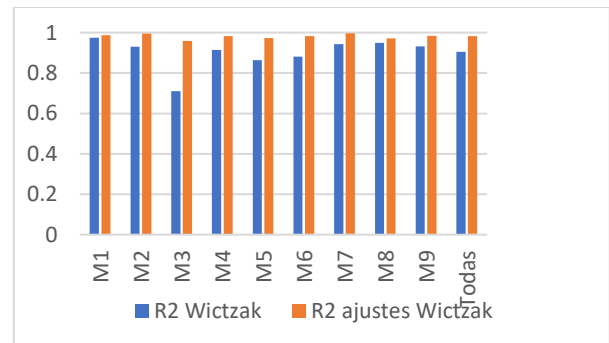


Fig. 10 Módulo $|E^*|$ predicho con ecuación 1-37A ajusta y Módulo $|E^*|$ medido

Fuente: Propia

El coeficiente del error C, como estadístico de control de la bondad del ajuste, ratifica que con los coeficientes optimizados con datos locales de la caracterización de las mezclas asfálticas, se puede disponer de ecuaciones con mejor grado de precisión y exactitud que la general de la nueva Guía MEPDG de la AASHTO (tabla 15).

TABLA 15
VALOR DEL COEFICIENTE DEL ERROR DE PREDICCIÓN PARA DIVERSAS TEMPERATURAS CON ECUACIÓN 1-37A OPTIMIZADA

Temperatura °C (°F)	14	40	70	100	130	14 a 130
Coeficiente del error	0.05	0.07	0.18	0.28	0.38	0.09

Fuente: Propia

E) Correlación entre las Variables de Predicción

El coeficiente de correlación de Spearman mide el grado de asociación entre dos variables (correlación lineal). El rango del parámetro es -1 a 1, siendo el valor -1 para correlaciones fuertes negativas y el valor 1 para correlaciones fuertes positivas. Un valor de cero indica ninguna correlación entre los datos [22]. Con las variables usadas en la ecuación de predicción Witczak 1- 47A se analiza el valor del coeficiente de Spearman. Se incluye, en el análisis, el valor de los vacíos en el agregado mineral (VMA, %), por ser considerados en la ecuación de predicción de Hirsch [23].

Las variables viscosidad, temperatura (T en °F) y frecuencia de carga muestran una correlación muy fuerte con respecto al valor de modulo dinámico |E*|, seguido de los vacíos con aire (Va) y los retenidos acumulados en el tamiz numero 4 (r4) y los VMA. Los otros valores son de menor significancia (fig. 11)

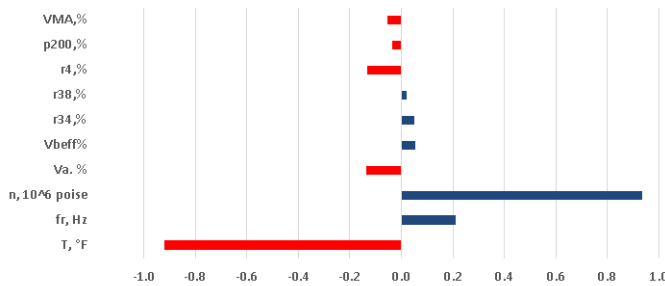


Fig. 11 Correlación de rango de Spearman con datos de caracterización de mezcla y |E*| medido
Fuente: Propia

IV. PROPUESTA DE ECUACIÓN NO SIGMOIDAL

Si bien la ecuación de tipo sigmoïdal es apta y útil para los propósitos de elaboración de curvas maestras y de estimación de los módulos dinámicos, con la técnica de optimización multivariado no lineal (MNL), se puede obtener ecuaciones que serían útiles, particularmente en los niveles de datos 2 y nivel 3, así como en prediseños y diseños de menor significancia, especialmente en regiones donde se dispone de

escaso acceso a ensayos y métodos semejantes a los recomendados en la Guía MEPDG.

Empleado el programa ndCurveMaster7.1 se presenta un modelo de ecuación de predicción de |E*| con parámetros de ajustes adecuados al propósito señalado.

La fig. 11 de |E*| muestra que la correlación es adecuada. La ecuación Ec34 se obtuvo por proceso de optimización a través de una regresión múltiple no lineal, con los datos de este proyecto. En la tabla 16 se registran los coeficientes de la ecuación.

Ec 34

$$|E^*| = a_1 T_F^{1.55} + a_2 f^{1/12} + a_3 \eta^{0.03} + a_4 p_4^{3.35} + a_5 (e^{p_{200}})^{-1} + a_6 (VMA)^{5.25} + a_7 (VMA)^{1/11}$$

En esta ecuación se incluye el parámetro de T_F, que es la temperatura de la mezcla, con lo que se obtiene un mejor ajuste. La viscosidad η es medida como 10⁶ poise.

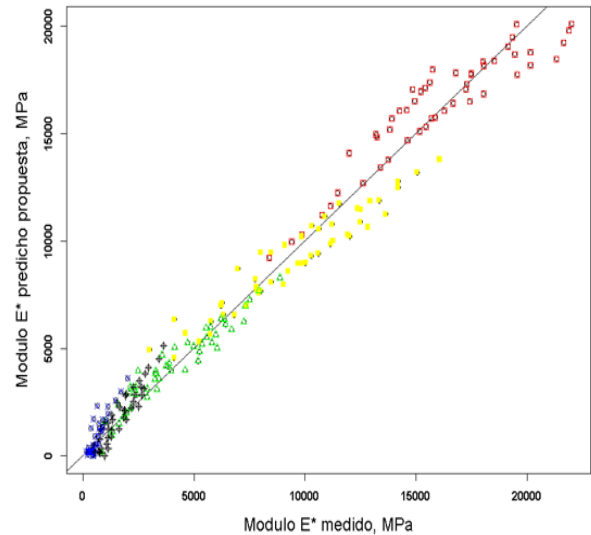


Fig. 12 Módulo |E*| predicho con ecuación no sigmoïdal y Módulo |E*| medido
Fuente: Propia

TABLA 16
COEFICIENTES DE ECUACIÓN PROPUESTA

a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈
3.61871	6279.37	52705.9	-0.00276467	2.76E+06	0.000627479	55253.2	2.74E-142

Fuente: Propia

Los valores obtenidos de los coeficientes del error (C) son bajo y los coeficientes de regresión del ajuste (R²) son satisfactorios y considerados como altos, estos se muestran en las tablas 17 y 18 respectivamente.

TABLA 17

VALOR DEL COEFICIENTE DEL ERROR DE PREDICCIÓN PARA DIVERSAS TEMPERATURAS CON ECUACIÓN NO SIGMOIDAL PROPUESTA

Temperatura °C, (°F)	-10 (14)	4.4 (40)	21.1 (70)	37.7 (100)	54.4 (130)	-10 a 54.4 (14 a 130)
Coefficiente del error	0.05	0.09	0.11	0.31	0.57	0.10

Fuente: Propia

TABLA 18

ESTADÍSTICO BONDAD DE AJUSTES |E*| MEZCLAS INDIVIDUALES Y TODAS LAS MEZCLAS ECUACIÓN NO SIGMOIDAL

Mezcla	Sy	Se	Se/Sy	R ²
M1	6960.9	1034.2	0.1486	0.9787
M2	6725.3	952.9	0.1417	0.9806
M3	5335.2	505.3	0.0947	0.9913
M4	5284.6	960.5	0.1818	0.9681
M5	5553.4	1073.5	0.1933	0.9639
M6	6477.6	982.6	0.1517	0.9778
M7	3805.9	425.3	0.1118	0.9879
IDU1	7289.4	1113.8	0.1528	0.9775
IDU2	8914.7	1762.3	0.1977	0.9645
Todas	6170.2	919.6	0.1490	0.9779

Fuente: Propia

V. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

- La cargas vehiculares actuales y las características de las mezclas asfálticas fabricadas con materiales que mejoran su desempeño sobrepasaron los alcances de los métodos empíricos de diseño de pavimentos como el de la AASHTO -93 [24].

- La Metodología de diseños de pavimentos MEPDG de la AASHTO de carácter Empírico – Mecanístico considera el módulo dinámico de las mezclas asfálticas |E*| como una de las propiedades más importantes de las mezclas asfálticas, debido a que determina la respuesta tenso-deformación de esta capa bajo acciones de cargas externas como tráfico y medioambientales.

- En los niveles de información del diseño 2 y 3, la nueva Guía permite la utilización de ecuaciones de predicción del módulo dinámico. Las ecuaciones recomendadas en esta metodología son las desarrolladas por Witczak y sus colegas, denominadas 1-37A y 1-40D por la versión de la Guía. Algunas entidades vienen haciendo ajustes a las ecuaciones de la MEPDG de la AASHTO y elaborando curvas de correlaciones que proporcionan mejores coeficientes de ajuste estadísticos para el módulo dinámico |E*|, utilizando como base la ecuación de Witczak 1- 37A y 1-40D [2].

- En este estudio realizado con 9 mezclas diferentes y una variedad de cinco (5) cementos asfálticos, se presentaron dos metodologías de ajustes de la ecuación de predicción del módulo dinámico |E*|. La primera correspondió al ajuste de los coeficientes de la ecuación de Witczak 1-37A por optimización

numérica, utilizando la función Solver de Excel; la segunda metodología, por medio de regresión no lineal multivariada y desarrollando una ecuación no sigmoïdal.

- El análisis comparativo de parámetros estadísticos de bondad del ajuste, como el coeficiente de correlación (R²) obtenido de la ecuación 1-37A y de la ecuación ajustada con Solver muestran que se pueden obtener mejores resultados de predicción del módulo dinámico |E*|, considerando las condiciones locales de la mezcla. Esto se documenta en la tabla 18. El agrupamiento de los valores cerca a la recta de igualdad (lo que denota un mejor ajuste) es mayor en la ecuación ajustada que en la original de Witczak, tal como se muestra en la fig. 13.

TABLA 19

COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE COEFICIENTES DE AJUSTES (R²) ECUACIÓN 1-37* ORIGINAL Y AJUSTADA

Mezcla	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	Tods.
R ² (1-37A)	0.973	0.929	0.710	0.915	0.864	0.881	0.942	0.949	0.931	0.904
R ² (1-37A ajust.)	0.987	0.994	0.959	0.981	0.973	0.982	0.997	0.970	0.984	0.983

Fuente: Propia

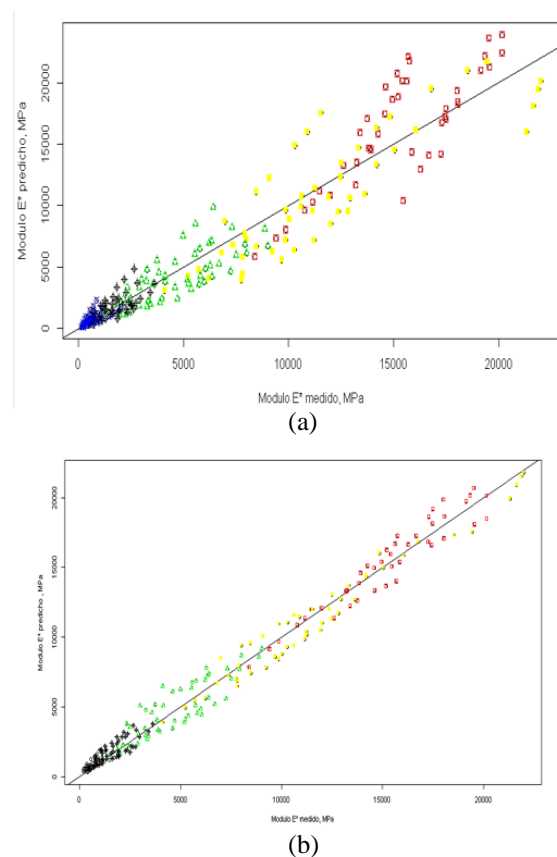


Fig. 13 Comparación de predicción (a) |E*| ecuación 1-37A original y (b) ecuación 1-37A ajustada

Fuente: Propia

- Para plantear una ecuación no sigmoïdal, en este artículo, se hizo el análisis de fuerza de correlación de las variables predictivas por medio del coeficiente de correlación de

Spearman y se verificó la importancia de los parámetros *viscosidad, temperatura y frecuencia de aplicación de cargas*, y la menor capacidad predictiva de los vacíos con aire (Va) y del porcentaje retenido acumulado en la malla No. 4. Los parámetros de menor fuerza de correlación fueron los pasa malla No. 200 (p200) y la porción granular retenida en la malla 3/8” (r38), en este último parámetro influyó, tal vez, la escasa información disponible sobre mezclas gruesas.

- El análisis y construcción de la ecuación no sigmoideal se realizó con un programa comercial (ndCurveMaster7.1) por medio de técnicas de regresiones multivariadas no lineales, obteniendo un ajuste aceptable; por lo que se considera que para efecto de la práctica, se podría utilizar este tipo de ecuaciones, que son similares a las anteriormente propuestas por el Instituto del Asfalto e investigadores como Witczak y Wang [25].

- La metodología propuesta en este artículo muestra el potencial de uso de técnicas de ajustes para obtener ecuaciones de predicción del módulo dinámico $|E^*|$ para los niveles de información 2 y 3 de diseño con metodología empírico – mecánico y que en asocio con otro tipo de ecuaciones accesibles como la de correlación de la viscosidad con el ensayo de penetración, referenciada en la Guía de diseño MEPDG de la AASHTO, son de gran utilidad en los diseños modernos de pavimentos.

- Estas metodologías de ajustes son de mayor precisión y utilidad en la medida que se obtiene más información de las mezclas y su caracterización, ampliando la base de datos.

Otra técnica a considerar y no tratada en este artículo, son las redes neuronales, que muestran resultados más eficientes que otros procesos numéricos [26].

VI. REFERENCIAS

- [1] P. Pereira and J. Pais, “Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method,” *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 4, no. 4, pp. 316–346, 2017.
- [2] C. Chang, J. Vidal, L. Loria, M. Busto, and R. Delgadillo, “IAG239-03-2013 Aplicabilidad del Metodo Mecanicista -Empirico de Diseño de pavimentos (MEPDG) AASHTO 2008 en latinoamerica,” 2013.
- [3] A. Mateos, J. P. Ayuso, and B. C. Jáuregui, “Evolution of asphalt mixture stiffness under combined effects of damage, aging, and densification under traffic,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2304, no. December 2016, pp. 185–194, 2012.
- [4] M. Á. Moreno and J. B. Soares, “El módulo dinámico de la mezcla bituminosa: importancia, evaluación y estimación,” *Asf. y Paviment.*, vol. V, no. 16, pp. 9–19, 2015.
- [5] H. Yu and S. Shen, “An investigation of dynamic modulus and flow number properties of asphalt mixtures in Washington State,” *Rep. No. TNW*, no. 709867, 2012.
- [6] C. E. Dougan and J. E. Stephens, “E * - Dynamic Modulus Test Protocol – Problems and Solutions Date Prepared by James Mahoney Gilbert Hansen , Graduate Assistant University of Connecticut Report Number This pooled-funds project was managed by the Connecticut Department of Transportation i,” *Asphalt*, 2003.
- [7] AASHTO-T342, “Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA),” pp. 1–18, 2012.
- [8] S. Deepa, U. Saravanan, and J. Murali Krishnan, “On measurement of dynamic modulus for bituminous mixtures,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 20, no. 9, pp. 1073–1089, 2019.
- [9] H. Di Benedetto, M. N. Partl, L. Francken, C. D. La Roche, and S. André, “Stiffness testing for bituminous mixtures. RILEM technical committees 182-PEB performance testing and evaluation of bituminous materials,” *Mater. Struct.*, vol. 34, no. March, pp. 66–70, 2001.
- [10] M. Robbins, “An Investigation into Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt and Its Contributing Factors,” Auburn University, 2009.
- [11] G. Garcia and M. Thompson, “HMA Dynamic modulus predictive models-a review,” 2007.
- [12] M. Robbins, R. Turochy, and D. Timm, “An Investigation into Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt and Its Contributing Factors,” *Design*, 2009.
- [13] F. Leiva, “Modulo Dinamico De Mezclas Asfálticas,” p. 14, 2004.
- [14] Federal Highway Administration—, “LTPP Computed Parameter: Dynamic Modulus,” vol. FHWA-HRT-1, no. Federal Highway Administration—Office of Research, Development, and Technology: LTPP, 2015.
- [15] T. K. Pellinen, M. W. Witczak, and R. F. Bonaquist, “Asphalt Mix Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with Non-Linear Least Squares Optimization,” in *Geotechnical Special Publication*, 2003, pp. 83–101.
- [16] A. E. Krauklis, A. G. Akulichev, A. I. Gagani, and A. T. Echtermeyer, “Time-temperature-plasticization superposition principle: Predicting creep of a plasticized epoxy,” *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 11, 2019.
- [17] M. W. Witczak and J. Bari, “Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures Arizona State, Research Project Javed Bari July 2004,” Arizona State University, 2004.
- [18] N. M. Rais, M. Y. Ab. Wahab, I. R. Endut, and A. Ab. Latif, “Dynamic modulus master curve construction using the modified MEPDG model,” *Proc. - 1st Int. Conf. Artif. Intell. Model. Simulation, AIMS 2013*, vol. 0, pp. 212–216, 2014.
- [19] H. Ceylan, C. W. Schwartz, S. Kim, and K. Gopalakrishnan, “Accuracy of predictive models for dynamic modulus of hot-mix asphalt,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 21, no. 6, pp. 286–293, Jun. 2009.
- [20] S. P.-R. S. Medina-Peralta , L. Vargas-Villamil, J. Navarro-Alberto, C. Canul-Pech, “Comparación de

medidas de desviación para validar modelos sin sesgo , sesgo constante o proporcional,” vol. 26, no. 3, pp. 255–263, 2010.

- [21] Instituto para el Desarrollo de los Pavimentos en el Peru, *La Nueva Guía para el Diseño Empírico-Mecanicista de Pavimentos - Parte 2 Capítulo 2 - Materiales*. 2005.
- [22] L. Restrepo and J. González, “From Pearson to Spearman,” *Rev. Colomb. Ciencias Pecu.*, vol. 20, no. 2, pp. 183–192, 2007.
- [23] M. Słowik and M. Bartkowiak, “Review of analytical-empirical methods for determining stiffness moduli of asphalt mixtures,” *Roads Bridg. - Drog. i Most.*, vol. 17, no. 1, pp. 5–22, 2018.
- [24] A. A. Aguib, “Flexible Pavement Design AASHTO 1993 versus Mechanistic-Empirical Pavement Design,” The American University in Cairo, 2013.
- [25] Y. H. Huang, *Pavement analysis and design*, Second edi. 2004.
- [26] G. S. Moussa and M. Owais, “Pre-trained deep learning for hot-mix asphalt dynamic modulus prediction with laboratory effort reduction,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 265, p. 120239, 2020.