



PREDICCIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MODELO DE WITCZAK

Preparado por
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

Ing. Fabián Elizondo

Coordinador de Laboratorios de Infraestructura Vial
Miembro del comité de investigación aplicada en pavimentos
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
Tel: (506) 2074382
E-mail: felizondo@lanamme.ucr.ac.cr

Ing. Álvaro Ulloa

Research assistant in pavements and materials.
Department of Civil and Environmental Engineering.
University of Nevada Reno
747 Washington St. Reno, Nevada 89503
Tel: (775) 3222641
E-mail: ulloaa@unr.nevada.edu

Ing. Gustavo Badilla

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
Tel: (506) 2074994
E-mail: gbadilla@lanamme.ucr.ac.cr
San José, Costa Rica
Setiembre 2007

Resumen

Los módulos resilientes de mezclas asfálticas ha sido un insumo básico en las guías de diseño estructural de pavimentos. Actualmente, los nuevos métodos de diseño mecánicos, prestan especial importancia a este parámetro por tratarse de una característica fundamental que define en gran medida las características estructurales de un pavimento y por lo tanto su diseño estructural.

La complejidad de integrar el módulo resiliente dentro de una metodología de diseño estructural de manera más realista, involucra tomar en cuenta aquellas características o condiciones que afectan su comportamiento o respuesta. En este sentido se reconoce la temperatura, velocidad de carga, compactación, composición de la mezcla asfáltica y envejecimiento como factores que afectan al módulo resiliente.

El alcance o precisión en que deben ser integrados los módulos resilientes al diseño estructural, dependerá de la importancia del proyecto específico. Por lo tanto, proyectos muy importantes requerirán la valoración del módulo resiliente específico de la mezcla asfáltica a colocar en el proyecto, mientras que proyectos de menor importancia podrán ser diseñados mediante módulos resilientes obtenidos de modelos de predicción.

El modelo de Witczak para la predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas, ha tenido gran respaldo entre la comunidad técnica por su capacidad de predecir los módulos con suficiente precisión; basado en características de la mezcla asfáltica, tales como; granulometría, asfalto efectivo y vacíos; y condiciones externas; temperatura, velocidad de carga y envejecimiento.

Este proyecto de investigación tiene como objetivo definir si el modelo de Witczak es aplicable a las condiciones y mezclas asfálticas de Costa Rica, comparando estadísticamente los módulos resilientes reales obtenidos en el laboratorio, con los módulos calculados mediante este modelo, de encontrar diferencias significativas se iniciará un proceso de calibración del modelo para nuestras condiciones. Lo anterior como insumo dentro de la nueva Guía de Diseño de Pavimentos para Costa Rica.

1 Introducción

El módulo del pavimento (*Resiliente* o *Dinámico*) es una propiedad importante del material en cualquier procedimiento mecanístico de diseño y análisis de pavimentos flexibles. De hecho, el módulo resiliente es la propiedad del material requerido en el procedimiento empírico de diseño de la Guía de Diseño AASHTO 1993 (Ref. 1) y es uno de los principales parámetros de entrada en la Guía de Diseño Mecanístico – Empírico 2002 (Ref. 2). El parámetro módulo se ha constituido como un elemento fundamental en el diseño de pavimentos; por lo que ha sido introducido como un elemento que caracteriza de manera racional el comportamiento *esfuerzo – deformación* de los materiales que conforman la estructura.

El módulo en mezclas asfálticas es altamente sensible a la temperatura y a la razón de aplicación de carga. Debido a que el asfalto es un material viscoelástico, el módulo de una mezcla asfáltica puede aproximarse a una material granular sin compactar a altas temperaturas y razón lenta de aplicación de carga (por ejemplo, velocidades bajas de vehículos). Por otro lado, a temperaturas bajas y razones pequeñas de aplicación de carga, el material puede tener un comportamiento elástico con valores de módulo cercanos a materiales de concreto de cemento Pórtland.

De esta manera el módulo es función de la temperatura, razón de carga, envejecimiento y características de la mezcla como viscosidad y contenido del ligante, granulometría del agregado y vacíos. Para contabilizar los efectos de la temperatura y la razón de carga en el módulo de la mezcla asfáltica, se desarrolló el concepto de la curva maestra.

En las consideraciones de diseño, la Guía de Diseño AASHTO 2002 emplea varios niveles de diseño que conforme a la importancia relativa, magnitud y costos del proyecto. El Nivel 1 involucra normalmente la compresión y análisis de ensayos de laboratorio y campo del proyecto en particular. En contraste, el Nivel 3 requiere una estimación del diseñador de las principales propiedades de los materiales basada en la experiencia y con un poco o ningún ensayo. El Nivel 2, es un nivel intermedio en el cual se cuenta con estimaciones obtenidas de correlaciones con otros materiales que son medidas en laboratorio o en campo

1.1 Curva maestra del módulo dinámico

En el diseño mecanístico-empírico el módulo de una mezcla asfáltica, para todos los niveles de entrada, se obtiene a partir de una curva maestra. La curva maestra se construye utilizando principios de superposición tiempo de carga (frecuencia)-temperatura, lo cual consiste en realizar ensayos de módulos dinámicos a diferentes temperaturas y frecuencias, luego se selecciona una temperatura estándar de referencia (en este caso 21 ° C (70 °F)) y, posteriormente los datos de las diferentes temperaturas, se desplazan horizontalmente con respecto al tiempo de carga hasta que las curvas se unan en una única función suavizada, como se muestra en la **figura 1**. La curva maestra del módulo como función del tiempo de carga describe entonces, la dependencia del material con el tiempo; lo cual permite al ingeniero diseñador tomar en cuenta, no solamente la temperatura propia de la zona, sino también la velocidad de los vehículos, en la respuesta estructural que la mezcla asfáltica pueda brindar.

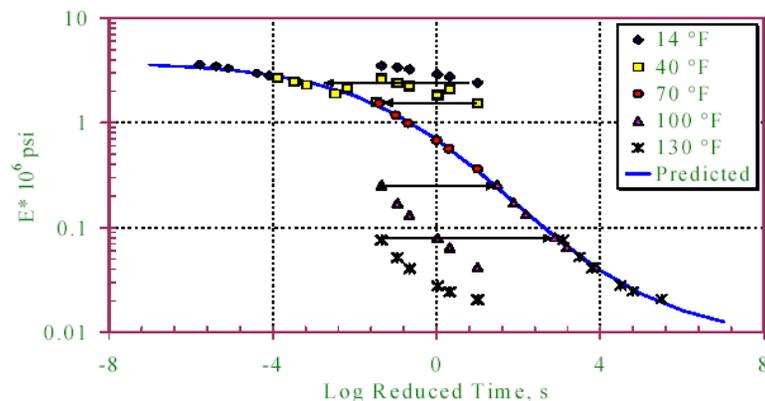


Figura 1: Curva maestra del módulo dinámico (E^*) (Ref. 2).

La magnitud del ajuste o desplazamiento de cada dato de temperatura requerido para formar la curva maestra describe la dependencia del material con la temperatura. Y viene definido por un factor de ajuste, el cual se muestra en la siguiente ecuación:

$$a(T) = \frac{t}{t_r} \quad (1.1)$$

$$\log(t_r) = \log(t) - \log \left[a(T) \right] \quad (1.2)$$

donde:

$a(T)$ = factor de ajuste como una función de la temperatura de interés

t = tiempo de carga a la temperatura deseada

t_r = tiempo de carga a la temperatura de referencia

T = temperatura

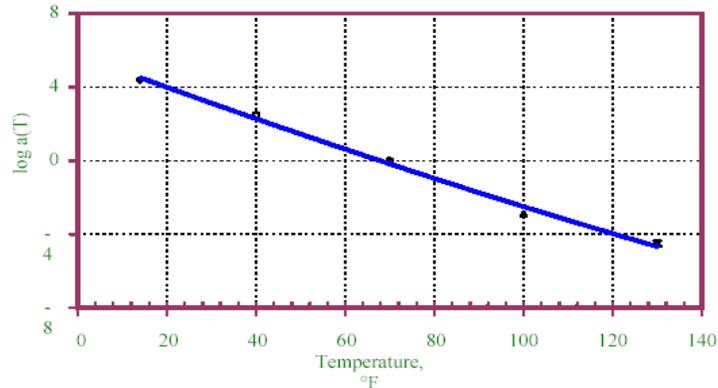


Figura 2: Factores de ajuste para construir la curva maestra del módulo dinámico (E^*) (Ref. 2)

Por su parte, la curva maestra del módulo como una función del tiempo de carga se modela matemáticamente así:

$$\text{Log}|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t_r)}} \quad (1.3)$$

donde:

t_r = tiempo reducido de carga a la temperatura de referencia.

δ = valor mínimo de E^* .

$\delta + \alpha$ = valor máximo de E^* .

β, γ = parámetros que describen la forma de la función senoidal.

Los parámetros de ajuste δ y α dependen de la granulometría del agregado, contenido del ligante y vacíos. Los parámetros de ajuste β y γ dependen de las características del ligante asfáltico y la magnitud δ y α .

De esta forma, utilizando las ecuaciones 1.1 o 1.2, para una determinada temperatura y tiempo de carga, es posible calcular un tiempo de carga de referencia, que puede emplearse en la ecuación 1.3 y determinar así la respuesta (módulo de la mezcla) a ese tiempo de carga y temperatura de referencia.

Para análisis en el Nivel 1, las curvas maestras y los correspondientes factores de ajuste son desarrollados experimentalmente con ensayos de módulos dinámicos a diferentes frecuencias y temperaturas para la mezcla asfáltica particular que se desea estudiar.

Por su parte, en lugar de datos de ensayos de laboratorio de módulos dinámicos, para los niveles de entrada 2 y 3, Witczak y Fonseca propusieron un modelo empírico de predicción del módulo de una mezcla asfáltica. El modelo propuesto para las curvas maestras fue generado a partir de una gran cantidad de datos, aproximadamente 1429 puntos de 149 mezclas asfálticas diferentes. Posteriormente a este primer modelo se le agregaron mejoras, que tomaban en cuenta los efectos de endurecimiento por envejecimiento a corto y largo plazo, así como condiciones extremas de temperatura. De esta manera se generó un modelo que de acuerdo a la granulometría de la mezcla, propiedades volumétricas de la misma, características del ligante asfáltico (viscosidad) y frecuencia de aplicación de carga, fue posible obtener una buena aproximación del módulo de la mezcla asfáltica.

La ecuación de Witczak presenta la posibilidad para predecir el módulo dinámico de mezclas asfálticas en un rango de temperaturas (-17,7 a 54,4 °C), frecuencia de cargas (0,1 a 25 Hz) y condiciones de envejecimiento con información disponible de las especificaciones de los materiales o diseño volumétrico de la mezcla. Además se puede presentar en su forma senoidal como la ecuación 1.4.

$$\log E^* = 3,750063 + 0,02932 \rho_{200} - 0,001767 (\rho_{200})^2 - 0,002841 \rho_4 - 0,058097 V_a - 0,802208 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + \frac{3,871977 - 0,0021 \rho_4 + 0,003958 \rho_{38} - 0,000017 (\rho_{38})^2 + 0,005470 \rho_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,31335 \log(f) - 0,393532 \log(\eta))}} \quad (1.4)$$

donde:

E^* = módulo dinámico, psi.

η = viscosidad del asfalto al envejecimiento y temperatura de interés, 10^6 Poise.

$$\eta = \frac{G^*}{10} \left(\frac{1}{\sin \delta} \right)^{4,8628}$$

f = frecuencia de carga, Hz.

V_a = Contenido de vacíos de aire, %.

- V_{beff} = Contenido de asfalto efectivo, % por volumen.
- ρ_{34} = Porcentaje retenido acumulado en la malla de 19 mm (3/4 pulg).
- ρ_{38} = Porcentaje retenido acumulado en la malla de 9,53 mm (3/8 pulg).
- ρ_4 = Porcentaje retenido acumulado en la malla No 4.
- ρ_{200} = Porcentaje pasando en la malla No 200.

Viscosidad del ligante asfáltico

La viscosidad del ligante asfáltico a la temperatura de interés es un parámetro de entrada crítico para la ecuación de Witczak y para determinar los factores de ajuste mencionados anteriormente. Para la **condición sin envejecimiento**, la viscosidad se determina según la norma ASTM, con la siguiente ecuación:

$$\log \log \eta = A + VTS \log T_R \quad (1.5)$$

donde:

- η = viscosidad, cP.
- T_R = temperatura, Ranking. $T_R = 9/5 * (^{\circ}\text{C}) + 491,67$
- A = Intercepto de la regresión
- VTS = pendiente de la regresión de la susceptibilidad a la temperatura de la viscosidad.

Para un nivel de entrada 1, los parámetros A y VTS se pueden estimar utilizando ensayos dinámicos de cortante en el reómetro. En forma alternativa, y para todos los niveles, los parámetros se pueden obtener a partir de una serie de ensayos convencionales, incluyendo viscosidad, punto de ablandamiento y penetración.

Envejecimiento del asfalto

Se debe prever el efecto que describe el cambio de la viscosidad que ocurre tanto durante los procesos de mezclado y compactación como el envejecimiento a largo plazo in situ. Para poder tomar en cuenta el **envejecimiento a corto plazo** se cuantifica la razón de endurecimiento (HR) mostrada en la Tabla 1 y se genera la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \log \log(\eta_{t=0}) &= a_0 + a_1 \log \log(\eta_{orig}) \\ a_0 &= 0,054405 + 0,004082 \times \text{código} \\ a_1 &= 0,972035 + 0,010886 \times \text{código} \end{aligned} \quad (1.6)$$

donde:

$\eta_{t=0}$ = viscosidad luego del mezclado/colocación, cP.

η_{orig} = viscosidad original, cP.

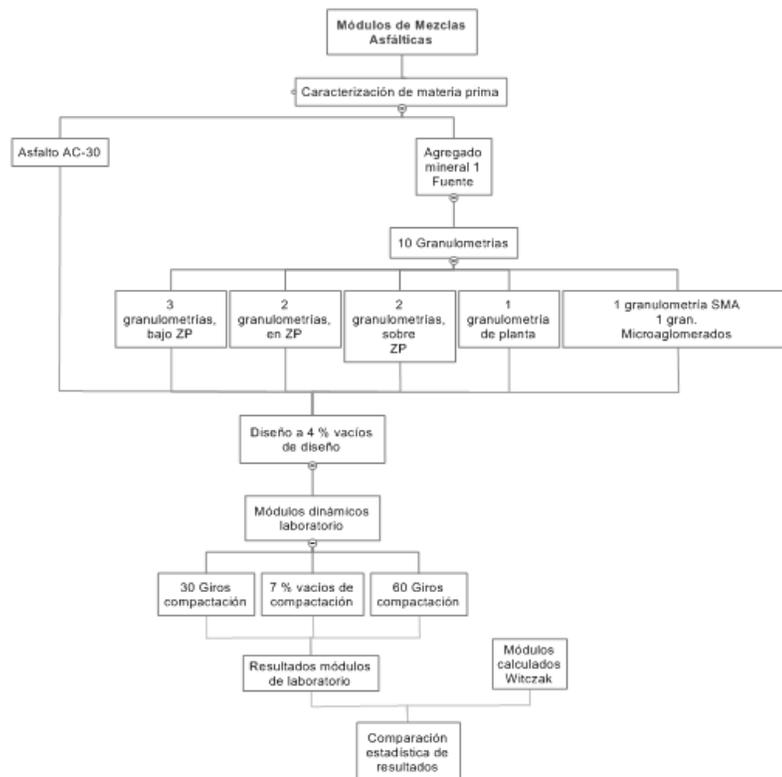
Código = razón de endurecimiento (HR) de la división del loglog [$\eta_{t=0}$ (RTFOT)] entre loglog (η_{orig}); igual a 0 como promedio.

Resistencia al endurecimiento mezclado/colocación	Valores esperados de razón de endurecimiento	Valor de código
Excelente a bueno	$HR \leq 1,030$	-1
Promedio	$1,030 \leq HR \leq 1,075$	0
Regular	$1,075 \leq HR \leq 1,100$	1
Pobre	$HR > 1,100$	2

Tabla 1: Valores de códigos recomendados (Ref. 2)

2 ETAPAS Y ACTIVIDADES DEL PROYECTO

Para la realización del presente proyecto de investigación se planteó el siguiente esquema o diagrama de investigación:



ZP: Zona de prevención

Figura 3: Diagrama experimental

2.1 Caracterización de la materia prima

En este estudio se utilizó un solo tipo de material proveniente de una fuente de agregado y un solo tipo de ligante asfáltico (asfalto AC-30).

2.1.1 Ligante asfáltico

Para los diseños analizados se empleó un ligante asfáltico AC-30 cuya caracterización y clasificación por grado de desempeño se muestra a continuación:

Ligante	Fecha de muestreo	Punto de muestreo	Temperatura de muestreo		
			Tracto	Promedio	Desviación
AC-30	30/06/2003 al 08/07/2003	Planta MECO, la Uruca	1	144.5	0.5
			2	147.5	0.8
			3	147.0	0.9

Tabla 2: Ligante asfáltico del proyecto

Estado de envejecimiento	Propiedad	Unidad	Ligante asfáltico AC-30
Original	Densidad a 25°C	g/cm ³	1.030
	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	3330
	Viscosidad cinemática a 125°C	centiPoise	961
	Viscosidad cinemática a 135°C	centiPoise	565
	Viscosidad cinemática a 145°C	centiPoise	347
RTFOT	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	11512
	Viscosidad cinemática a 125°C	centiPoise	1712
	Viscosidad cinemática a 135°C	centiPoise	938
	Viscosidad cinemática a 145°C	centiPoise	550

Tabla 3: Propiedades físicas del ligante asfáltico

Propiedad	Unidad	Ligante asfáltico AC-30
Índice VTS	-	3.43
Intercepto de regresión de susceptibilidad térmica	-	10.26

Tabla 4: Susceptibilidad térmica "Susceptibilidad Viscosidad-Temperatura (VTS)"

2.1.2 Curvas granulométricas

Con la finalidad de abarcar un amplio espectro de granulometrías se tomó en cuenta la zona de prevención; de esta manera se generaron 3 curvas granulométricas que

pasaran por debajo de la zona de prevención, 2 curvas granulométricas en medio de la zona de prevención, 2 curvas granulométricas que pasaran justamente por la zona de prevención, 1 granulometría SMA (Stone Matriz Asphalt), 1 granulometría de micro aglomerados y finalmente una granulometría de planta representativa de la que habitualmente se utiliza en Costa Rica. La siguiente figura ilustra las granulometrías empleadas. También aparece la curva de máxima densidad SUPERPAVE para mezclas de 19 mm.

Malla ASTM	Malla (mm)	Granulometrías estudiadas									
		Bajo la zona de prevención			En medio de la zona de prevención		Por encima de la zona de prevención		Micro	SMA	Planta
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
3/4	19.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/2	12.5	95	100	90	95	95	98	90	100	90	95
3/8	9.5	88	95	78	90	90	92	65	81	45	79
N°4	4.75	37	62	40	45	70	67	45	32	28	48
N°8	2.36	28	33	32	37	50	47	42	27	23	32
N°16	1.18	20	23	20	29	27	32	37	22	22	22
N°30	0.60	13	16	14	22	15	23	30	18	19	16
N°50	0.30	9	12	9	14	8	17	20	14	16	12
N°100	0.15	7	9	7	9	6	12	12	10	13	8
N°200	0.075	5	7	6	6	5	8	5	8	10	5

Tabla 5: Granulometrías estudiadas

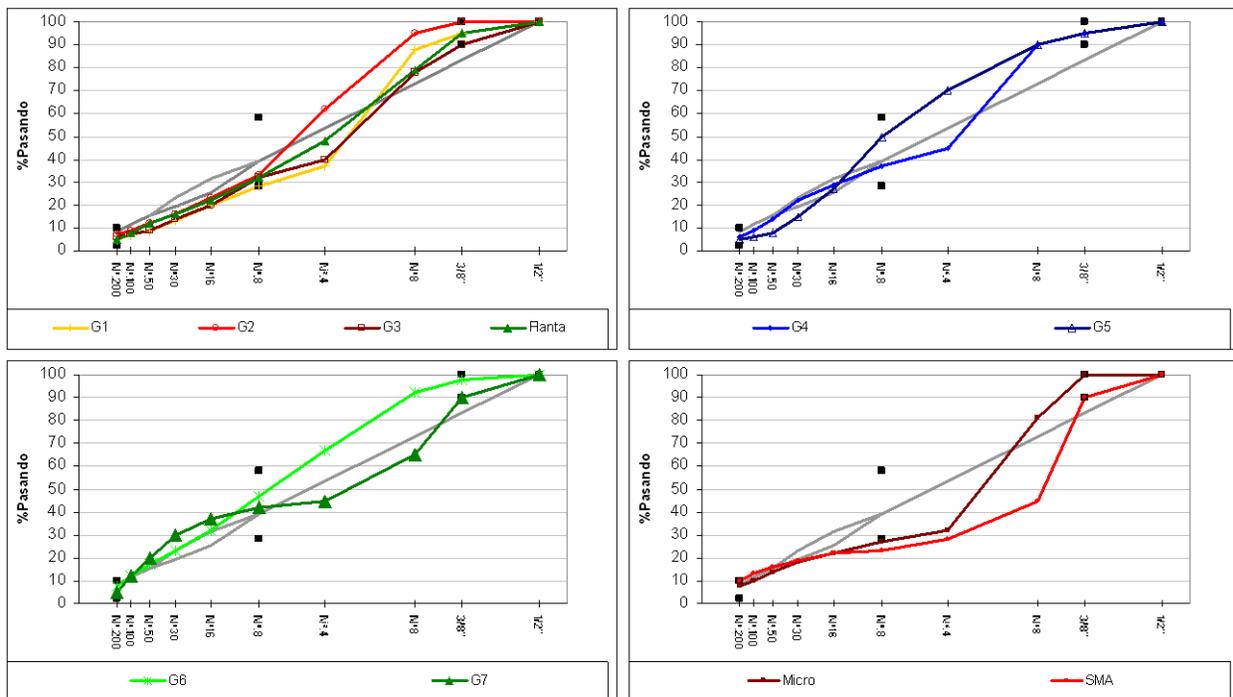


Figura 4: Curvas granulométricas estudiadas

2.1.4 Diseño de mezcla

En esta etapa de la investigación se procedió a realizar los diseños de mezcla para el asfalto AC-30 estudiado y para cada una de las granulometrías seleccionadas de una única fuente de agregado, proveniente de la zona de Guápiles y que constituye unas de las principales fuentes de agregados empleadas para pavimentos asfálticos en Costa Rica.

Característica Granulometría	Granulometría	Metodología Diseño	Va	Pb (PTA)	Pb (PTM)	Pbe	VMA	VFA
Bajo la zona de prevención	G1	SUPERPAVE	4.0%	7.20	6.80	5.7	17.3	77.7
		Marshall	4.0%	6.41	6.02	5.2	15.7	74.7
	G2	SUPERPAVE	4.0%	7.40	6.90	6.1	17.4	76.1
		Marshall	4.0%	6.84	6.40	5.5	16.5	75.8
	G3	SUPERPAVE	4.0%	6.40	6.00	5.3	15.7	73.4
		Marshall	4.0%	6.01	5.67	4.8	15.2	71.9
En medio de la zona de prevención	G4	SUPERPAVE	4.0%	5.50	5.30	4.3	12.1	73.2
		Marshall	4.0%	5.44	5.16	4.2	13.9	69.5
	G5	SUPERPAVE	8.0%	7.50	7.00	6.0	20.9	61.6
		Marshall	8.8%	6.50	6.10	5.1	20.1	55.5
Por encima de la zona de prevención	G6	SUPERPAVE	4.0%	5.50	5.20	4.4	14.1	72.1
		Marshall	4.0%	5.84	5.52	4.4	14.5	70.5
	G7	SUPERPAVE	4.0%	5.00	4.80	3.3	12.3	63.2
		Marshall	4.0%	5.50	5.21	4.1	13.7	70.5
Micro	G8	SUPERPAVE	4.0%	5.60	5.30	4.3	14.1	78.7
		Marshall	4.0%	5.99	5.65	4.5	14.8	71.0
SMA	G9	SUPERPAVE	4.0%	4.90	4.70	3.7	12.4	68.9
		Marshall	4.0%	5.19	4.93	4.0	13.3	71.0
Planta	G10	SUPERPAVE	4.0%	6.00	5.70	4.8	15.0	73.0
		Marshall	4.0%	5.65	5.35	4.5	14.5	71.1

Tabla 6: Resumen de resultados de los diseños de mezcla estudiados

2.1.5 Determinación de módulos dinámicos

Una vez que se obtuvo los resultados de los diseños de mezcla, se procedió a fabricar los especímenes por cada granulometría de acuerdo con la norma ASTM D 3496 “Practice for Preparation of Bituminous Specimens for Dynamic Modulus Testing” y luego se realizan los ensayos según la norma ASTM D3497 “Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures”. Según lo establece el procedimiento de ensayo, los especímenes deben ser compactados en un compactador giratorio SGC. Con la finalidad de evaluar el efecto que podrían obtenerse por variaciones en el contenido de vacíos de compactación, se procedió a evaluar especímenes con 3 distintas energías de compactación, a saber:

- 30 giros de compactación

- 80 giros compactación, y
- tercer punto obtenido al compactar el espécimen para obtener 7.0% vacíos de compactación, aproximadamente.

Finalmente, se determinó el módulo dinámico para 5 temperaturas de ensayo (-5, 5, 20, 40 y 55 °C, aproximadamente) y 6 frecuencias de carga (0.1, 0.5, 1, 5, 10 y 25 Hz.

3 INTERPRETACIÓN, EVALUACIÓN Y APLICACIÓN

3.1 Obtención de curvas maestras del módulo dinámico

Con los resultados obtenidos de los ensayos de módulo dinámico es posible generar las curvas maestras para el módulo dinámico. En este estudio, las curvas maestras fueron construidas con el ajuste a la función sigmoideal definida por la **ecuación 1.3**, a partir de los resultados de las mediciones del módulo dinámico empleando técnicas de regresión no lineales de mínimos cuadrados. Para ello se utilizó el complemento *Solver* del programa comercial Microsoft® Excel 2002 y se ajustó la curva maestra para cada uno de los datos. Esta herramienta ajusta los valores variando las celdas que se especifiquen, denominadas celdas ajustables, para generar el resultado especificado en la fórmula de la celda objetivo. Pueden aplicarse restricciones para restringir los valores que puede utilizar Solver en el modelo.

De esta manera se obtienen los resultados que se muestran a continuación en la **tabla 7** y en **figura 5**. En la **tabla 8** se muestran los resultados del cálculo de las curvas maestras a partir de los resultados del módulo dinámico de laboratorio.

Granulometría	Parámetro			
	δ	α	β	γ
G1	1.8155	2.3618	-0.5631	0.4766
G2	1.8647	2.4533	-0.3800	0.5018
G3	1.8542	2.3952	-0.3458	0.4784
G4	1.8013	2.5136	-0.7055	0.4589
G5	2.1775	1.8860	-0.1475	0.5982
G6	1.7743	2.7039	-0.5207	0.4182
G7	2.1687	2.3301	-0.5388	0.4960
G8	2.0420	2.0748	-0.6264	0.5309
G9	2.0682	2.3802	-0.6617	0.5529
G10	1.5471	2.7260	-0.7342	0.4276

Tabla 7: Resumen de los parámetros de ajuste α , β , δ y γ para la construcción de las curvas maestras de los resultados de módulos dinámico para los diseños de mezcla estudiados

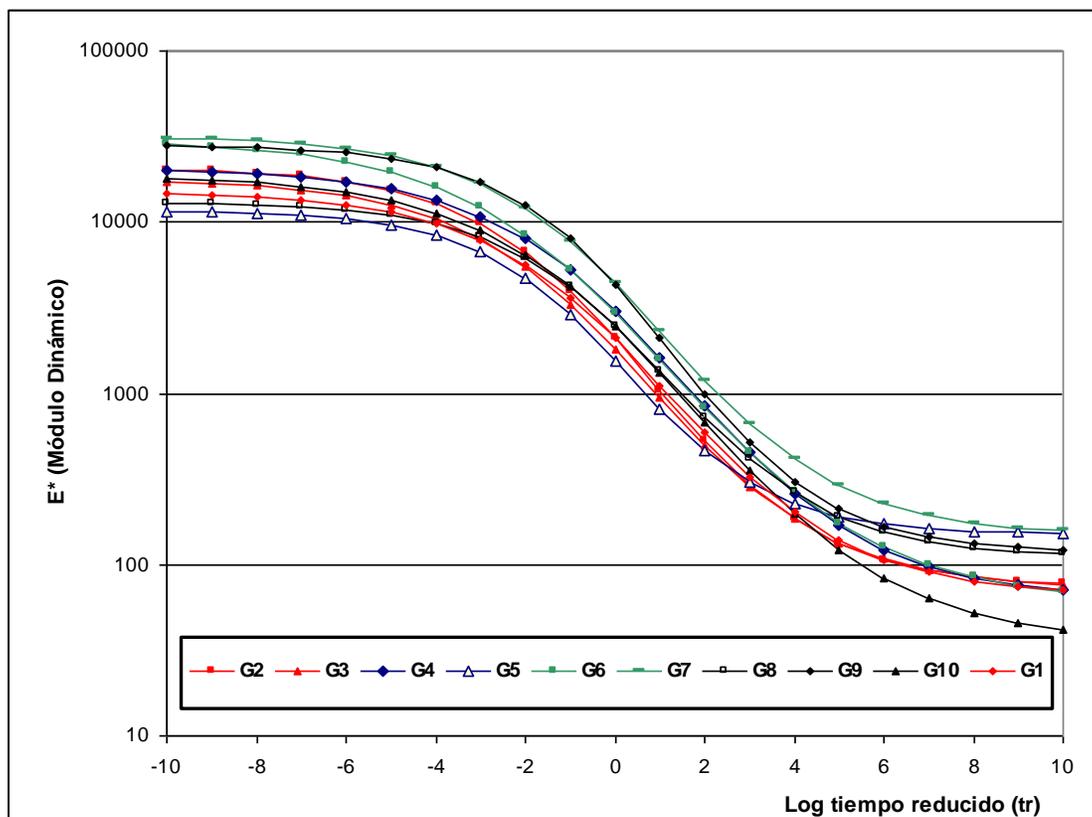


Figura 5: Curvas maestras de módulos dinámicos

3.2 Aplicación del modelo de Witczak

A partir de las propiedades de la materia prima empleada, las curvas granulométricas estudiadas, los diseños de mezcla para cada una de ellas y los resultados de los módulos

obtenidos en el laboratorio, se procede a analizar la aplicabilidad del uso de la ecuación del modelo Witczak como una herramienta simplificada para la predicción del módulo dinámico de mezclas asfálticas.

Como se mencionó en el capítulo 1, la viscosidad del ligante asfáltico a la temperatura de interés es un parámetro de entrada crítico para la ecuación de Witczak. De esta manera como primer paso se procedió a determinar la viscosidad del asfalto para la condición sin envejecimiento para cada una de las temperaturas evaluadas en el ensayo de módulos dinámicos para cada una de las 10 granulometrías estudiadas. Para ello se utilizó la **ecuación 1.5**, empleando las propiedades de ligante asfáltico y considerando su susceptibilidad térmica.

Una vez que se contaba con los datos de la viscosidad del ligante sin envejecimiento, se procedió a aplicarle el modelo de envejecimiento a corto plazo de ligantes asfálticos, conocido también como GAS (*“Global Aging System”*, por sus siglas en inglés), con la **ecuación 1.6** y los valores de **la tabla 1**. Una vez que se contó con estos resultados y con los resultados del diseño volumétrico de la mezcla asfáltica, se procedió a aplicar el modelo de la ecuación de Witczak, **ecuación 1.4**.

Con la finalidad de evaluar la aplicabilidad de la fórmula del modelo de Witczak, a partir de los resultados obtenidos, se realizó el análisis estadístico de los datos, específicamente se realizó un análisis de correlación entre los resultados obtenidos de ambas maneras. La **figura 6**, muestra gráficamente la relación que existe entre ambas.

Los resultados del modelo indican que la varianza explicada por el modelo del 90.68% ($R^2=0.9068$) que al ajustarse por el número de parámetros a estimar se convierte en un 90.67 %. Una desviación estándar para el error de 1796.7, el promedio de la variable respuesta (resultado de módulos de laboratorio en 5547.7 MPa) y el número de observaciones que fueron utilizadas para el análisis (894 observaciones).

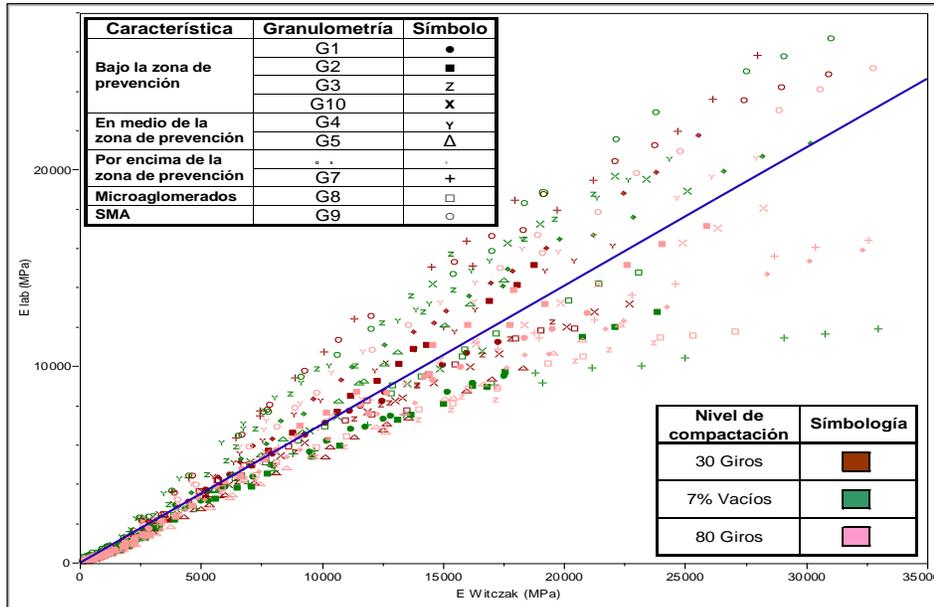


Figura 6: Representación gráfica de los resultados de módulos obtenidos en laboratorio versus los resultados obtenidos con la aplicación de la fórmula del Modelo de Witczak

De esta manera, se podría decir que la aplicación del modelo de Witczak presenta una buena correlación, que podría sugerir la aplicación del mismo para las mezclas asfálticas. Sin embargo, las diferencias obtenidas sugieren la necesidad de contar con bases de datos más extensas, y de calibraciones del modelo para otros materiales que normalmente se usan en Costa Rica para la construcción de pavimentos.

3.3 Desarrollo de nuevo modelo de predicción de módulos

Debido a las diferencias encontradas entre los resultados del laboratorio y el modelo de Witczak, se planteó la posibilidad de calibrar el modelo de predicción del módulo de la mezcla, que tenga la misma forma de la ecuación de Witczak, pero calibrando los coeficientes de la misma para las mezclas asfálticas con materia prima costarricense; a saber, agregado y ligante asfáltico de origen nacional, de tal forma que se pueda diseñar y caracterizar de mejor manera los pavimentos asfálticos nacionales.

Con esta finalidad, surge la necesidad de emplear modelos no lineales para obtener una solución; este tipo de modelo requiere especificar previamente un modelo y valores iniciales de los parámetros, puesto que son métodos iterativos que son usados para

encontrar las estimaciones de los mínimos cuadrados. De esta manera, se parte de la ecuación del modelo de Witczak, empleando como parámetros iniciales los coeficientes utilizados en las **ecuación 1.4**; y a través de herramientas estadísticas y métodos iterativos se obtiene una solución que brinde mejores resultados. La técnica iterativa empleada para esta investigación es el Método de Gauss-Newton, el cual se utiliza para resolver problemas no lineales de mínimos cuadrados. Este método utiliza derivaciones del modelo respecto a cada uno de los parámetros, y mediante diferentes iteraciones busca reducir o minimizar la Sumatoria de los Errores al Cuadrado (*Sum of squares error*, SSE por sus siglas en inglés) de tal forma que se de la convergencia a la solución buscada.

De esta manera se tiene que para los valores iniciales, dado el modelo de Witczak se tiene un SSE = 43.5940. Después del proceso iterativo mediante el Método de Gauss-Newton se logró reducir el valor de la sumatoria de los de los errores al cuadrado a un valor SSE = 5.1997, obteniendo los nuevos coeficientes para la ecuación del modelo Lanamme-Witczak, a saber:

$$\log E^* = 5,535833 + 0,002087\rho_{200} - 0,000566(\rho_{200})^2 - 0,002590\rho_4 - 0,078763V_a - 1,865947\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a}\right) + \frac{2,399557 + 0,000820\rho_4 - 0,013420\rho_{38} + 0,000261(\rho_{38})^2 + 0,005470\rho_{34}}{1 + e^{(0,052941 - 0,498163\log(f) - 0,691856\log(\eta))}} \quad (1.7)$$

donde:

E^* = módulo dinámico, psi.

η = viscosidad del asfalto al envejecimiento y temperatura de interés, 10^6 Poise.

$$\eta = \frac{G^*}{10} \left(\frac{1}{\text{sen}\delta} \right)^{4,8628}$$

f = frecuencia de carga, Hz.

V_a = Contenido de vacíos de aire, %.

V_{beff} = Contenido de asfalto efectivo, % por volumen.

ρ_{34} = Porcentaje retenido acumulado en la malla de 19 mm (3/4 pulg).

ρ_{38} = Porcentaje retenido acumulado en la malla de 9,53 mm (3/8 pulg).

ρ_4 = Porcentaje retenido acumulado en la malla No 4.

ρ_{200} = Porcentaje pasando en la malla No 200.

En la ecuación anterior, debe mencionarse que todos los coeficientes variaron respecto a la fórmula original del modelo de Witczak, sin embargo el coeficiente correspondiente

al porcentaje retenido acumulado en la malla de 19 mm (3/4 pulg), ρ_{34} , no presentó variaciones, puesto que ninguna de las granulometrías estudiadas presentaba material retenido en esta malla.

Nuevamente, se pretende evaluar estadísticamente la aplicabilidad de este nuevo modelo Lanamme-Witczak, a partir de los resultados obtenidos. Nuevamente se realizó un análisis de correlación entre los resultados obtenidos en el laboratorio y aplicando el nuevo modelo. La **figura 7**, muestra gráficamente la relación que existe entre ambas variables.

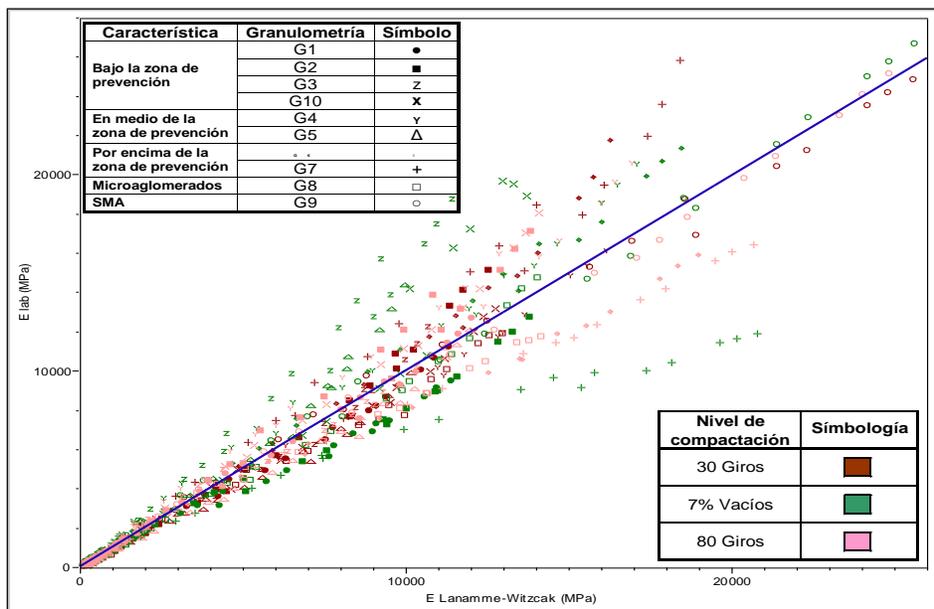


Figura 7: Representación gráfica de los resultados de módulos obtenidos en laboratorio versus los resultados obtenidos con la aplicación de la fórmula del nuevo modelo de Lanamme-Witczak

Los resultados muestran un porcentaje de varianza explicada por el modelo del 93.55% ($R^2=0.9355$) que al ajustarse por el número de parámetros a estimar se convierte en un 93.54%. Una desviación estándar para el error de 1494.4, el promedio de la variable respuesta (resultado de módulos de laboratorio en 5547.7 MPa) y el número de observaciones que fueron utilizadas para el análisis (894 observaciones).

Nuevamente se puede notar que se obtiene una muy buena correlación (93.55%), que incluso es mayor a la obtenida con la aplicación del modelo de Witczak; lo cual sugiere que el nuevo modelo predice mejor los resultados de laboratorio para las condiciones evaluadas, evidenciando lo expuesto anteriormente acerca de la necesidad de calibrar

los modelos para los materiales que se emplean en la construcción de pavimentos, lo cual requiere a su vez de bases de datos más extensas.

Dentro de las principales limitaciones de la investigación, se tiene que únicamente se estudió una única fuente de material, por lo que no fue posible evaluar la influencia que podrían tener las características propias de cada fuente de agregado. Aunque solamente se estudió un solo asfalto, debe tenerse en cuenta que este tipo de asfalto es el único que se distribuye en Costa Rica, por lo cual la consideración de otros tipos de asfaltos podría no ser representativo de la realidad nacional.

Debe tenerse consideración que la ecuación fue empleada considerando únicamente la condición de envejecimiento a corto plazo del ligante asfáltico, razón por la cual, es necesario verificar la aplicabilidad, o bien calibrar, los modelos para considerar la influencia los otros envejecimientos que puede sufrir el asfalto.

3.4 Comparación de modelos de predicción de módulos

Para poder observar y comparar los diferentes modelos para la predicción de módulos, para una energía de compactación de 30 giros, se calculan los módulos para cada temperatura y frecuencia de cargas utilizando la fórmula del modelo de Witczak y el nuevo modelo Lanamme-Witczak, los resultados de los cálculos se muestran en la **tabla 8**, a continuación

Tiempo reducido	Módulos Dinámicos E' para las granulometrias estudiadas (MPa)														
	G1			G2			G3			G4			G5		
	Laboratorio	Witczak	Lanamme-Witczak	Laboratorio	Witczak	Lanamme-Witczak	Laboratorio	Witczak	Lanamme-Witczak	Laboratorio	Witczak	Lanamme-Witczak	Laboratorio	Witczak	Lanamme-Witczak
-10	14655	28709	14431	20273	33084	15562	17190	33707	13964	20061	38135	20856	11465	32684	13213
-9	14424	27396	14260	19942	31450	15380	16854	31991	13793	19729	36254	20608	11377	31009	13054
-8	14062	25706	13984	19411	29381	15084	16331	29806	13514	19218	33853	20204	11219	28873	12794
-7	13505	23583	13540	18575	26826	14611	15533	27098	13065	18446	30865	19552	10941	26221	12375
-6	12670	21001	12846	17299	23773	13870	14355	23858	12359	17307	27273	18527	10460	23045	11714
-5	11468	17994	11798	15441	20276	12752	12699	20154	11295	15692	23145	16976	9663	19417	10712
-4	9843	14680	10304	12927	16480	11157	10542	16163	9784	13531	18667	14763	8426	15513	9284
-3	7836	11274	8355	9879	12630	9070	8017	12166	7834	10872	14147	11882	6713	11617	7431
-2	5653	8060	6116	6703	9032	6660	5463	8505	5636	7958	9967	8599	4713	8067	5335
-1	3635	5318	3950	3978	5978	4313	3305	5480	3569	5212	6477	5467	2862	5156	3360
0	2091	3228	2247	2097	3648	2453	1806	3249	1998	3047	3875	3055	1548	3030	1862
1	1116	1812	1167	1039	2061	1267	939	1786	1034	1630	2150	1563	816	1651	950
2	587	956	595	526	1093	637	498	928	535	842	1125	791	464	851	483
3	327	487	323	292	557	339	286	468	299	448	571	430	303	427	266
4	202	247	197	185	280	202	185	237	189	260	290	264	228	216	166
5	140	130	136	134	144	138	134	124	136	169	153	185	191	114	118
6	108	72	106	107	78	106	108	69	109	123	86	145	172	64	94
7	90	43	90	93	45	89	93	42	94	98	52	124	162	39	81
8	80	28	81	85	28	79	84	28	86	84	34	112	157	26	74
9	74	20	76	80	19	74	79	20	81	76	24	106	154	19	70
10	71	15	73	77	14	71	76	15	78	71	19	102	152	14	67

Tabla 8: Cálculo módulos dinámico con el modelo de Witczak y el modelo Lanamme-Witczak para 30 giros de compactación

Tiempo reducido	Módulos Dinámicos E* para las granulometrias estudiadas (MPa)														
	G6			G7			G8			G9			G10		
	Laboratorio	Witczak	Lanamme-Witczak	Laboratorio	Witczak	Lanamme-Witczak	Laboratorio	Witczak	Lanamme-Witczak	Laboratorio	Witczak	Lanamme-Witczak	Laboratorio	Witczak	Lanamme-Witczak
-10	28436	46868	21505	30856	55227	23979	12922	36351	16784	27771	58394	28893	17994	29329	13993
-9	27632	44424	21247	30428	51681	23704	12809	34516	16591	27543	55259	28506	17603	28021	13844
-8	26467	41298	20820	29744	47358	23253	12620	32172	16273	27153	51262	27885	17025	26338	13599
-7	24820	37410	20128	28666	42241	22522	12308	29259	15761	26493	46309	26902	16187	24224	13203
-6	22569	32751	19031	27009	36407	21365	11802	25764	14953	25396	40403	25384	15004	21651	12573
-5	19644	27437	17360	24564	30063	19603	11006	21761	13725	23633	33703	23129	13404	18643	11610
-4	16100	21747	14973	21173	23561	17073	9821	17442	11965	20948	26573	19976	11365	15309	10214
-3	12201	16114	11883	16888	17356	13762	8192	13114	9663	17201	19567	15952	8976	11854	8360
-2	8407	11043	8416	12145	11914	9968	6211	9152	7022	12627	13313	11446	6474	8558	6189
-1	5224	6953	5200	7727	7578	6340	4175	5885	4488	8010	8314	7209	4202	5706	4048
0	2954	4024	2820	4368	4463	3543	2478	3483	2523	4348	4769	3979	2450	3497	2334
1	1569	2165	1412	2284	2450	1816	1345	1913	1299	2104	2542	1995	1311	1976	1231
2	822	1107	711	1186	1272	923	719	995	662	996	1288	977	673	1044	638
3	448	555	391	659	639	505	411	504	362	513	640	508	351	528	353
4	265	283	246	410	320	314	264	257	224	305	324	297	196	264	220
5	174	152	177	289	164	222	192	136	158	212	172	199	122	135	156
6	126	87	142	227	88	176	155	77	124	168	98	150	84	73	123
7	100	55	123	193	51	151	136	47	107	145	61	125	64	42	106
8	84	37	113	175	31	138	125	32	97	133	41	111	53	27	96
9	75	28	107	164	21	130	119	23	91	126	30	103	46	18	91
10	70	22	104	157	15	126	115	18	88	122	24	98	42	13	87

Tabla 8 (cont.): Cálculo módulos dinámico con el modelo de Witczak y el modelo Lanamme-Witczak para 30 giros de compactación

Puede apreciarse que la fórmula del modelo de Witczak aplicada a los materiales estudiados puede sobreestimar el módulo de la mezcla a temperaturas bajas, y en el caso de las temperaturas altas subestima el módulo de la misma. Por otra parte, el nuevo modelo Lanamme-Witczak se ajusta mejor a los módulos obtenidos en el laboratorio, lo cual es un indicador de que el modelo podría predecir adecuadamente los módulos, para la materia prima empleada en esta investigación

4 CONCLUSIONES

La presente investigación comprueba la necesidad de calibrar los modelos de predicción de módulos conforme a los materiales y condiciones particulares de cada país. De esta manera, la aplicación directa de la ecuación de Witczak es un modelo que continúa siendo aplicable para los materiales nacionales, sin embargo aún requiere que se ejecuten ensayos que calibren y validen los resultados.

Es de gran utilidad ampliar la presente investigación para alcanzar un modelo que considere su aplicabilidad en otras fuentes de agregado o materia prima.

Es recomendable hacer un estudio de validación del modelo obtenido, considerando las variaciones en los módulos que pueden obtenerse en las mezclas asfálticas ya

colocadas y con cierto periodo de servicio. Para hacer esto se recomienda ampliar la investigación para resultados que puedan obtenerse de campo, de forma tal que se organice una base de datos con la cual sea posible realizar análisis estadísticos apropiados y poder establecer nuevas metodologías para la validación y calibración de los modelos obtenidos.

A manera de conclusión se quiere resaltar la importancia de que ya se estén desarrollando en el país modelos de caracterización de las mezclas asfálticas, en aras de cada día que pasa, el diseñador de pavimentos nacional tenga más herramientas para poder garantizar estructuras de pavimentos resistentes y durables, con altos índices de funcionalidad para los usuarios quien son, en última instancia, los verdaderos beneficiados.

A partir de estos resultados, se generan diversas herramientas fundamentales para formular tanto el Manual de especificaciones técnicas de materiales y la Guía de diseño de pavimentos de Costa Rica, necesarios para reorientar al país con una visión especializada en el incremento significativo de la calidad de las obras de infraestructura vial que sin duda alguna son el engranaje para propiciar el desarrollo de la nación.

REFERENCIAS

1. American Association of State Highway and Transportation Officials, "Guide for Design of Pavement Structures", Apéndice D, Washington, D.C (1993).
2. American Association of State Highway and Transportation Officials, "Guide for Design of Pavement Structures", (2002).
3. "Mechanistic-Empirical Design of New and rehabilitated pavement structures". NCHRP Report 1-37A, National Cooperative Highway Research Board, National Research Council, Illinois, (2004).
4. Farrar, M; Harnsberger, P; Thomas, K; Wiser, W. "Evaluation of oxidation in asphalt pavements test sections after four year of service". International Conference on Perpetual Pavement. Western Research Institute, (2006).