

Determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica por correlaciones

Asphalt Mixtures' Dynamic Modules Determination by Correlations

Fecha de recepción: 18 de enero de 2011
Fecha de aprobación: 9 de mayo de 2011

Carlos Hernando Higuera Sandoval*
Gloria Marcela Naranjo Barrera**
Jhon Fredy Cetina Acuña* **

Resumen

Se describen las metodologías utilizadas usualmente para determinar el módulo dinámico de mezclas asfálticas, y las variables utilizadas en cada una de ellas. Con base en información secundaria suministrada por un ensayo de tracción indirecta, se aplican las metodologías descritas y se comparan sus resultados para determinar la precisión de los mismos con respecto al ensayo de laboratorio. Dado que las variables que son utilizadas en cada uno de los métodos para determinar el módulo dinámico de mezclas asfálticas influyen de forma diferente en el resultado, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad que compromete cada una de estas variables, mostrando el grado de sensibilidad de cada una de ellas, tanto para cada método como en general.

Palabras clave: Módulo dinámico de mezclas asfálticas, Análisis de sensibilidad, Ensayo de tracción indirecta.

Abstract

It describes the methodologies usually used to determine asphalt mixtures' dynamic modules and the variables utilized in each of them. Based on secondary information provided by an indirect tensile test, the described methodologies are applied and their results compared, in order to determine the accuracy regarding the laboratory tests. Given that the variables that are used in each one of the methods to determine the dynamic module of asphalt mixtures influence in different ways in the results, a sensitivity analysis which commits each of these variables is conducted, showing the sensitivity degree of each one of them, both in general and for each method.

Key words: Dynamic Modules of Asphalt Mixtures, Sensitivity Analysis, Indirect Tensile Test.

* Ingeniero en Transportes y Vías, Especialista en Vías Terrestres, Especialista en Carreteras, Especialista en Transportes Terrestres, Magister en Ingeniería de Vías Terrestres, Profesor de la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja –Boyacá–, Investigador del Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial –GrinfraVial– C. carlos.higuera@uptc.edu.co

** Ingeniera en Transporte y Vías. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. gmnaranjo9@hotmail.com

*** Ingeniero en Transporte y Vías. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. frecetacu@msn.com

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se evidencia un constante crecimiento de las redes viales, impulsado, entre otros factores, por las necesidades de comunicación entre los diferentes sectores económicos y, principalmente, por el intercambio comercial entre regiones. Adicional a esto, el incremento del parque vehicular en el país está en constante aumento, lo que implica que dichas redes viales estén diseñadas y construidas para que soporten el impacto que estos factores de crecimiento generan en ellas.

Dentro de las características que definen la calidad de una estructura de pavimento se encuentran las mecánicas y dinámicas, características que son muy importantes, debido a que ayudan a determinar parámetros definitivos, como el dimensionamiento de la estructura de pavimento en el diseño, rehabilitación o reforzamiento; por tal razón, es de vital importancia diseñar y construir vías que soporten el tránsito, para lo cual se hace un enfoque particular en las características dinámicas de la capa de concreto asfáltico de las estructuras de pavimento.

Existen diversas variables relacionadas con la determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica, cuyos valores hacen que la mezcla se comporte de forma satisfactoria o no, que se presenten o no daños tanto en la carpeta de concreto asfáltico como en la estructura de pavimento en conjunto, tales como fallas, fisuras, grietas, deformaciones y fatiga, entre otros.

En este artículo se describen, brevemente, los métodos de determinación de los módulos dinámicos de las mezclas asfálticas, tales como *ensayos de laboratorio, fórmulas o correlaciones y monogramas*; además, se muestra un análisis de sensibilidad a partir de las variables que influyen en su diseño.

Una vez determinado el módulo dinámico de la mezcla asfáltica con base en información de un ensayo de laboratorio, se compara con los valores obtenidos mediante el uso de correlaciones, con el fin de determinar cuál de las correlaciones es más

acertada y cuáles son las razones por las que existe una diferencia en los resultados.

Finalmente, el contenido del artículo facilita a los profesionales procesos más claros y el conocimiento de las variables más influyentes en la determinación del módulo dinámico de mezclas asfálticas. También facilita un punto de comparación para obtener un valor óptimo del parámetro en estudio, lo que genera ahorro tanto de recursos económicos como de tiempo, gracias a la orientación que se brinda.

II. METODOLOGÍA

El módulo dinámico de una mezcla asfáltica se define como el valor absoluto de la relación entre el valor del esfuerzo máximo y el de la deformación unitaria máxima, obtenido en un ensayo a compresión (uniaxial o triaxial), a flexión y tracción indirecta, utilizando cargas en forma cóncava.

Para determinar el módulo dinámico de una mezcla asfáltica existen diferentes metodologías, entre las cuales están: ensayos de laboratorio, monogramas y fórmulas o correlaciones. Dentro de los ensayos se encuentran el de *tracción indirecta*, el de *tracción por compresión directa* y el de *tracción de flexión de una viga cargada en el tercio central*. Cada uno de estos ensayos tiene sus características particulares, y el usado comúnmente en Colombia, el de *tracción indirecta*, está regido por las normas INV – E 753 – 07 e INV – E 754 – 07. En estas normas se especifican los detalles relacionados con la construcción del espécimen por ensayar y el procedimiento para determinar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica. Otra de las metodologías utilizadas para la determinación de módulos dinámicos de mezclas asfálticas es la de los monogramas de la Shell, la cual fue desarrollada por Bonnaure y otros, basados en el módulo dinámico del asfalto y en las concentraciones volumétricas del asfalto y de los agregados (datos del diseño Marshall). La utilización de este método es un poco tediosa, por la configuración gráfica que tienen los monogramas, lo cual hace que el procedimiento sea largo y que, además, se pueda incurrir en errores de paralaje o personales del observador.

La tercera metodología, correspondiente a fórmulas o correlaciones, hace que determinar el módulo de las mezclas asfálticas sea un proceso más corto y preciso que el nombrado anteriormente; dentro de esta metodología se encuentran cuatro métodos [1], que mediante la aplicación de ciertas expresiones matemáticas permiten conocer el valor del módulo dinámico utilizando diferentes variables, los métodos son: fórmulas de Bonnaure y otros, fórmulas del Instituto del Asfalto, fórmulas de Heukelom y Klomp y la fórmula de Witczak. A continuación se muestra cada uno de los métodos correspondientes a esta metodología.

A. Fórmulas de Bonnaure y otros

Este método considera cuatro factores que son utilizados para determinar el módulo dinámico del asfalto, y, finalmente, a partir de este calcular el módulo dinámico de la mezcla asfáltica. A continuación se presentan las expresiones matemáticas propias del método, definiendo cada una de sus variables.

$$1 \quad 10.82 \frac{1.342(100 - V_g)}{V_g - V_b} \quad (1)$$

$$2 \quad 8.0 - 0.00568V_g - 0.0002135V_g^2 \quad (2)$$

$$3 \quad 0.6 \text{Log} \frac{1.37V_b^2 - 1}{1.33V_b - 1} \quad (3)$$

$$4 \quad 0.7582(1 - 2) \quad (4)$$

$$\text{Para: } 5 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \leq S_b \leq 10^9 \text{ N/m}^2 \quad (5)$$

$$\text{Log} S_m = \frac{4 - 3}{2} \text{Log} S_b + 8 - \frac{4 - 3}{2} / \text{Log} S_b + 8 / 2$$

$$\text{Para: } 10^9 \text{ N/m}^2 \leq S_b \leq 3 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \quad (6)$$

$$\text{Log} S_m = 2 + 4 - 2.0959(1 - 2 + 4)(\text{Log} S_b - 9)$$

Donde:

S_m = Módulo dinámico de la mezcla asfáltica, N/m²

V_b = Porcentaje en volumen de asfalto de la mezcla, %

V_g = Porcentaje en volumen de agregados de la mezcla, %

S_b = Módulo dinámico del asfalto, N/m²

Si S_m y S_b se dan en lb/pulg², la ecuación es la siguiente:

$$\text{Log} S_m = \frac{4 - 3}{2} \text{Log} S_b + 4.1612 - \frac{4 - 3}{2} / \text{Log} S_b + 4.1612 / 2 + 3.8388 \quad (7)$$

$$\text{Para: } 145,000 \text{ lb/pulg}^2 \leq S_b \leq 435,000 \text{ lb/pulg}^2 \quad (8)$$

$$\text{Log} S_m = 2 + 4 - 2.0959(1 - 2 + 4)(\text{Log} S_b - 5.1612) + 3.8388$$

B. Fórmulas del Instituto del Asfalto

Al igual que en el método anterior, este utiliza unos factores para determinar el módulo dinámico de las mezclas asfálticas. La particularidad de este método se presenta en la utilización de la viscosidad del asfalto como variable dentro de las expresiones matemáticas que son presentadas a continuación:

$$|E^*| = 100,000 \times 10^{-1} \quad (9)$$

$$1 - 3 = 0.000005 - 2 = 0.00189 - 2 f^{1.1} \quad (10)$$

$$2 = \frac{0.5 T}{4} \quad (11)$$

$$3 = 0.553833 + 0.028829 (p_{200} f^{0.1703}) + 0.03476 V_v - 0.070377 + 0.931757 f^{0.02774} \quad (12)$$

$$4 = 0.483 V_b \quad (13)$$

$$5 = 1.3 - 0.49825 \text{Log}(f) \quad (14)$$

Donde:

E^* = Módulo dinámico de la mezcla asfáltica, Lb/pulg²

f = Frecuencia correspondiente a la velocidad de operación, Hertz

T = Temperatura de la mezcla, °F

P₂₀₀ = Porcentaje en peso del agregado que pasa tamiz N.º 200, %

V_v = Porcentaje en volumen de vacíos con aire, %

V_b = Porcentaje en volumen de asfalto, %

= Viscosidad del asfalto a 70 °F (10⁶ poises)

La viscosidad del asfalto se puede estimar a una temperatura de 70 °F, por medio de la siguiente expresión:

$$29,508.2(P_{77°F})^{2.1939} \quad (15)$$

Donde:

P_{77°F} = Penetración del asfalto a 77 °F (25 °C)

C. Fórmulas de Heukelom y Klomp

Este método permite conocer el valor del módulo dinámico de la mezcla asfáltica a partir del módulo dinámico del asfalto y de los porcentajes en volumen de los constitutivos de la mezcla bituminosa. Las expresiones que se deben aplicar son las siguientes:

$$S_m = S_b \left[1 + \frac{2.5}{n} \left(\frac{C_v}{1 - C_v} \right) \right]^n \quad (16)$$

$$\log(E) = 3.750063 - 0.02932P_{200} + 0.001767(P_{200})^2 + 0.002841P_4 + 0.058097V_a + 0.802208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \quad (20)$$

$$\frac{3.871977 - 0.0021P_4 + 0.003958P_{38} + 0.000017(P_{38})^2 + 0.005470P_{34}}{1 + e^{0.603313 - 0.313351 \log f - 0.393532 \log}} \quad (20)$$

Donde:

E = Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (lb/pulg²)

= Viscosidad del ligante (10⁶ poises)

f = Frecuencia de carga (hertz)

V_a = Porcentaje en volumen de aire (%)

V_{beff} = Porcentaje en volumen efectivo de ligante (%)

P₃₄ = Porcentaje retenido en el tamiz 3/4"

$$n = 0.83 \log \left(\frac{4 \times 10^4}{S_b} \right) \quad (17)$$

Donde: S_m y S_b en MPa

Esta fórmula solo aplica si S_b es superior a 10 MPa, y para valores de 0.7 < C_v < 0.9

Si el valor de vacíos de la mezcla es superior a 3%, Fijjin Van Draat (Huang, 2004) recomienda hacer la siguiente corrección:

$$C_v = \frac{V_g}{V_g + V_b} \frac{\text{Volumen de los granulares}}{\text{Volumen (Granular + Bitumen)}} \quad (18)$$

$$C_v = \frac{C_v}{1 + \frac{(V_v - 3)}{100}} \quad (19)$$

Donde:

V_b = Porcentaje en volumen de bitumen o de asfalto

V_g = Porcentaje en volumen de agregados de la mezcla asfáltica

V_v = Porcentaje en volumen de vacíos

D. Fórmula de Witczak

Este método fue desarrollado teniendo en cuenta la composición de la mezcla asfáltica, y se condensa en una única expresión matemática, mostrada a continuación:

P₃₈ = Porcentaje retenido en el tamiz 3/8"

P₄ = Porcentaje retenido en el tamiz N.º 4

P₂₀₀ = Porcentaje pasa en el tamiz N.º 200

Como se puede observar, cada uno de los métodos anteriores depende de diferentes variables para la determinación del módulo dinámico de mezclas asfálticas, cada una de las cuales tiene un grado de

influencia en el resultado; por lo tanto, se hace importante conocer el comportamiento de cada una de estas variables, con el fin de determinar cuál tiene un grado de sensibilidad más alto o bajo o cuál es la variable que genera cambios significativos en el valor del módulo dinámico. Con este fin se lleva a cabo un análisis de sensibilidad en donde se varía el valor de las variables de cada uno de los métodos para observar el comportamiento del valor del módulo dinámico.

Con el fin de facilitar el cálculo del módulo dinámico de las mezclas asfálticas mediante fórmulas o correlaciones, se realizó una sistematización de las expresiones matemáticas de cada método en una hoja

Excel, donde solo basta con introducir el valor de las variables correspondientes a cada método para obtener el valor del módulo dinámico en diferentes unidades.

III. RESULTADOS

Para aplicar la metodología descrita en el numeral anterior se tomó como base la información secundaria de un ensayo de tracción indirecta realizado en la ciudad de Bogotá, siguiendo los lineamientos indicados por las normas [2] INV E – 753 – 96 e INV E – 754 – 96. Una vez aplicados los métodos de la metodología se obtuvieron los resultados que se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1
Resumen de módulos dinámicos obtenidos por diferentes métodos

	Módulo dinámico (kg/cm ²) para una velocidad de 30 Km/h	Módulo dinámico (kg/cm ²) para una velocidad de 60 Km/h	Módulo dinámico (kg/cm ²) para una velocidad de 80 Km/h
Ensayo de laboratorio	22762 100	Sin información	40940 100
Monogramas	37740 166%	40800	42840 105%
Fórmulas de BONNAURE y otros	37219 164%	41624	47448 116%
Fórmulas del INSTITUTO DEL ASFALTO	36946 162%	44275	47890 117%
Fórmulas de HEUKELOM y KLOMP	40727 179%	45098	50751 124%
Fórmula de WITCZAK	43021 189%	49992	53230 130%
Programa Shell BANDS 2.0	31212 137%	40290	44676 109%

El objetivo de la investigación es llegar a un punto de comparación entre los valores obtenidos mediante el ensayo de laboratorio y los obtenidos mediante las demás metodologías. El proceso se llevó a cabo para tres velocidades diferentes: 30, 60 y 80 km/h, con el fin de observar el comportamiento del módulo dinámico en diferentes situaciones de operación, en donde las velocidades de 30 y 80 km/h son propias del ensayo, mientras que la velocidad de 60 km/h se

toma en cuenta dentro de los cálculos, ya que es la velocidad de operación típica en zonas urbanas del país.

El análisis de sensibilidad se realiza para las variables que influyen en la determinación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica mediante cada método descrito anteriormente. A continuación se presentan las gráficas del comportamiento del módulo dinámico en función de dichas variables:

- Análisis de sensibilidad de módulos dinámicos de mezclas asfálticas mediante el método de Monogramas

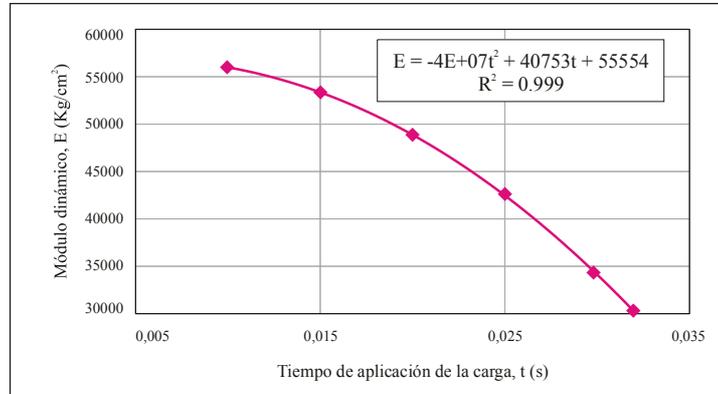


Fig. 1. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función del tiempo de aplicación de la carga

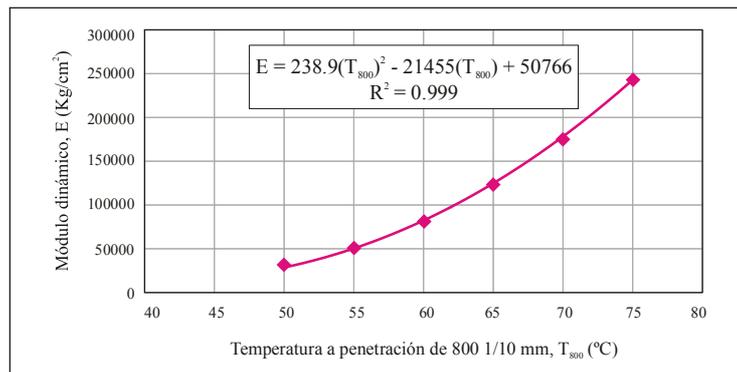


Fig. 2. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de una penetración de 800 1/10 mm

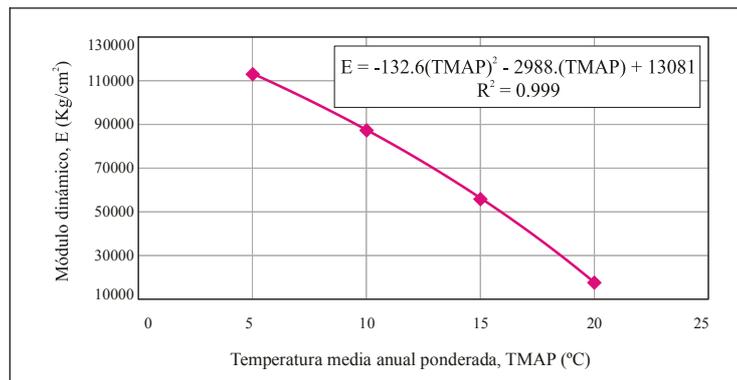


Fig. 3. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de la TMAP

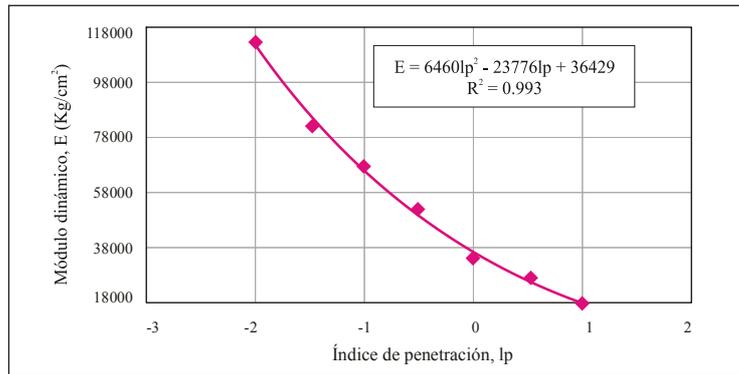


Fig. 4. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función del índice de penetración del asfalto

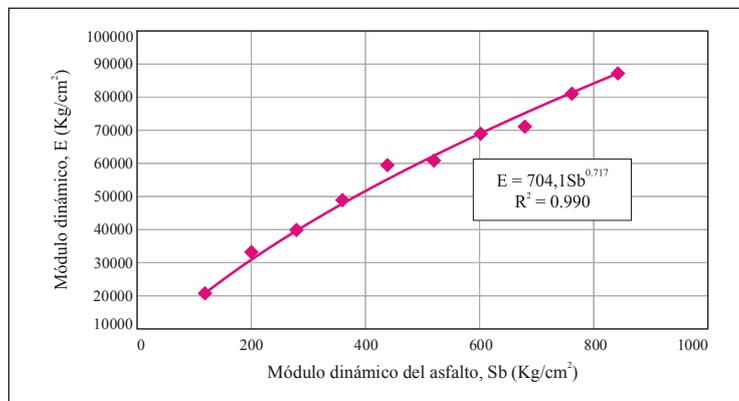


Fig. 5. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función del índice de penetración del asfalto

- Fórmulas de Bonnaure y otros

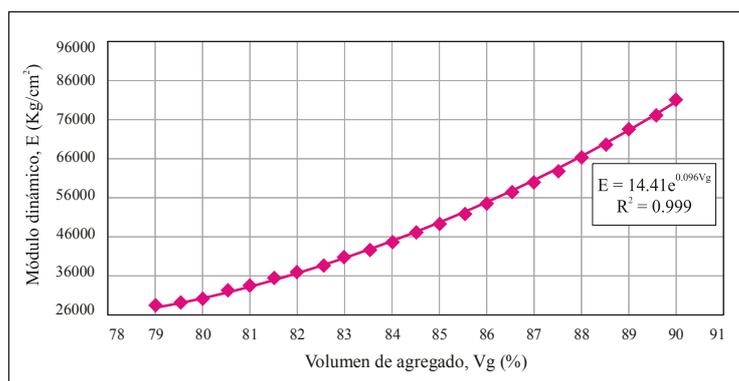


Fig. 6. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función del porcentaje en volumen de agregado

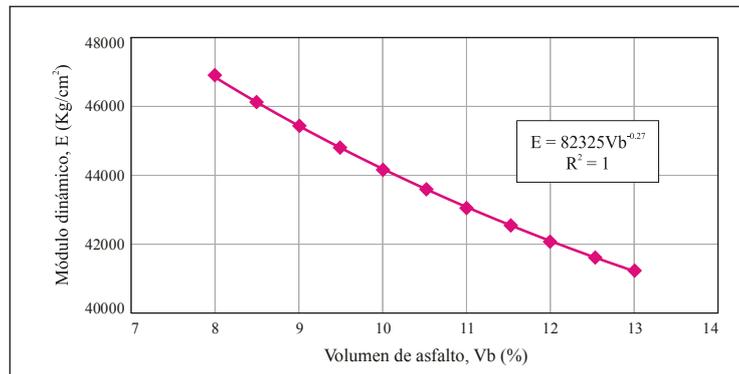


Fig. 7. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función del porcentaje en volumen de asfalto

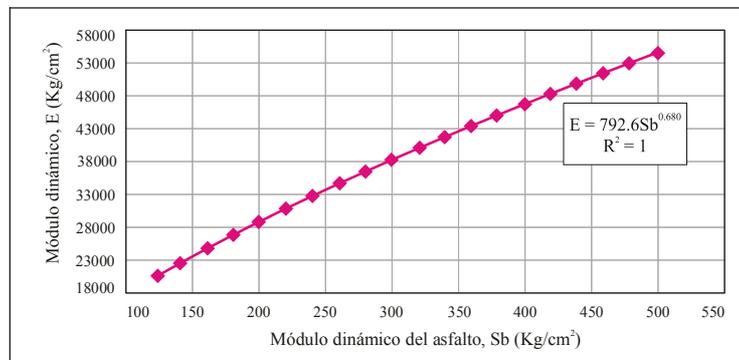


Fig. 8. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función módulo dinámico del asfalto

- Fórmulas del Instituto del Asfalto

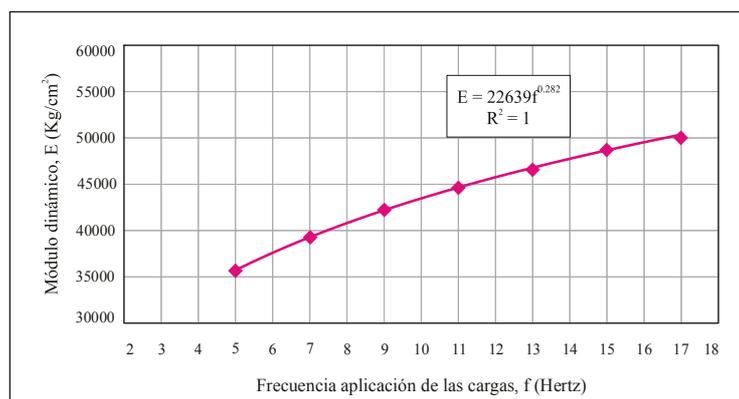


Fig. 9. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de la frecuencia de aplicación de la carga

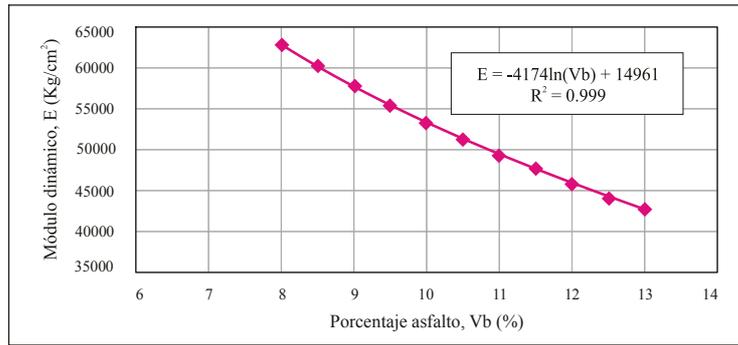


Fig. 10. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función del porcentaje en volumen de asfalto

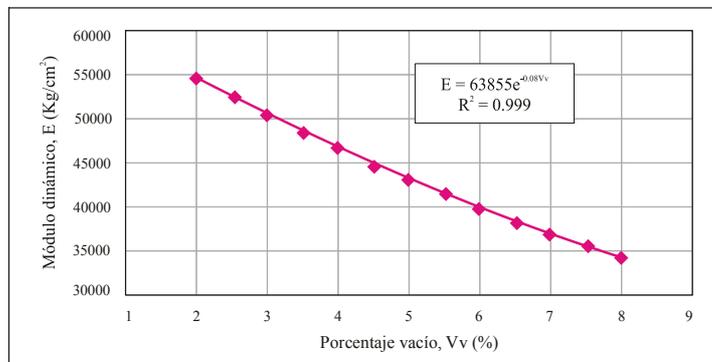


Fig. 11. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función del porcentaje en volumen de vacíos

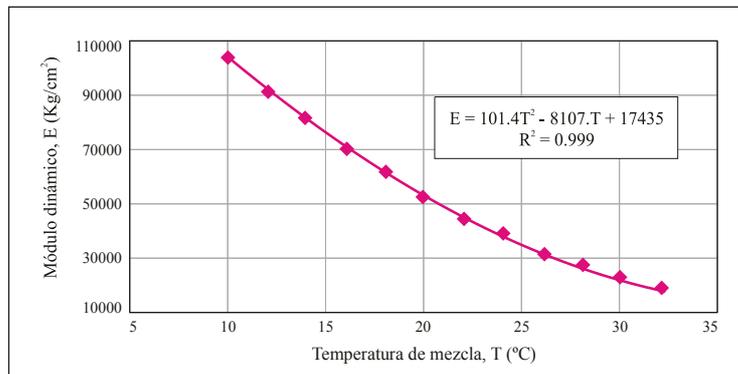


Fig. 12. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de la temperatura de la mezcla

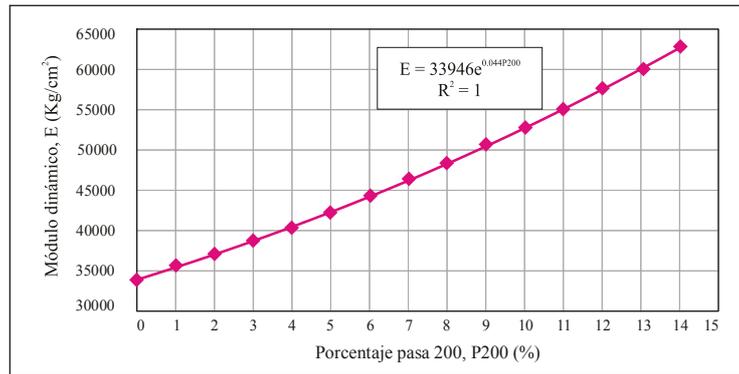


Fig. 13. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función del porcentaje pasa 200.

- Fórmulas de Witczak

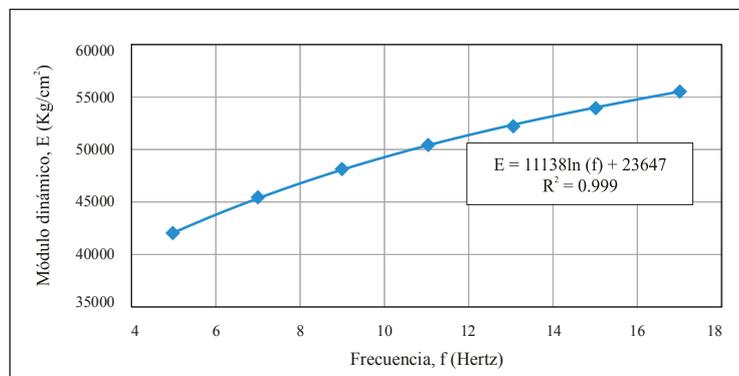


Fig. 14. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de la frecuencia de aplicación de la carga

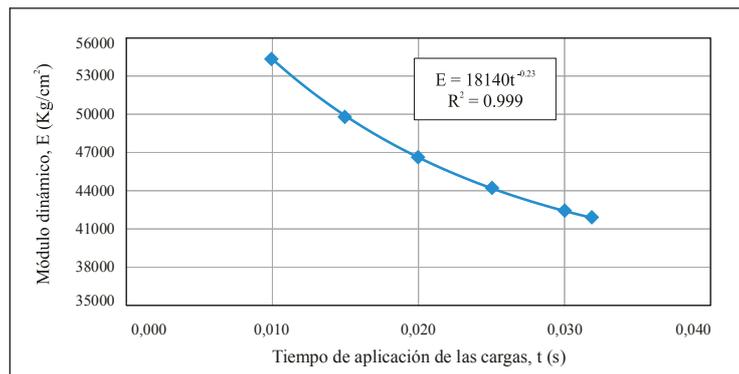


Fig. 15. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función del tiempo de aplicación de la carga

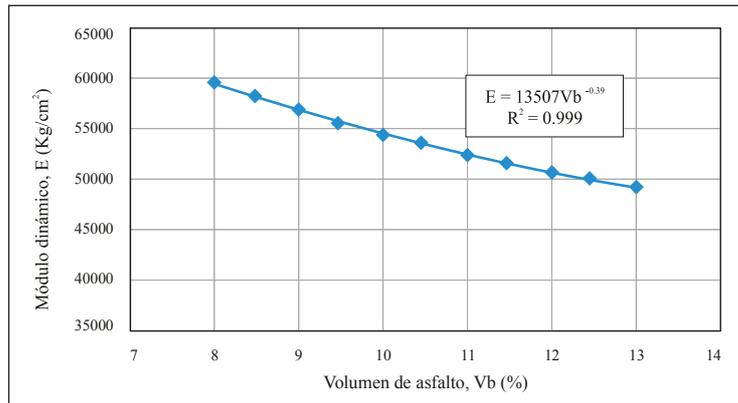


Fig. 16. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función del porcentaje en volumen de asfalto

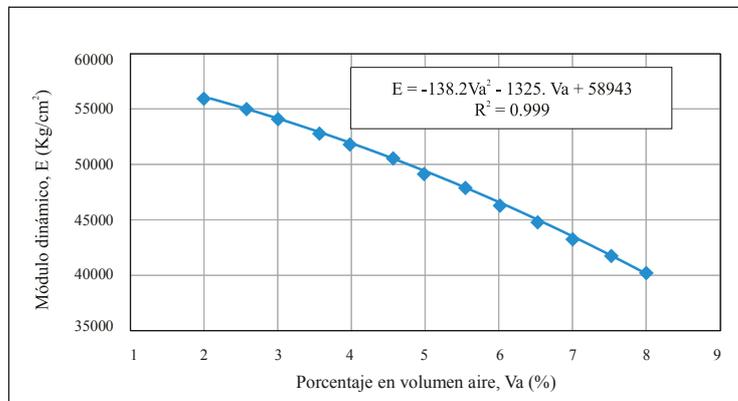


Fig. 17. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función del porcentaje en volumen de aire

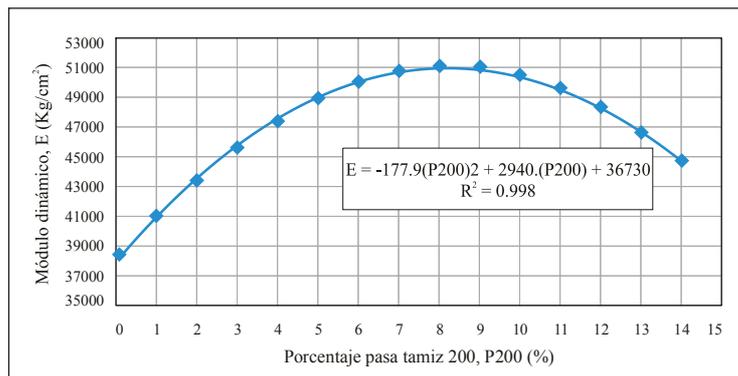


Fig. 18. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función del porcentaje en pasa tamiz 200

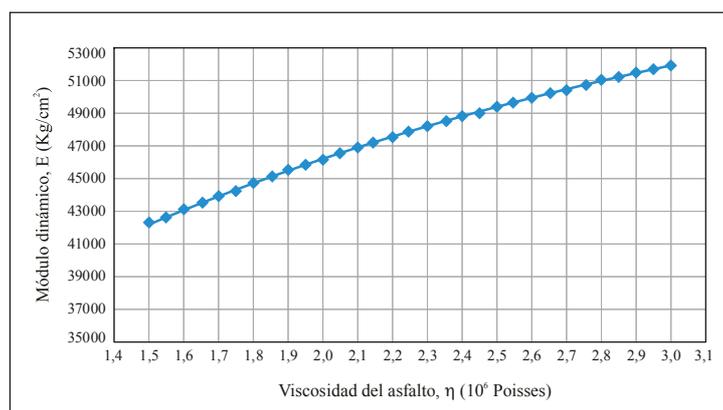


Fig. 19. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de la viscosidad del asfalto

El grado de sensibilidad [3] de las variables que influyen en la determinación del módulo dinámico de las mezclas asfálticas se define teniendo en cuenta el porcentaje de variación del valor del módulo dinámico con respecto a un porcentaje de variación en el valor

de las variables, como se muestra en el Cuadro 2.

Finalmente, para cada variable de cada método se determinó el grado de sensibilidad, y los resultados se resumen en el Cuadro 3.

Cuadro 2

Escala para definir el grado de sensibilidad

Grado de sensibilidad	Variación, %
Baja	<15
Media	15 – 30
Alta	>30

Cuadro 3
Comparación del grado de sensibilidad de las variables

Método	Variable	Grado de sensibilidad
Monogramas	Tiempo de aplicación de la carga, t (seg)	ALTO
	Temperatura a una penetración 800 1/10 mm, T_{800} (°C)	ALTO
	Temperatura media anual ponderada, TMAP (°C)	ALTO
	Índice de penetración, I_p	ALTO
Formulas de BONNAURE y otros	Módulo dinámico del asfalto, S_b (Kg/cm ²)	ALTO
	Porcentaje en volumen de agregados, V_g (%)	ALTO
	Porcentaje en volumen de asfalto, V_b (%)	BAJO
	Módulo dinámico del asfalto, S_b (Kg/cm ²)	ALTO
Formulas del INSTITUTO DEL ASFALTO	Frecuencia de aplicación de la carga, f (Hertz)	MEDIO
	Porcentaje en volumen de asfalto, V_b (%)	ALTO
	Porcentaje en volumen de vacios, V_v (%)	MEDIO
	Temperatura de la mezcla, T (°C)	ALTO
	Porcentaje pasa tamiz 200, P_{200} (%)	MEDIO
Formulas de HEUKELOM y KLOMP	Porcentaje en volumen de agregados, V_g (%)	MEDIO
	Porcentaje en volumen de asfalto, V_b (%)	ALTO
	Porcentaje en volumen de vacios, V_v (%)	ALTO
	Módulo dinámico del asfalto, S_b (Kg/cm ²)	ALTO
Formula de WITCZAK	Frecuencia de aplicación de la carga, f (Hertz)	MEDIO
	Tiempo de aplicación de la carga, t (Seg)	MEDIO
	Porcentaje en volumen de asfalto, V_b (%)	MEDIO
	Porcentaje en volumen de aire, V_a (%)	MEDIO
	Porcentaje pasa tamiz 200, P_{200} (%)	MEDIO
	Viscosidad del asfalto, (10^6 Poisses)	BAJO

IV. CONCLUSIONES

Actualmente existen diferentes métodos, tanto teóricos como prácticos, para determinar el módulo dinámico de una mezcla asfáltica; cada uno de ellos tiene características particulares que hacen que el valor del módulo sea levemente diferente. Sin embargo, los métodos de ensayo son una alternativa ideal, dado que en ellos se simulan las condiciones propias del entorno, por lo que se obtienen resultados más confiables.

Una vez determinado el valor del módulo dinámico de la mezcla asfáltica por los diferentes métodos, se observa que el resultado para una velocidad de 30 km/h oscila entre 22 000 y 41 000 kg/cm²; para una velocidad de 60 km/h, entre 40 000 y 48 000 kg/cm², y para una velocidad de 80 km/h, entre 40 000 y 51 000 kg/cm². Teniendo en cuenta que la velocidad de

operación de los vehículos en vías urbanas de nuestro país está limitada a 60 km/h, se vio la necesidad de determinar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica para esta velocidad, aunque no se contara con información secundaria dentro del ensayo de tracción indirecta analizado en este trabajo.

Para este análisis, al comparar los métodos teóricos con el método del ensayo de laboratorio usado en el presente trabajo, se concluye que el módulo dinámico de la mezcla asfáltica obtenido mediante cualquier método teórico es superior al resultado del ensayo de laboratorio; esto se debe a que en el ensayo de laboratorio se representan las características propias del medio para el cual se diseña la mezcla, mientras que en los métodos teóricos no todas las variables del medio tienen influencia y, por lo tanto, los resultados son mayores, previendo la influencia que pueden llegar a tener dichas variables en los

resultados del módulo dinámico de la mezcla asfáltica.

Al realizar el análisis de sensibilidad de las variables que intervienen en la determinación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica se observa que el método de cálculo mediante monogramas considera muy sensibles las variables; esto se debe a que en este método se pueden cometer errores de paralaje por la configuración gráfica de los monogramas. Por el contrario, las variables del método de cálculo mediante fórmulas de Witczak presentan un grado de sensibilidad de medio a bajo, debido a que este es el método que muestra un valor de módulo dinámico más alto con respecto a los demás.

Al graficar la variación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de cada una de las variables se observa que para una misma variable en diferentes métodos la tendencia no es la misma, pero la relación de proporción entre la variable y el módulo sí lo es. Por el contrario, la única variable que no tiene la misma relación de proporción con el módulo dinámico es el porcentaje pasa tamiz 200, ya que el método de cálculo mediante fórmula de Witczak deja en evidencia un valor óptimo del 8% de esta variable; a diferencia del método del Instituto del Asfalto, que muestra una relación directamente proporcional con el valor del módulo dinámico.

En general, se concluye que las variables que generan un cambio significativo en el valor del módulo dinámico de la mezcla asfáltica, cuando se modifica su valor, son: módulo dinámico del asfalto, porcentaje en volumen de asfalto, la temperatura de la mezcla y la temperatura media anual ponderada.

Con el método de determinación de módulos dinámicos de mezclas asfálticas por medio de la fórmula de Witczak se observa que la mezcla debe tener un porcentaje óptimo del 8% en el pasa tamiz 200; según la información obtenida del ensayo, el porcentaje pasa tamiz 200 de esta mezcla es del 6%, lo que indica que la mezcla puede llegar a tener un mejor módulo dinámico en el caso de que dicho porcentaje se haga coincidir con el óptimo.

REFERENCIAS

- [1] C. H. Higuera Sandoval. *Determinación de Módulos Dinámicos de Mezclas Asfálticas. Guías de clase*. Escuela de Transporte y Vías, Facultad de Ingeniería, UPTC. Tunja, 2005.
- [2] Colombia. Instituto Nacional de Vías -INVIAS- *Normas de ensayo para carreteras*?. Bogotá, 2007.
- [3] C. H. Higuera Sandoval. *Mecánica de pavimentos. Principios básicos*. Escuela de Transporte y Vías, Facultad de Ingeniería, UPTC. Tunja, 2008.