

**CORRELACIÓN ENTRE EL
MÓDULO RESILIENTE Y EL
MÓDULO DINÁMICO PARA
MEZCLAS ASFÁLTICAS
TIPO MDC-19**

**CORRELATION BETWEEN
MODULE RESILIENTE AND
THE DYNAMIC MODULE
FOR ASPHALT MIXTURES
TIPO MDC-19**

**CORRELACIÓN ENTRE O
MÓDULO RESILIENTE E O
MÓDULO DINÂMICO
PARA MISTURAS
ASFÁLTICAS TIPO
MDC-19**

**Carlos Hernando Higuera-Sandoval*,
Jhonatan Stiven Pardo-Castellanos**,
Johan Eduardo Peña-Sánchez*****

* Docente Titular. Escuela de Transporte y Vías.
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
Tunja-Colombia.

E-mail: carlos.higuera@uptc.edu.co

**Ingeniero de Transporte y Vías.
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
Tunja-Colombia.

E-mail: jhonatan.pardo@uptc.edu.co

*** Ingeniero de Transporte y Vías.
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
Tunja-Colombia.

E-mail: johan.pena@uptc.edu.co

Fecha de recepción: 06 de noviembre 2017

Fecha de aprobación: 23 de mayo 2018

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la correlación existente entre los ensayos de módulo resiliente y módulo dinámico, para una mezcla densa en caliente con agregado pétreo de tamaño máximo de 19 mm (MDC-19) un asfalto convencional tipo AC 60-70 y un tránsito de diseño de 500 000 a 5 000 000 de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño. El diseño de la mezcla se realizó con la metodología Marshall para determinar el óptimo de asfalto teórico, con el cual se cumplen las características de estabilidad, flujo, propiedades volumétricas y dinámicas de la mezcla. Comprobada la mezcla, se dio inicio a la ejecución de las pruebas para la determinación del módulo resiliente y módulo dinámico a temperaturas de ensayo específicas de 5, 25 y 40°C siguiendo las metodologías citadas respectivamente. La investigación concluye en la generación de una correlación que unifica las condiciones del ensayo de módulo resiliente y módulo dinámico para predecir con un nivel de confianza superior al 94% el valor de rigidez para una mezcla MDC-19, a diferentes temperaturas (T_{mix}) y diferentes velocidades de diseño de proyecto, esta correlación tiene gran importancia para ser usada en las fases del diseño o prediseño de estructuras de pavimentos flexibles.

Palabras claves: Módulo resiliente, módulo dinámico, Marshall, correlación, ensayo de tracción indirecta, ensayo de tracción directa, LVDT.

Abstract

The present work must like objective determine the existing correlation between the tests of resilient module and dynamic module, for a dense mixture in the heat of the moment with stony aggregate of maximum size of 19 mm (MDC-19) a conventional asphalt type AC a 60-70 and transit of design from 500 000 to 5 000 000 of equivalent axes of 8,2 tons in the design track during the period of design. The design of the mixture was realized with the Marshall methodology to determine the optimal one of theoretical asphalt, which the stability characteristics are fulfilled, flow, volumetric and dynamic properties of the mixture. Verified the mixture, one occurred to beginning to the execution of the tests for the determination of the resilient module and dynamic module to specific temperatures of test of 5, 25 and 40°C following the methodologies mentioned respectively. The investigation concludes in the generation of a correlation that unifies the conditions of the test of resilient module and dynamic module to predict with a confidence level superior to 94% the value of rigidity for a mixture MDC-19, to different temperatures (T_{mix}) and different speeds from project design, this correlation has great importance to be used in the phases of the design or predesign of structures of flexible pavements.

Keywords: Resiliente module, dynamic module, Marshall, correlation, indirect tension test, direct tension test, LVDT.

Resumo

Le présent travail a pour but de déterminer la corrélation existante entre les essais module resiliente et module dynamique, pour un mélange dense à chaud avec ensemble pierreux de taille maximale de 19 mm (MDC-19) un asphalte conventionnel type AC 60-70 et un transit de conception de 500 000 à 5 000 000 d'axes équivalents de 8.2 tonnes dans la voie de conception pendant la période de conception. La conception du mélange a été effectuée avec la méthodologie Marshall pour déterminer ce qui est optimal

d'asphalte théorique, avec lequel on accomplit les caractéristiques stabilité, flux, propriétés volumétriques et dynamiques du mélange. Vérifiée le mélange, a été donné début à l'exécution des essais pour la détermination le module resiliente et le module dynamique à des températures d'essai spécifiques 5, 25 et de 40°C en suivant les méthodologies citées respectivement. La recherche conclut dans la génération d'une corrélation qu'elle unifie les conditions de l'essai module resiliente et module dynamique pour prédire avec un niveau de confiance supérieure à 94% la valeur de rigidité pour un mélange MDC-19, à différentes températures (Tmix) et différentes vitesses de conception de projet, cette corrélation a une grande importance pour être utilisée dans les phases la conception ou la preconception de structures de pavements flexibles.

Palavras chave: Módulo resiliente, módulo dinâmico, Marshall, correlação, ensaio de tração indireta, ensaio de tração direto, LVDT.



I. INTRODUCCIÓN

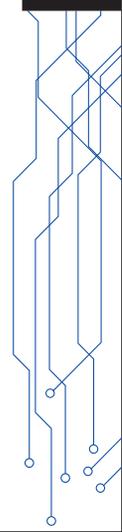
Colombia es un país en el cual la gran mayoría de sus vías importantes están hechas con pavimentos flexibles (Ministerio de Transporte, 2015). Muchos de los problemas que presentan estos pavimentos, es que una vez puestos en servicio empiezan a presentar deficiencias en lapsos de tiempo muy cortos que no están de acuerdo con la vida útil a la cual fue diseñado el pavimento. Estos problemas se pueden presentar debido a múltiples factores negativos ocurridos durante el proceso de diseño de la mezcla asfáltica a la cual no se le hacen los controles pertinentes antes de ser colocada en servicio.

Dentro del control de diseño de pavimentos flexibles los módulos dinámicos y resilientes son muy importantes, pues los valores obtenidos se pueden emplear en aspectos tales como: el espesor de la capa de pavimento asfáltico y determinación de los factores propios de la mezcla que han influido en la generación de grietas y bajo desempeño ante la imposición de las cargas del tránsito que hace uso de la vía. Para poder inspeccionar y vigilar las mezclas asfálticas se desarrollan ensayos de laboratorio, los cuales

pretenden contrastar el comportamiento real del pavimento y así poder tener valores aproximados de las condiciones de la mezcla asfáltica que se va a disponer como capa de rodadura.

Debido a que en Colombia el uso de correlaciones para el cálculo de módulos se ha limitado en gran medida, para no caer en errores de diseño, los laboratorios han adquirido equipos de alta tecnología para poder ensayar las mezclas y determinar con mayor certeza el valor del módulo que presentan estas. La Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) dispone de los equipos necesarios para poder determinar los módulos de las mezclas asfálticas. Es por esto, que en la presente investigación se busca obtener un modelo matemático que correlacione los módulos resilientes y dinámicos en una mezcla tipo MDC-19.

La estructura del artículo es la siguiente: En la sección II se presentan las generalidades de los ensayos de módulo resiliente y dinámico de las mezclas asfálticas, en la sección III se presentan los resultados obtenidos, en la sección IV la correlación obtenida y finalmente, en la sección V se presenta la discusión, conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.



II. GENERALIDADES

Comúnmente, las investigaciones que se realizan respecto a la determinación de los valores de módulo de las mezclas asfálticas a nivel mundial están direccionadas, en su gran mayoría, a la determinación del módulo dinámico el cual permite evaluar la condición visco-elástica del material que compone la mezcla asfáltica, y por ende el desarrollo de las curvas maestras para este tipo de ensayo. Respecto a la determinación del módulo resiliente, las investigaciones que se realizan cada día son menores ya que se ha comprobado que los valores de módulo dinámico son más próximos a los valores de módulo obtenidos directamente en campo.

Las curvas maestras se usan con el fin de poder obtener un módulo de la mezcla asfáltica a la temperatura y velocidad (Frecuencia) deseada, logrando esto con la aplicación de complejas ecuaciones en las cuales se relaciona el gradiente térmico (módulo dinámico) y el gradiente de velocidad (módulo resiliente) con factores que permiten ajustar los distintos valores de módulos a las condiciones deseadas.

Para la determinación de las curvas maestras y por ende de los valores de módulo resiliente y dinámico, es de resaltar que aparte de tener la temperatura del proyecto (T_{mix}) (Shell, 1978). Se requiere conocer, utilizando las Ecuaciones (1,2), el tiempo o frecuencia de aplicación de las cargas en función de la velocidad de diseño (Huang, 2004).

$$\text{Log}(t) = 0.005h - 0.2 - 0.94\text{Log}(V) \quad (1)$$

$$F_r = \frac{1}{2 * \pi * t} \quad (2)$$

Dónde: V es la velocidad de diseño del proyecto (km/h), h es el espesor esperado de la carpeta asfáltica (cm), t es el tiempo de aplicación de la

carga (s) y F_r es la frecuencia de aplicación de la carga del tránsito (Hz).

A. Módulo resiliente

El ensayo de módulo resiliente (INVIAS, 2013) se caracteriza por evaluar únicamente la capacidad elástica de la mezcla al momento de la aplicación diametralmente de cargas repetitivas que se caracterizan por tener tiempos cortos de reposo.

En la Figura 1 se muestra el montaje para la aplicación de este ensayo.

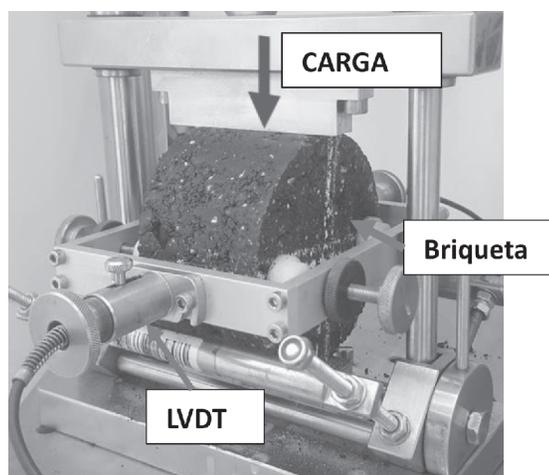


Figura 1. Montaje para la realización del ensayo de módulo resiliente, en el equipo NAT del laboratorio de suelos y pavimentos de la UPTC.
Fuente: Elaboración propia.

Tras la aplicación de las cargas repetitivas, se observa en la Figura 2, que después de un cierto número de ciclos de carga la deformación llega a ser constante. En este punto, la respuesta de la mezcla sometida al ensayo se considera como elástica.

El módulo calculado en estos puntos se denomina como módulo resiliente.

La Ecuación (3) describe el cálculo del módulo resiliente (S_m) en MPa.

$$S_m = \frac{F * (v + 0.27)}{z * h} \quad (3)$$

Dónde: F es la carga aplicada (N), v es la deformación horizontal (mm), z es el espesor de la briqueta (mm) y h es el coeficiente Poisson.

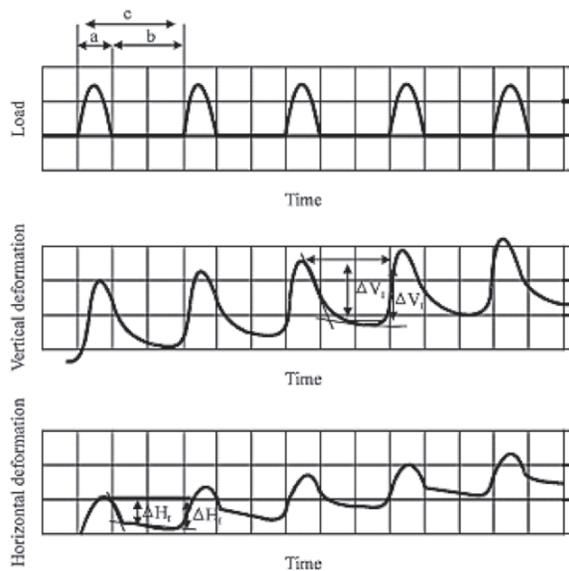


Figura 2. Forma de pulso y deformación en el módulo resiliente (ASTM D4123-82, 1995)

Fuente: Elaboración propia.

Para la elaboración de la curva maestra del módulo resiliente se aplica la metodología (Benavides, 2015). La Ecuación (4) se emplea para producir el desplazamiento necesario de los valores obtenidos en el laboratorio en función de la velocidad de diseño.

$$T_r = \frac{1}{\frac{1}{T_e} - 4 \times 10^{-5} * \text{Ln} \left(\frac{F_r}{F_e} \right)} \quad (4)$$

Donde: T_e es la temperatura del ensayo ($^{\circ}K$), F_r es la frecuencia de aplicación de la carga del tránsito (Hz), F_e es la frecuencia de realización del ensayo y T_r es la temperatura equivalente ($^{\circ}K$).

En la Figura 3 se muestran las curvas maestras obtenidas tras realizar el procedimiento descrito anteriormente para distintas velocidades de diseño.

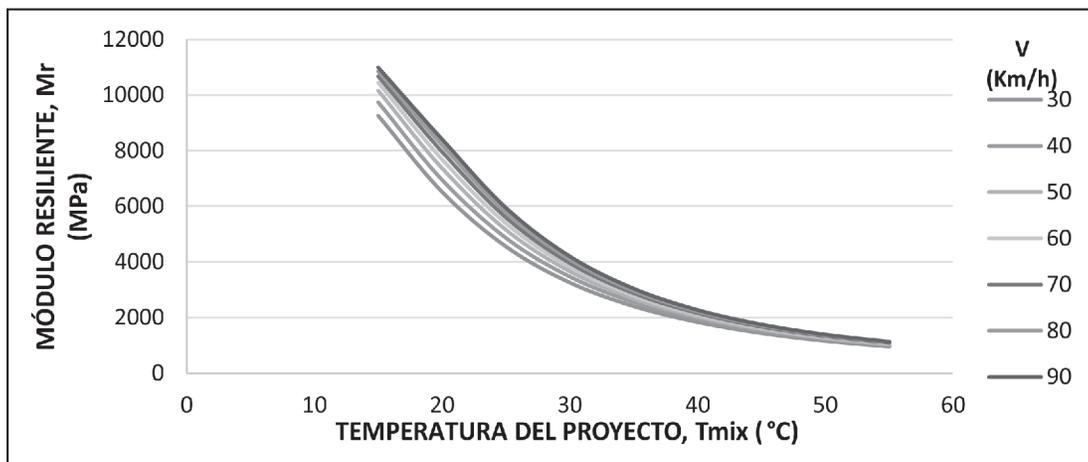


Figura 3. Curvas maestras del módulo resiliente para distintas velocidades de diseño

Fuente: Elaboración propia.

Realizadas las curvas maestras, se puede efectuar la lectura del módulo resiliente en función de la temperatura (T_{mix}) y velocidad de diseño deseada. Evidenciando que dicho valor disminuye considerablemente a medida que la temperatura aumenta lo cual produce pérdida de rigidez en la mezcla asfáltica.

B. Módulo dinámico

El ensayo de módulo dinámico o módulo complejo (AASHTO, 2005) (INVIAS, 2007) se caracteriza por evaluar el comportamiento elástico y viscoso de la mezcla tras la aplicación de cargas repetitivas con un esfuerzo de compresión uniaxial a lo largo de la briqueta. En la Figura 4, se muestra el montaje para la ejecución de este ensayo.

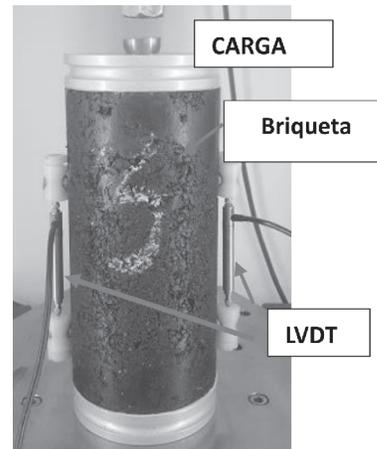


Figura 4. Montaje para la realización del ensayo de módulo dinámico, en el equipo NAT del laboratorio de suelos y pavimentos de la UPTC.

Fuente: Elaboración propia.

La Ecuación (5) se aplica, para el cálculo del módulo dinámico durante cada ciclo de carga aplicado.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (5)$$

Donde: σ_0 es el esfuerzo máximo (Kpa), ϵ_0 es la deformación máxima (mm) y es el módulo complejo (Mpa).

En la Figura 5, se muestra la curva Harvesiana que se utiliza para el desarrollo de este ensayo.

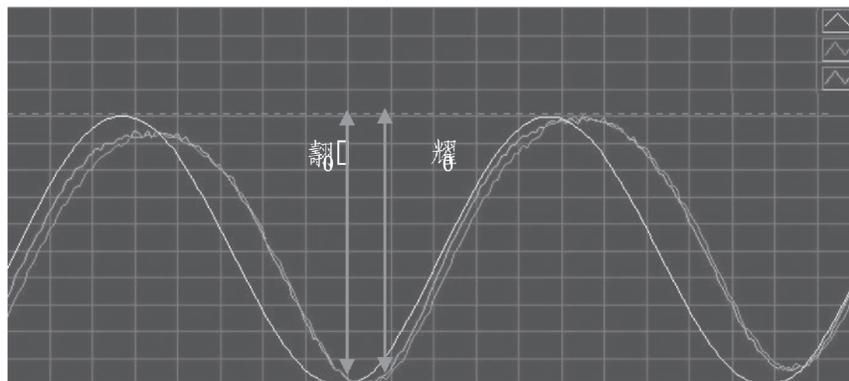


Figura 5. Forma de esfuerzo y deformación en el módulo dinámico obtenido en el equipo NAT de la UPTC.

Fuente: Elaboración propia.

Para la elaboración de la curva maestra del módulo dinámico se aplica la metodología (NCHRP, 2004) y como fuentes de guía (ASEFMA, 2015) (Martínez, 2013) (García, 2013) (Joaquim, 2013) (Leiva, 2013) (Araya, 2013) (LANAMME, 2013), llegando a la deducción del módulo aplicando la Ecuación (6)

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(tr)}} \quad (6)$$

Donde: $|E^*|$ Módulo dinámico (MPa), t_r es el tiempo de aplicación de la carga a la temperatura de referencia, δ es el valor del módulo mínimo (Mpa), $\delta + \alpha$ es el valor de módulo máximo (Mpa) y β y γ son parámetros que describen la forma de la curva sigmoideal.

Para la determinación del $\log(tr)$, el cual está en función de la temperatura y la velocidad de diseño, se aplica la Ecuación (7).

$$\log(t_r) = \log(t) - (at^2 + bT + c) \quad (7)$$

Dónde: t es el tiempo de aplicación de la carga a la temperatura de ensayo (s), a , b y c son coeficientes de regresión obtenidos tras la aplicación del Shift Factor y T es la temperatura de diseño (°F).

En la Figura 6, se muestra a curva maestra del módulo dinámico obtenida para una temperatura de diseño (T_{mix}) de 20°C. Utilizando los factores mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1.

Factores de ajuste generados para una temperatura de diseño (t_{mix}) de 20°C

δ	2.5794	a	0.0006
α	1.6219	b	-0.1585
β	-0.4945	c	8.1081
γ	0.6043		
$c1$	1.2040		

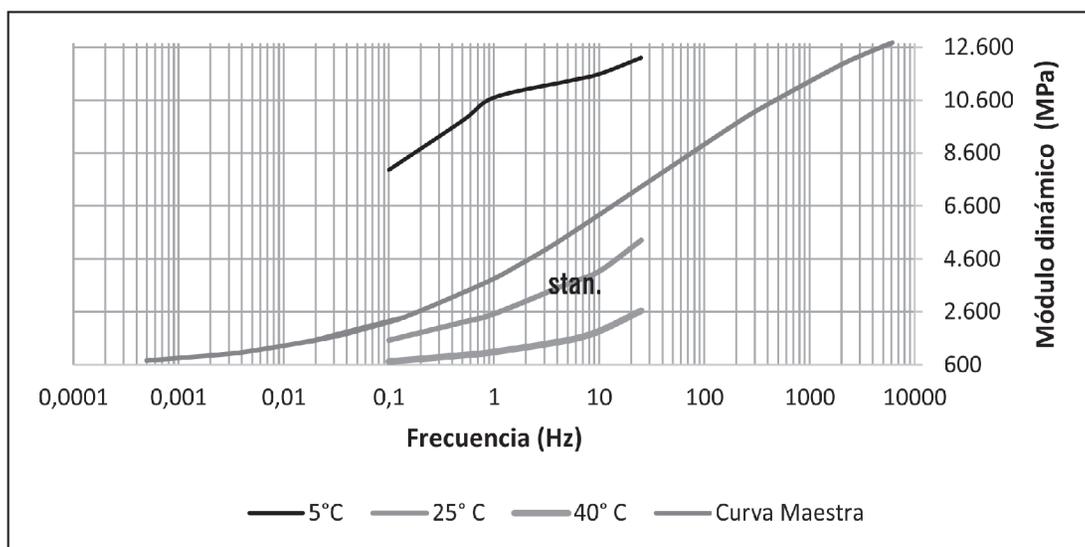


Figura 6. Curva maestra del módulo dinámico para una temperatura de diseño de 20°C.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

En la Tabla 2, se presenta la granulometría utilizada para la elaboración en el laboratorio de la mezcla de

diseño tipo INVIAS MDC-19, caracterizada por ser una de las mezclas asfálticas típicas producidas en varias regiones de Colombia para la construcción de pavimentos flexibles.

Tabla 2. Porcentaje de pesos retenidos según tamiz.

U.S stan.	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
Punto medio	100	87.5	79	57	37	19.5	12.5	6

C. Propiedades de la mezcla MDC-19.

La mezcla diseñada mediante la metodología Marshall (ASTM, 2010) (ASTM, 2010) (INVIAS, 2013), presenta las características volumétricas y dinámicas (INVIAS, 2013) que se muestran a continuación.

- Porcentaje óptimo de asfalto: 5.1%
- Estabilidad: 11578 Newton
- Flujo: 3.47 mm
- Densidad Bulk: 2.335 g/cm³
- Vacíos con aire: 3.9%

D. Módulo resiliente

A los valores determinados después de la realización de los ensayos, se le aplicó la metodología anteriormente explicada en la sección A para un rango de velocidades entre 30 a 90 km/h obteniendo las curvas maestras correspondientes. En las cuales se realiza la lectura de módulo a un rango de temperatura (Tmix) entre 15 a 55°C obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de módulo resiliente (Mpa) a distintas velocidades y temperaturas de diseño

Tmix °C	VELOCIDAD DE DISEÑO (Km/h)						
	30	40	50	60	70	80	90
15	9 258	9 741	10 160	10 448	10 674	10 851	10 992
20	6 517	6 948	7 366	7 683	7 958	8 197	8 407
25	4 551	4 860	5 152	5 385	5 592	5 776	5 942
30	3 258	3 471	3 660	3 818	3 959	4 085	4 201
35	2 408	2 555	2 678	2 784	2 879	2 964	3 042
40	1 837	1 940	2 023	2 096	2 161	2 219	2 272
45	1 442	1 516	1 575	1 627	1 673	1 714	1 751
50	1 161	1 216	1 261	1 299	1 333	1 362	1 390
55	956	998	1 034	1 064	1 089	1 112	1 133

E. Modulo dinámico

A los valores determinados después de la realización de los ensayos, se le aplico la metodología anteriormente explicada en la sección B para un rango de temperaturas (Tmix)

entre 5 a 40°C obteniendo las curvas maestras correspondientes. En las cuales se realiza la lectura de módulo en un rango de frecuencias entre 5.50 y 15.45 Hz correspondiente a velocidades entre 30 y 90 km/h. Obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de modulo dinámico (mpa) a distintas velocidades y temperaturas de diseño

Tmix °C	VELOCIDAD DE DISEÑO (Km/h)						
	30	40	50	60	70	80	90
5	13239	13398	13516	13608	13684	13748	13803
10	11594	11827	12001	12139	12254	12350	12434
15	9585	9879	10103	10282	10431	10559	10670
20	7500	7819	8066	8267	8436	8582	8710
25	5651	5954	6193	6390	6558	6705	6834
30	4216	4477	4686	4861	5012	5145	5263
35	3203	3416	3590	3737	3864	3977	4079
40	2530	2703	2845	2966	3072	3166	3251

Obtención de correlación

Utilizando los resultados de módulos de la sección 3 se realiza un gráfico en el cual se aprecia la relación entre el módulo resiliente y dinámico, como se evidencia en la Figura 7.

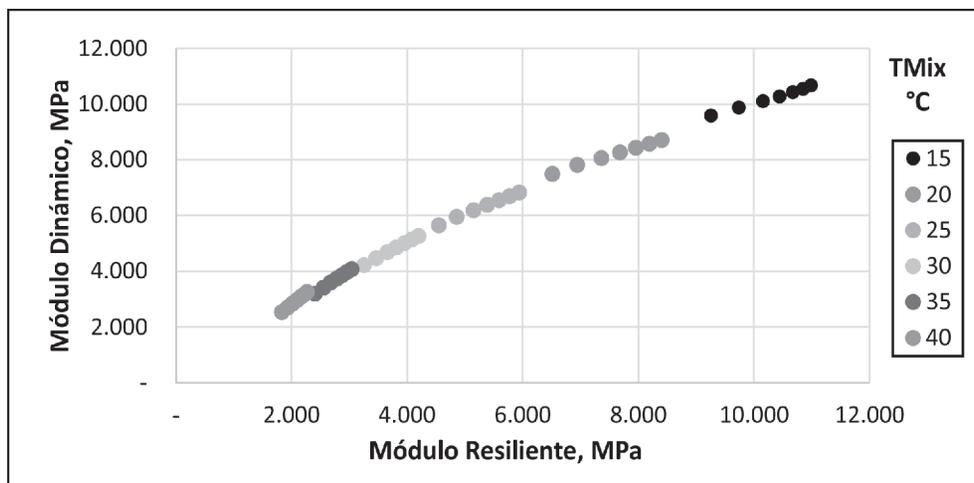


Figura 7. Valores de módulos de laboratorio a distintas temperaturas (Tmix) y velocidades de diseño

Fuente: Elaboración propia.

La expresión matemática que mejor representa el comportamiento dado en la Figura 7 es una función polinómica de segundo grado, Ecuación (8).

$$MD = k_1 M_r^2 + K_2 M_r + k_3 \quad (8)$$

Dónde: MD es el módulo dinámico (MPa), M_r es el módulo resiliente (MPa) y K_1 , K_2 y K_3 son constantes de calibración de la ecuación los cuales se determinaron utilizando la herramienta Solver de Excel, obteniendo los siguientes valores:

$$K_1 = -3.17 \times 10^{-05}$$

$$K_2 = 1.274$$

$$K_3 = 431.361$$

Es de resaltar que la Ecuación (8) solo se utiliza (AASHTO, 1993) si se tiene el valor de módulo resiliente tras la aplicación de la metodología descrita en la sección 2.A.

En la Tabla 5 se muestran las diferencias porcentuales obtenidas entre el módulo dinámico de laboratorio y el calculado utilizando la Ecuación (8).

Tabla 5. Variación porcentual entre el módulo dinámico de laboratorio y el calculado.

Tmix °C	VELOCIDAD DE DISEÑO (Km/h)						
	30	40	50	60	70	80	90
15	-0.80%	-0.47%	-0.01%	-0.01%	-0.14%	-0.35%	-0.62%
20	-1.49%	-0.85%	0.37%	0.98%	1.49%	1.88%	2.19%
25	-1.40%	-1.35%	-0.65%	-0.29%	0.09%	0.41%	0.71%
30	0.70%	-0.13%	-0.36%	-0.58%	-0.68%	-0.74%	-0.75%
35	3.52%	1.85%	0.73%	-0.10%	-0.71%	-1.21%	-1.59%
40	5.32%	2.99%	1.21%	-0.11%	-1.15%	-2.01%	-2.72%

Dado el caso que no se disponga del valor de módulo resiliente de laboratorio, se puede aplicar la Ecuación (9) para la obtención de este valor.

$$Mr = K_4 e^{-0.065 * T} \quad (9)$$

$$K_4 = 12335V^{0.1961} \quad (10)$$

Donde: V es la velocidad de diseño (km/h), T es la temperatura de diseño (Tmix °C) y Mr es el módulo resiliente (Mpa).

Si reemplazamos la Ecuación (9) en la Ecuación (8) se obtienen los valores de módulo dinámico. En la Tabla 6 se presenta la variación porcentual respecto al módulo dinámico calculado con la metodología descrita en la sección 2.B.

Tabla 6. Variación porcentual entre el módulo dinámico de laboratorio y el calculado utilizando la ecuación (9).

Tmix °C	VELOCIDAD DE DISEÑO (Km/h)						
	30	40	50	60	70	80	90
15	-2.19%	-1.47%	-0.88%	-0.39%	0.03%	0.40%	0.72%
20	-1.12%	-1.05%	-0.91%	-0.74%	-0.58%	-0.41%	-0.24%
25	1.75%	1.02%	0.56%	0.25%	0.03%	-0.13%	-0.25%
30	4.76%	3.31%	2.29%	1.52%	0.92%	0.43%	0.03%
35	5.70%	3.76%	2.34%	1.24%	0.35%	-0.38%	-1.01%
40	2.95%	0.79%	-0.82%	-2.08%	-3.13%	-4.00%	-4.75%

Con las variaciones porcentuales determinadas en las condiciones descritas anteriormente, se evidencia que con la correlación de la Ecuación (8) considerando la Ecuación (9) se obtienen valores de módulo dinámico muy próximos a los

registrados en laboratorio. En la Figura 8, se muestra de forma más clara la proximidad de dichos valores para distintas velocidades y temperaturas de diseño.

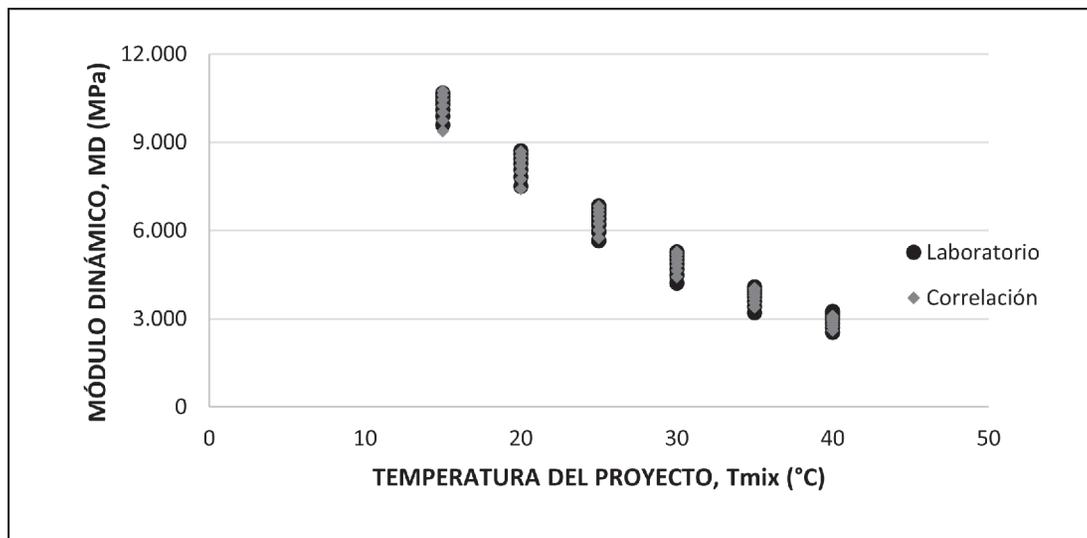


Figura 8. Valores de módulos dinámicos de laboratorio y determinados con la correlación a distintas temperaturas (Tmix) y velocidades de diseño
Fuente: Elaboración propia.

III. CONCLUSIONES

Al calcular la variación entre los valores de módulo resiliente (M_r) y el módulo dinámico (MD) para distintas temperaturas (T_{mix} °C) y diferentes velocidades de diseño en (km/h) se concluye que:

- a) El M_r sobrepasa el valor rigidez obtenido en el MD para velocidades entre 50 y 90 km/h a una temperatura (T_{mix}) de 15°C, en un rango de -0.56% a -2.93%.
- b) Para temperaturas (T_{mix}) superiores a 15°C y velocidades entre 30 a 90 km/h el MD es superior al M_r para todas las condiciones posibles de velocidad y temperatura.

Los valores para los módulos resiliente y dinámico son muy cercanos y similares; sin embargo, en el 87% de los casos el valor del módulo dinámico es mayor. A medida que la temperatura es superior a los 20°C (T_{mix}) el valor del módulo cambia apreciablemente. Esto se da debido a la interacción existente entre la temperatura de la mezcla y el punto de ablandamiento del asfalto.

Adicionalmente, utilizando la Ecuación (8) con el módulo resiliente de laboratorio, a una velocidad y temperatura de diseño, se obtiene un módulo dinámico que varía entre el -2.72% y +5.32% del valor que se obtiene al realizar la lectura en la curva maestra del módulo dinámico a la velocidad y temperatura correspondiente. Por otra parte, usando la Ecuación (9) se calcula un módulo resiliente que tiene un rango de variación entre el -3.37% y +4.59% del valor real obtenido en la curva maestra para una mezcla tipo INVIAS - MDC-19.

Sin embargo, reemplazando la Ecuación (9) en la Ecuación (8) la exactitud que tendrá el módulo dinámico calculado está en un rango de variación entre -4.75% y +5.7%.

La correlación obtenida relaciona las condiciones del ensayo de módulo resiliente y del módulo dinámico para predecir, con un porcentaje de variación máximo del 6%, el valor del módulo de una mezcla asfáltica tipo INVIAS MDC-19 respecto al valor obtenido en los ensayos de laboratorio, a diferentes temperaturas (T_{mix}) y velocidades de diseño de proyecto.

La correlación producto de esta investigación puede ser utilizada para conocer un valor aproximado del módulo, a diferentes condiciones de temperatura y velocidades de diseño, y puede ser usada para el diseño y prediseño de estructuras de pavimentos. Además, puede aplicarse para los niveles de diseño de pavimentos dados en (AASHTO, 1993), como:

- Nivel 2: Diseño de estructuras de pavimentos utilizando valores procedentes de ensayos de laboratorio y correlaciones.
- Nivel 3: Diseño de estructuras de pavimentos utilizando valores obtenidos mediante el uso de correlaciones.

IV. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente artículo agradecen a la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por el apoyo brindado para la realización de la investigación.

REFERENCIAS

- AASHTO (2005). TP-62-03, Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt. American Association of State Highway and Transportation Officials. U.S.

- American Association of State Highway Transportation Officials - AASHTO. (1993). Guide for Design of Pavement Structures. Washington, D.C.
- Araya, F. (2013). Parámetros de curvas maestras de asfaltos utilizados en Chile. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso, Chile.
- ASTM D4123-82 (1995), Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures (Withdrawn 2003), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- ASTM (2010). D6926-10, Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM (2006). D6927-06, Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- Asociación española de fabricantes de mezclas asfálticas (ASEFMA). (2015). El módulo dinámico de la mezcla bituminosa: importancia, evaluación y estimación. Número 16, Volumen V.
- Benavides C. (2015). Caracterización dinámica de materiales viales. [Diapositivas]. Corasfaltos.
- García, G. (2013). Medición y estimación del módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente utilizadas en Chile. Universidad Técnica Federico Santa María Valparaíso, Chile.
- Huang Y. H. (2004). Pavement analysis and design. Prentice – Hall. Inc- United State of America.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS) (2007). INV E-754-07, Módulo dinámico de mezclas asfálticas. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Instituto Nacional de Vías. Bogotá.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS) (2013). INV E-749-13, Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente en mezclas asfálticas. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Instituto Nacional de Vías. Bogotá.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS) (2013). INV E-748-13, Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Instituto Nacional de Vías. Bogotá.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS) (2013). Artículo 450, Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Instituto Nacional de Vías. Bogotá.
- Joaquim, A. (2013). Estudio del comportamiento en el campo de la frecuencial y viscoelástico de mezcla de asfalto modificada por el intermedio de módulo complejo. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil.
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de Costa Rica. (2013). Valoración de la rigidez de las mezclas asfálticas. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Leiva F. (2004). Estudio del módulo dinámico complejo de mezclas asfálticas. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME). Costa Rica.

Leiva, P. (2013). Interfaz gráfica de cálculo de módulo dinámico de mezclas y asfaltos. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Martínez, F. (2013). Modelos para la construcción de curvas maestras del módulo dinámico de mezclas asfálticas. Laboratorio vial – Instituto de mecánica aplicada y estructuras (I.M.A. E). Rosario, Argentina.

Méndez, J. (2013). Evaluación de modelos reológicos para el módulo complejo de asfaltos. Universidad de San Buenaventura. Cartagena de Indias, Colombia.

Ministerio de Transporte. (2015). Transporte en cifras estadísticas. Bogotá.

National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design. Part 2. Design inputs. 505 West University Avenue. Champaign, Illinois.

SHELL (1978). Pavement design manual: asphalt pavement and overlays for road traffic. Shell International Petroleum. London, Shell.