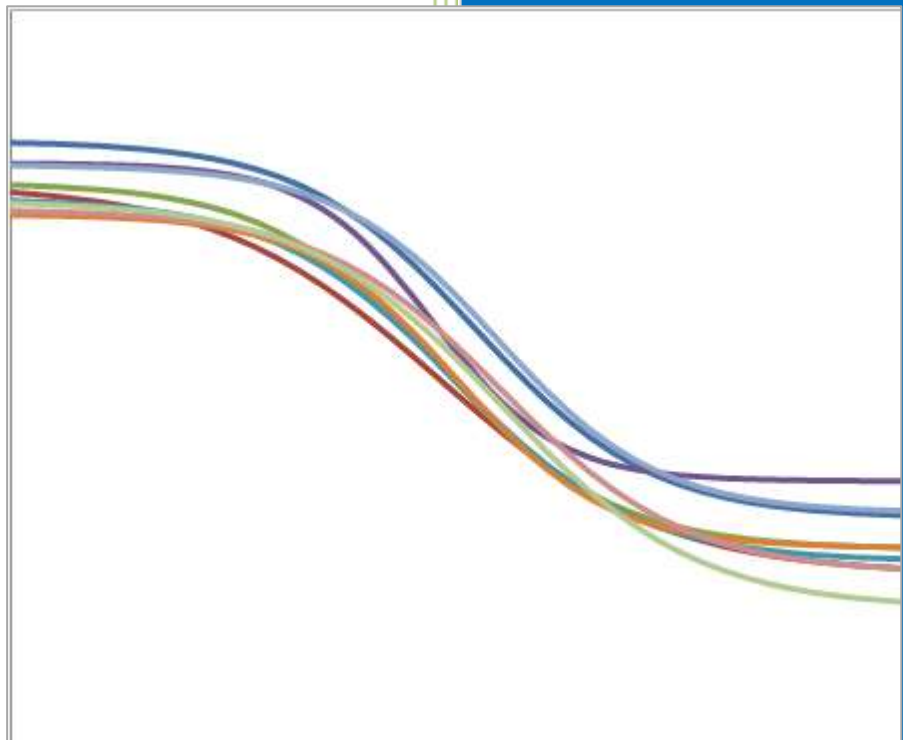


2016

Influencia de los Agregados Pétreos en el Módulo Dinámico de mezclas Asfálticas en el Departamento de Santander, Colombia



Ing. Norma Cristina Solarte Vanegas, M.Sc.

Directora Facultad de Ingeniería Civil, Universidad
Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia
e-mail: norma.solarte@upb.edu.co
tel: +(57) 3015708323

Ing. Lina Marithza Polanco Sánchez

Estudiante Maestría en Ingeniería Civil, Universidad
Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia
e-mail: lina.polanco@upb.edu.co
tel: +(57) 3212077178

Resumen

La rigidez de la mezcla asfáltica es uno de los parámetros de entrada principales de las nuevas metodologías de diseño que han sido desarrolladas para pavimentos flexibles. Por consiguiente, es importante caracterizar la rigidez de la mezcla bituminosa a través de ensayos dinámicos los cuales permiten evaluar su comportamiento de forma más acertada. En Colombia, sin embargo, el alto costo de las pruebas y la carencia de equipos dinámicos, dificulta esta caracterización. Este estudio evalúa la sensibilidad a la temperatura y a la velocidad de aplicación de las cargas al concreto asfáltico, construido en Santander, con tres diferentes fuentes de agregado pétreo, mediante el ensayo de Módulo Dinámico. Para ello, se fabricaron 9 tipos de mezcla, combinando el porcentaje de asfalto (4.5%, 5.0% y 5.5%) y el tipo de fuente del material granular. El asfalto empleado fue 60/70, el cual proviene de la refinería de Ecopetrol en Barrancabermeja y el agregado del río Chicamocha, río Sogamoso y de la zona Bocas, todos ubicados en el departamento de Santander, Colombia. Las probetas fueron evaluadas a una carga dinámica de compresión axial (Máquina DTS-30), bajo seis (6) valores de frecuencia de aplicación y cinco (5) valores de temperatura, determinando así el modulo dinámico de la mezcla en cada combinación. A partir de lo anterior, se logró establecer que los módulos obtenidos para las diferentes fuentes de agregado varían considerablemente, entre sí, a pesar de pertenecer a una misma región geográfica. La importancia de este estudio, es determinar valores de módulos dinámicos propios de la zona para ser empleados en las etapas de diseño y construcción y no emplear datos obtenidos mediante modelos de predicción.

Palabras clave: módulos dinámicos, asfalto, mezcla asfáltica agregado pétreo.

Abstract

The stiffness of the hot mixture asphalt is one of the main input parameters of new design methodologies that have been developed for flexible pavements. Therefore, is important determine the stiffness of the asphalt mixture through dynamic tests which evaluate their behavior more accurate way. However, in Colombia, the high cost of testing and lack of dynamic equipment make characterization difficult. This study evaluates the temperature sensitivity and the speed of load application to concrete pavement. This study evaluates the temperature sensitivity and the speed of load application to concrete asphaltic built in Santander, with three different sources of aggregate, by Dynamic Modulus test. Nine 9 types of mixture were produced combining the percentage of asphalt (4.5%, 5.0% y 5.5%) and the type of source of granular material. The asphalt used was 60/70, which comes from Ecopetrol's refinery in Barrancabermeja and aggregate Chicamocha River, Sogamoso River and Bocas area, all located in the department of Santander, Colombia. The specimens were tested at a dynamic axial compressive load (DTS-30 machine), six (6) frequency values and five (5) temperature values, thus determining the dynamic modulus of the mixture in each combination. From the above, it was established that the modules obtained for the different sources of aggregate vary considerably, although they belong to the same geographical region. The importance of this study is to determine values of dynamic modules of the area to be used in the design and construction stages and not use data obtained by predictive models.

Keywords: dynamic modulus, asphalt, asphalt mixture and aggregates.

1. INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas constituye uno de los datos de entrada más importantes en el diseño mecanicista de pavimentos flexibles (DI BENEDETTO, PARTL, FRANCKEN, & DE LA ROCHE, 2001), siendo el módulo dinámico (MD) una de las propiedades fundamentales de estas. Para la determinación del MD de una mezcla asfáltica existen diferentes metodologías, como: ensayos de laboratorio, nomogramas y fórmulas o correlaciones. Las fórmulas más modernas de estimación del MD (CHRISTENSEN Jr, PELLINEN, & BONAQUIST, 2003; ARAYA, et al., 2012) tienen en cuenta factores propios del diseño de mezcla, como porcentaje de asfalto, porcentaje de agregado, viscosidad del asfalto, porcentaje de vacíos de la mezcla, entre otros. En cuanto a los ensayos utilizados están el de tracción indirecta, compresión axial directa y flexo tracción de una viga cargada en el tercio central.

Diferentes autores han evaluado el comportamiento dinámico de mezclas asfálticas. Vidal (VIDAL, 2006) determinó el MD para tres fuentes de agregado utilizando un equipo ultrasónico, encontrando que un aumento de la frecuencia de carga aumentaba el MD. Reyes (REYES O. , 2009) evaluó el MD para tres tipos de asfalto, obteniendo mejores resultados en las mezclas que contenían asfalto 60/70. Higuera (HIGUERA, NARANJO, & CETINA, 2011) comparó los valores de MD obtenidos en el laboratorio con diferentes métodos, llegando a la conclusión que los métodos establecidos no representan las condiciones reales de la mezcla evaluada, toda vez que estos son desarrollados en otras condiciones. Recientemente Rondón (RONDÓN & REYES, 2012), evaluó el desempeño de una mezcla asfáltica adicionándole asfaltita en diferentes cantidades, encontrando que las mezclas modificadas presentan una mejor respuesta que las mezclas convencionales.

Este trabajo busca evaluar el efecto de la ceniza en el MD de mezclas asfálticas. En su primera parte se describen los materiales y métodos empleados para la elaboración de la mezcla. Seguidamente se muestran los resultados obtenidos y finalmente se presentan las conclusiones principales de este trabajo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este plan de trabajo se desarrolló con la finalidad de analizar el comportamiento de la vida en fatiga de mezclas asfálticas, utilizadas en capas de rodadura empleando tres tipos de agregados pétreos utilizados comúnmente en la zona de Santander.

A. *Diseño de mezclas asfálticas y caracterización de materiales*

Las mezclas se definieron de acuerdo con las especificaciones de la norma colombiana INVIAS Art. 450 (INVIAS, 2013) para mezclas densas en caliente MDC-19, que consta de un agregado pétreo y ligante asfáltico. Se optó por este tipo de mezcla debido a que son las más utilizadas en la región para conformar capas de rodadura. En el proceso de formulación de la mezcla, se utilizaron tres tipos de agregados provenientes de las fuentes del Río Chicamocha (Fuente A), Zona de Bocas (Fuente B) y Río Sogamoso (Fuente C), a los cuales se le realizaron los siguientes ensayos para satisfacer los requisitos de calidad establecidos en especificaciones (INVIAS, 2013): Análisis granulométrico de agregados

gruesos y finos (ASTM C 136-06), peso específico y absorción de agregados finos (ASTM C 128-07), peso específico y absorción de agregados gruesos (ASTM C 127-07), resistencia al desgaste de los agregados (tamaños menores de 3/4") por medio de la máquina de Los Ángeles (ASTM C 131-06), partículas fracturadas (ASTM D 5821-01), ensayo para medir el equivalente de arena (ASTM D 2419-09) e índices de alargamiento y aplanamiento (ASTM D 4791-10).

En la Figura 1, se presenta la granulometría empelada para el diseño de mezcla DC-19. Además en la Tabla 1 se encuentran resumidos los resultados para satisfacer los requisitos de calidad de los agregados.

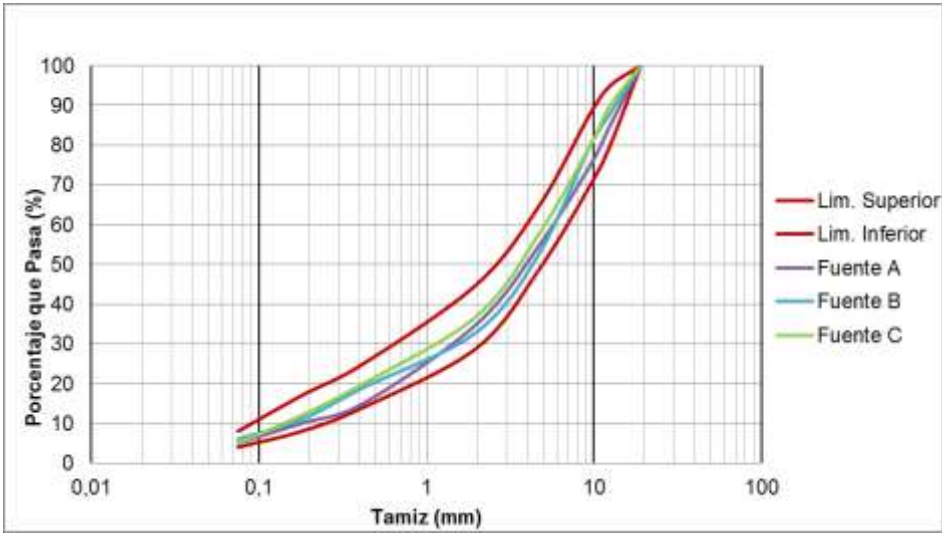


Figura 1 Curva granulométrica de los agregados

Tabla 1 Caracterización del agregado pétreo

DESCRIPCIÓN	NORMA	LIMITE	A	B	C
Peso específico de agregados finos	ASTM C 128-07a	NA	2,58	2,53	2,57
Absorción de agregados finos	ASTM C 128-07a		2,44%	2,86%	2,25%
Peso específico de agregados gruesos	ASTM C 127-07		2,72	2,62	2,57
Absorción de agregados gruesos	ASTM C 128-07		0,77%	1,65%	1,42%
Resistencia al desgaste de los agregados por medio de la máquina de Los Ángeles	ASTM C 131-06	25% máx.	24%	23%	21%
Partículas fracturadas	ASTM D 5821-01	75% mín.	92%	95%	85%
Equivalente de arena	ASTM D 2419-09	50% mín.	83%	86%	84%
Índices de alargamiento y aplanamiento	ASTM D 4791-10	10% máx.	9,5%	9,2%	9,7%

El ligante asfáltico empleado es 60/70 proveniente de la Refinería de la Empresa Colombiana de Petróleos – ECOPETROL ubicada en la ciudad de Barrancabermeja, dicho ligante es el más utilizado en la región de Santander para la elaboración de mezclas asfálticas. La caracterización del asfalto se llevó a cabo mediante los ensayos de penetración (ASTM D 5-06), ductilidad (ASTM D 113-07), punto de inflamación y combustión (ASTM D 92-11), densidad (ASTM D 70-09) y, punto de ablandamiento (ASTM D 36-09), viscosidad empleando un viscosímetro rotacional (AASHTO T 316-06), requeridos por el ARTÍCULO 410, (INVIAS, 2013). Los resultados de dichos ensayos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 Caracterización del asfalto

DESCRIPCIÓN	NORMA	UNIDADES	Limite	RESULTADO
Ductilidad (25° C, 5 cm/min)	ASTM D 113-07	cm	100 mín.	150
Penetración (25° C, 100 gr, 5 s)	ASTM D 5-06	0.1 mm	60-70	68
Densidad asfaltos, sólidos y semisólidos.	ASTM D 70-09	gr/cm ³	N. A.	1.008
Puntos de inflamación y combustión.	ASTM D 92-11	Punto de inflamación	N. A.	238 °C (460.4 °F)
		Punto de combustión	N. A.	312 °C (593.6 °F)
Punto de ablandamiento	ASTM D 36-09	°C	45	53
Viscosidad absoluta (60° C)	AASHTO T 316-06	Poisses	1500 mín.	2936,75

Luego de realizar los ensayos al agregado pétreo y al ligante asfáltico, se elaboraron las mezclas asfálticas teniendo en cuenta cada tipo de fuente. Estas mezclas, tienen un contenido vacíos que varía entre el 4% y 7%. Con el fin de garantizar el porcentaje de vacíos a cada diseño de mezcla, se realizaron los ensayos de porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas (ASTM D 3203-11) y gravedad específica máxima teórica (ASTM D 2041-11).

B. Ensayo de Módulo Dinámico

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 cíclicas. En este trabajo se utilizó la norma AASHTO TP62, que cubre los procedimientos para preparar y ensayar mezclas asfálticas para la determinación de valores del módulo dinámico bajo una carga uniaxial cíclica. Para la ejecución del ensayo se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- a) La fabricación de mezcla densa en caliente MDC-19 fue elaborada con la granulometría especificada en la norma INVIAS, utilizando tres (3) fuentes de agregado pétreo (A, B, C), y cada mezcla fue fabricada con tres (3) porcentajes de asfalto (4.5%, 5.0% y 5.5%), para un total de nueve (9) diseños de mezclas (ver Tabla 3).

Tabla 3 Diseños de Mezclas

Diseño de Mezcla	DMA - I	DMB - I	DMC - I	DMA - II	DMB - II	DMC - II	DMA - III	DMB - III	DMC - III
Fuente de Agregado	A	B	C	A	B	C	A	B	C
% de Asfalto	4.5	5.0	5.5	4.5	5.0	5.5	4.5	5.0	5.5

- b) Para cada tipo de mezcla se fabricaron tres probetas cilíndricas de 100mm de diámetro por 150mm de altura; para un total de nueve por cada contenido de asfalto.
- c) Las probetas se compactaron con un contenido de vacíos de aire del entre el 4 y 7%, mediante del compactador "Roller Compactor".
- d) La evaluación de los módulos dinámicos se realizó con la maquina DTS-30 "30 Kn Dynamic Testing System". Cada una de las probetas fue evaluada a las

temperaturas de -10.0, 4.4, 21.1, 37.8, y 54.41°C y cada temperatura a seis (6) frecuencias (25, 10, 5, 1, 0.5 y 0.1 Hz).

- e) Finalmente se realizó la elaboración de las curvas maestras con temperatura de referencia de 21.1°C.

3. RESULTADOS

En las figuras siguientes se muestra el proceso de creación de las curvas maestras para la mezcla DMA - I, en la Figura 2 se presentan los valores de módulo (MPa) en función de la frecuencia, para varias temperaturas; en la Figura 3 se muestra la relación entre el factor de cambio y la temperatura, para finalmente obtener la curva maestra como se observa en la Figura 4, la cual se aproxima al desplazamiento de las curvas originales considerando la curva base la más cercana a la temperatura ambiente (21.1 °C).

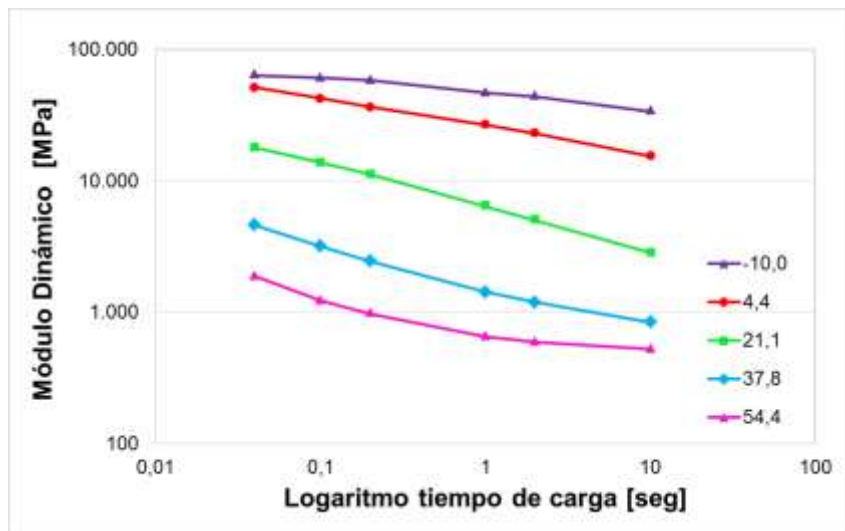


Figura 2 Variación del Módulo Dinámico a diferentes temperaturas

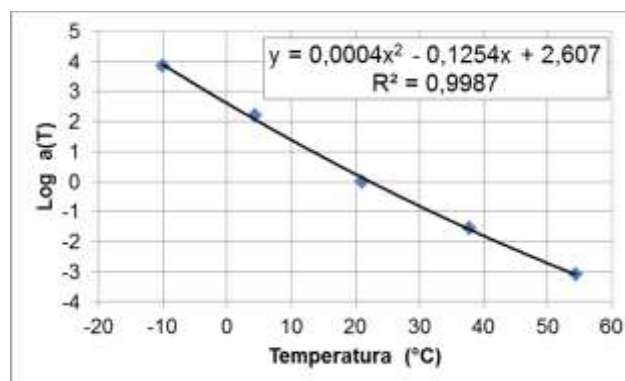


Figura 3 Factor de cambio versus Temperatura

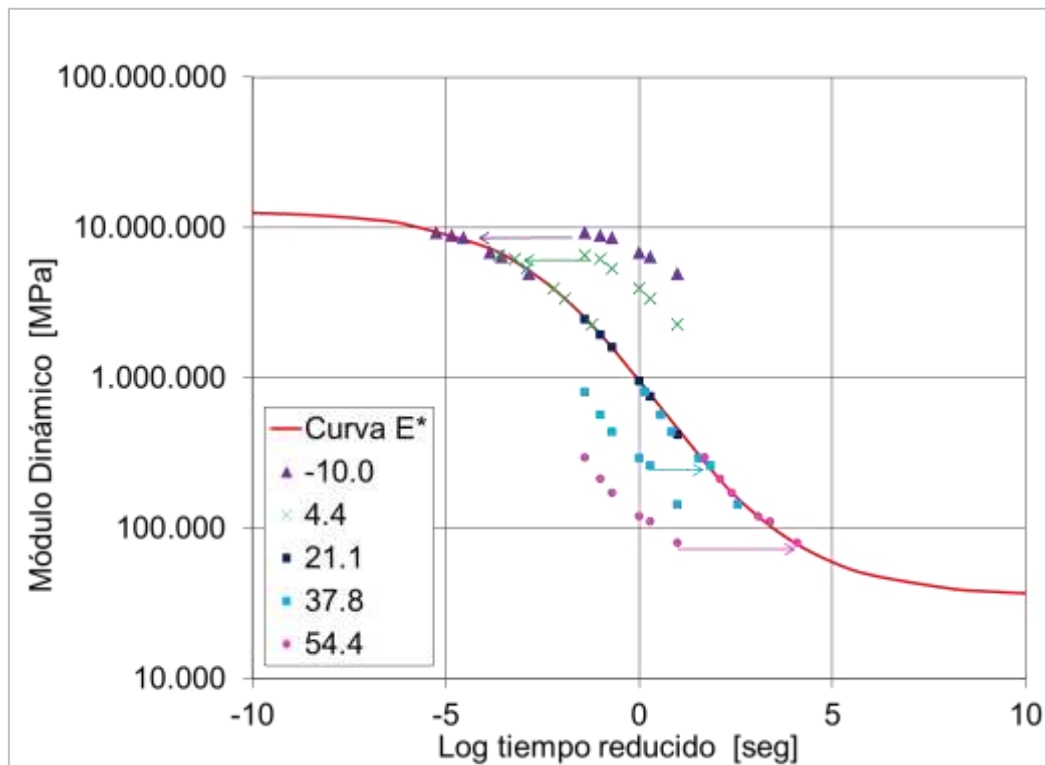


Figura 4 Ejemplo de construcción de curvas maestras DMA - I

Las curvas maestras se elaboraron tomando como referencia la temperatura 21.1°C y, desplazando los valores de los módulos obtenidos a las demás temperaturas empleando la ecuación de factores de ajuste desarrollada por Landel (BARAJAS & PINEDA, 2010; GOMEZ, 2012):

$$\log(aT) = \frac{C1(T-Tr)}{C2(T-Tr)} \quad 1$$

Donde:

- aT: factor de ajuste horizontal.
- C1 y C2: constantes del modelo.
- T: Temperatura del ensayo, °F
- Tr: Temperatura de referencia, °F

Por su parte, la curva maestra del módulo como una función del tiempo de carga se modela matemáticamente mediante la ecuación general sigmoideal:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1+e^{\beta+\gamma \log(tr)}} \quad 2$$

Donde:

- |E*|: Modulo Dinámico.
- tr: tiempo reducido de carga.
- δ: Valor del Módulo Dinámico.
- β + α: Valor del Módulo máximo.
- β + γ: parámetros que describen la forma de la curva sigmoideal.

De esta forma, utilizando la ecuación 1, para una determinada temperatura y tiempo de carga, es posible calcular un tiempo de carga de referencia, que puede emplearse en la ecuación 2 y determinar así la respuesta (módulo de la mezcla) para ese tiempo de carga y temperatura de referencia.

Los valores de $a(T)$, $C1$ y $C2$ de los nueve (9) diseños de mezcla, se resumen en la Tabla 4. Los valores de $a(21.1^{\circ}\text{C})$ equivalen a la unidad (1), por ser la temperatura de referencia.

Tabla 4 Factores de desplazamiento calculados

Diseño de Mezcla	$a(-10.0^{\circ}\text{C})$	$a(4.4^{\circ}\text{C})$	$a(-21.1^{\circ}\text{C})$	$a(-37.8^{\circ}\text{C})$	$a(54.4^{\circ}\text{C})$	C1	C2
DMA - I	7.000	160	1	0,0280	0,00080	4,41	66,80
DMB - I	2.000	2	1	0,0320	0,00400	3,36	62,73
DMC - I	200.000	400	1	0,0240	0,00800	7,37	74,33
DMA - II	4.000	98	1	0,0480	0,01400	3,48	61,10
DMB - II	10.000	130	1	0,0600	0,00320	4,08	62,85
DMC - II	500.000	700	1	0,0120	0,00240	7,51	72,08
DMA - III	1.200	60	1	0,0120	0,00083	4,11	72,62
DMB - III	12.000	70	1	0,0120	0,00240	5,30	71,49
DMC - III	7.000	40	1	0,0060	0,00040	7,46	91,43

Para cada diseño de mezcla se elaboró una curva maestra. A continuación se presentan las curvas maestras para las mezclas a un mismo contenidos de asfalto pero con diferente contenido de ceniza (0.0%, 5.0% y 10.0%). En la Figura 5, Figura 6 y Figura 7 se presenta la variación del módulo dinámico para las mezclas con contenido de asfalto del 4.5%, 5.0% y 5.5% respectivamente. En las gráficas se observa que el diseño de mezcla empleando el agregado A, el módulo obtenido es mayor que para las mezclas B y C, de igual manera se observa que las mezclas B y C tienen un comportamiento similar.

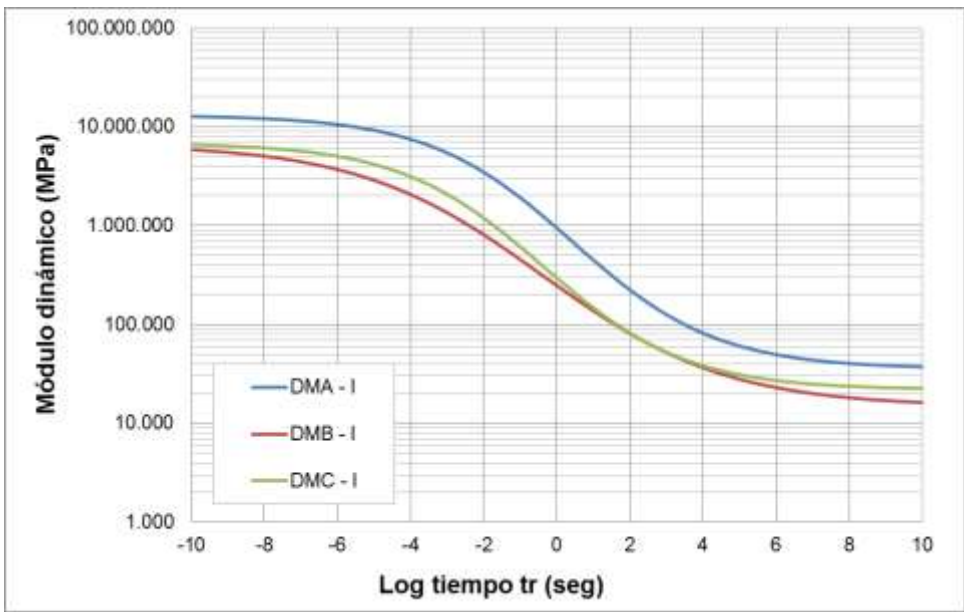


Figura 5 Curvas Maestras con 4.5% de Contenido de Asfalto

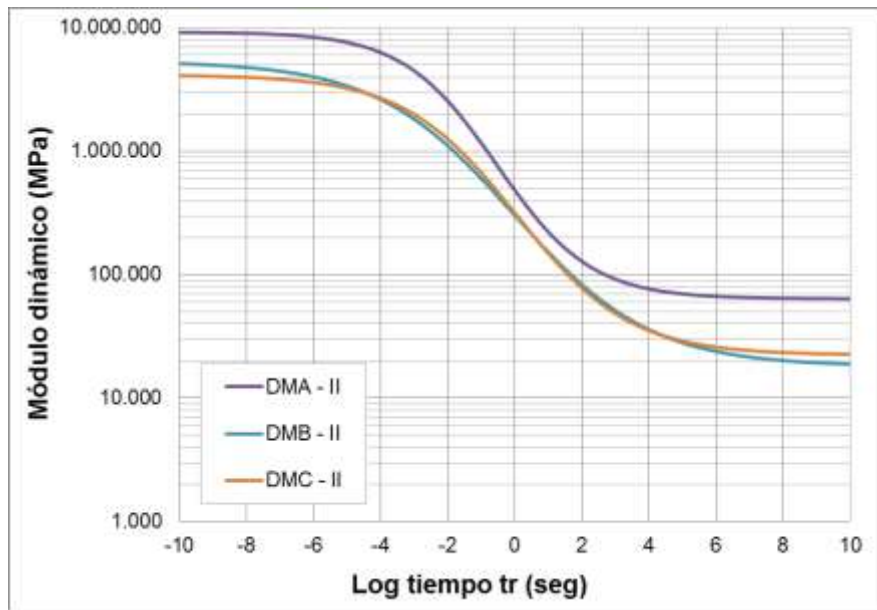


Figura 6 Curvas Maestras con 5.0% de Contenido de Asfalto

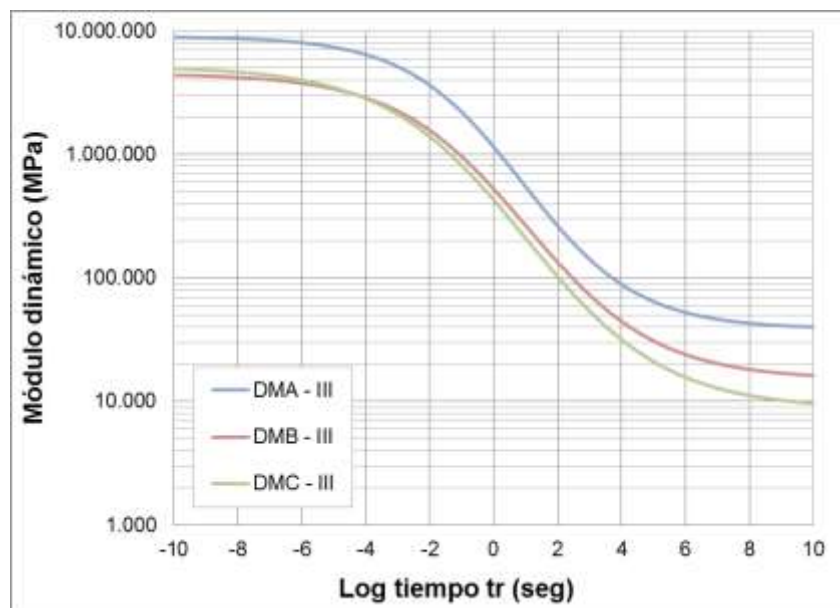


Figura 7 Curvas Maestras con 5.5% de Contenido de Asfalto

En la Tabla 5 se muestran los resultados correspondientes a los coeficientes que conforman las ecuaciones de curva maestra para los nueve diseños de mezcla (ver Figura 8).

Tabla 5 Parámetros de ajuste

Parametro	DMA - I	DMB - I	DMC - I	DMA - II	DMB - II	DMC - II	DMA - III	DMB - III	DMC - III
$\delta =$	4,5531	4,1700	4,3408	4,8052	4,2585	4,3502	4,5886	4,1812	3,9396
$\alpha =$	2,5645	2,6544	2,4950	2,1616	2,4708	2,2690	2,3665	2,4731	2,7733
$\beta =$	-0,2223	0,1542	0,1877	0,3814	0,0226	-0,0265	-0,5034	-0,5031	-0,4502
$\gamma =$	0,5090	0,3989	0,5102	0,7174	0,4914	0,5937	0,5551	0,4893	0,4553

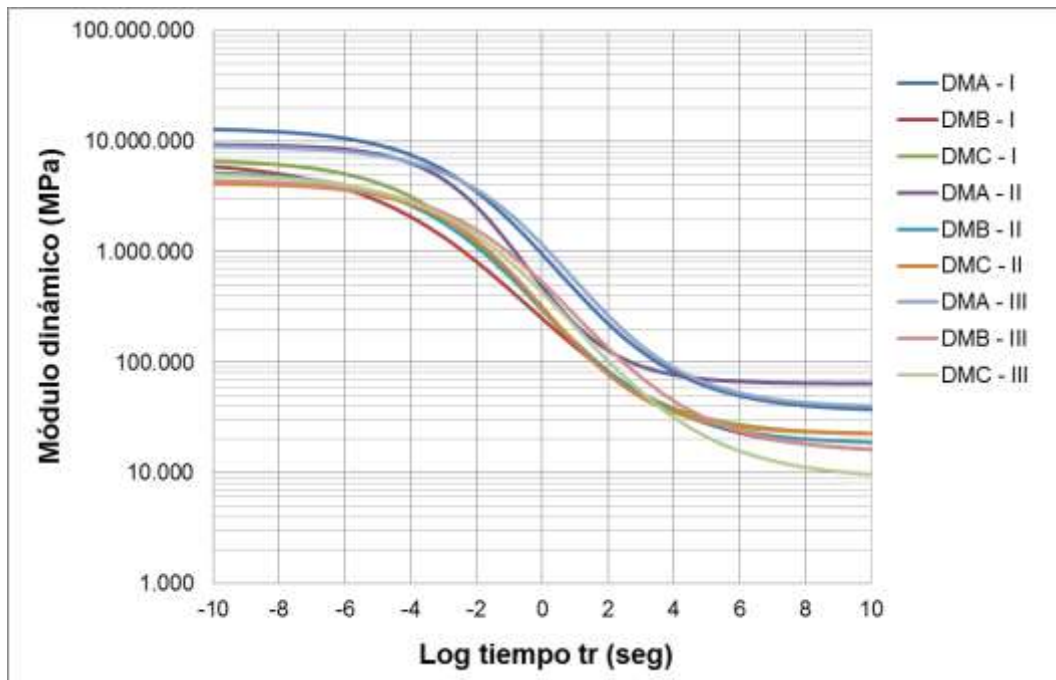


Figura 8 Comparación de curvas maestras de módulos dinámicos

4. CONCLUSIONES

La posibilidad de obtener un módulo de la mezcla asfáltica, a cualquier temperatura y frecuencia de carga es una ventaja que presenta el desarrollo de curvas maestras de rigidez, ya que se sabe de la teoría que esta rigidez varía con la temperatura y la velocidad de carga que se le imponga a la mezcla y principalmente al ligante asfáltico. Se ha conseguido evaluar la influencia de agregados pétreos de diferentes fuentes del departamento de Santander (Colombia), en el módulo dinámico de mezclas asfálticas, obteniendo que los valores de módulos dinámicos disminuyan a medida que aumenta la temperatura y a su vez, cuando aumenta la frecuencia de ensayo, el valor del módulo aumenta, mostrando que son resultados coherentes y satisfactorios (ver Figura 2).

Es importante destacar que el módulo dinámico refleja de una forma más real el efecto de la aplicación de cargas, donde tanto el agregado pétreo como el ligante son los encargados de la resistencia de estas cargas. La presente investigación comprueba la necesidad de calibrar los modelos de predicción de módulos conforme a los materiales y condiciones particulares de cada zona, toda vez que en este ejercicio se evaluaron tres tipos de agregado pétreo, obteniendo como resultado variaciones notables en los valores de módulos dinámicos (ver Figura 8).

Finalmente las curvas maestras desarrolladas proporcionan un ajuste excelente entre los valores medidos y modelados con coeficientes de regresión R^2 cercanos a la unidad y pueden ser utilizadas con fines prácticos como datos de entrada en programas de computación para el diseño estructural de pavimentos basados en principios mecanísticos (ver Figura 5, Figura 6 y Figura 7).

5. AGRADECIMIENTOS

Las autoras expresan sus agradecimientos a la Universidad Pontificia Bolivariana por ceder sus laboratorios de Geotecnia y Pavimentos sede Bucaramanga y a los ingenieros Jairo Andrés Ortiz Díaz, Geovanny Blanco Melo, Jaime Fernando Palacio y José Luis Rodríguez Moya por su desempeño y dedicación en la elaboración de este proyecto.

6. REFERENCIAS

- AASHTO TP-62. (2005). *Determinación del Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ARAYA, F., GONZALEZ, A., DELGADILLO, R., WAHR, C., GARCIA, G., & ZUÑIGA, R. (2012). Caracterización reológica avanzada de betunes tradicionales y modificados utilizados actualmente en Chile. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(3), 198-210.
- BARAJAS, Y., & PINEDA, L. (2010). *Comportamiento del Modulo Dinamico de la Mezcla Asfáltica para diferentes fuentes de agregado*. Bucaramanga: Tesis de grado.
- CHRISTENSEN Jr, D., PELLINEN, T., & BONAQUIST, R. (2003). Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 72, 97-121.
- GOMEZ, C. (2012). *CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y MECÁNICA DE POLIBUTILENTEREFTALATO (PBT) REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO*. Cartagena: tesis de grado, doctorado.
- HIGUERA, C., NARANJO, G., & CETINA, J. (2011). Determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica por correlaciones. *Revista Facultad de Ingeniería*, 20(30), 41-54.
- INVIAS. (2013). *Instituto Nacional de Vías*. Colombia. Bogotá D.C.: Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras.
- MARIN, C., & GUZMAN, M. (2007). Comparación de módulo dinámicos de probetas elaboradas por el método Marshall y por el método Superpave. *Revista Ingenierías*, 6(10), 67-76.
- REYES, O. (2009). Cambios dinámicos y mecánicos de una mezcla asfáltica densa por las propiedades del asfalto y la energía de compactación. *Revista Ingeniería y Desarrollo*(26), 139-155.
- REYES, O., TRONCOSO, J., & CAMACHO, J. (2006). Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes. *Revista Ingeniería*, 10(1), 19-30.
- RODRIGUEZ, M. (2014). *Evaluación de mezclas asfálticas con adición de ceniza como porcentaje del llenante y caucho como porcentaje de asfalto* (Vol. tesis de grado). Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- RONDÓN, H., & REYES, F. (2012). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con asfaltita. *Revista de Ingeniería*, 1(36), 12-19.
- VIDAL, J. (2006). Comportamiento dinámico de mezclas asfálticas. *Revista Universidad EAFIT*, 42(143), 72-88.
- WAHR, C., & DELGADILLO, R. (2008). Comparación de diseños pavimentos flexibles: AASHTO 93 - Manual de Carreteras (PAVIAL) - Guía de Diseño Empírico Mecanicista NCHRP 1-37a (ME-PDG versión 1.0). *9º Congreso Internacional PROVIAL*. Puerto Varas, Chile.
- WAHR, C., DELGADILLO, R., & RODRIGUEZ, R. (2009). Estudiando la Aplicabilidad en Chile de la Guía de Diseño Empírico Mecanicista NCHRP 1-37 A. *XV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto CILA*. Lisboa, Portugal: CILA.