

Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con asfaltita

Mechanical Properties Evaluation of a hot Asphalt Mixture Modified with Asphaltite

Hugo Alexander Rondón Quintana⁽¹⁾, Fredy Alberto Reyes Lizcano⁽²⁾

⁽¹⁾ Doctor en Ingeniería, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia, harondonq@udistrital.edu.co

⁽²⁾ Doctor en Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia, fredy.reyes@javeriana.edu.co

Recibido 29 de agosto de 2010, aprobado 11 de enero de 2012, modificado 2 de febrero de 2012.

Palabras claves

Asfaltita, asfalto modificado, mezcla densa en caliente, propiedades mecánicas.

Resumen

El trabajo evaluó en laboratorio la resistencia mecánica bajo carga monotonica, el módulo resiliente y la resistencia a la deformación permanente que experimenta una mezcla asfáltica cuando se modifica con una asfaltita. Adicionalmente, fue evaluada durante dos años, la influencia del medio ambiente de la ciudad de Bogotá D.C., sobre las propiedades mecánicas de la mezcla modificada. Se concluye que la resistencia mecánica de la mezcla asfáltica modificada incrementa en comparación con la convencional. La tendencia general de las mezclas con el tiempo de exposición al medio ambiente de Bogotá D.C., es experimentar un aumento en los valores de rigidez debido principalmente a procesos de endurecimiento por envejecimiento del ligante asfáltico. Sin embargo, para el caso de las mezclas modificadas y fabricadas con CA 60-70 en los primeros cinco meses de exposición, la rigidez disminuye.

Key words

Asphaltite, modified Asphalt, hot-mix asphalt (HMA), mechanical properties.

Abstract

The strength under monotonic load, resilient modulus and rutting were evaluated on a hot-mix asphalt (HMA) modified with a natural asphaltite. Additionally, the influence of the environmental conditions of Bogotá D.C., was evaluated during two years on the mechanical properties of a modified asphalt mixture. The results show that the mechanical properties evaluated were better for the HMA mixes modified in compared with those with neat asphalts. The asphaltite produces higher mechanical resistance in HMA. The general tendency of the mixtures is increase the modulus with time due to aging of the asphalt cement. However, modified mixtures with AC 60-70, decrease in stiffness during the first months.

INTRODUCCIÓN

En Colombia la tendencia del parque automotor en los últimos 30 años ha sido incrementar en número y magnitud de cargas [1-2]. Lo anterior genera en las capas asfálticas mayores magnitudes de esfuerzo y deformación. Estos mayores niveles de carga deben ser contrarrestados con materiales asfálticos que presenten mejores comportamientos que los tradicionales diseños y procesos constructivos adecuados como mantenimiento y control de sobrecargas. Con el fin de mejorar las propiedades de los materiales asfálticos y las mezclas

asfálticas, se han adelantado diversas investigaciones en Colombia y el mundo (p.e., [3-5]). El objetivo principal de estas investigaciones ha sido mejorar las propiedades mecánicas, químicas y reológicas de los asfaltos y las mezclas asfálticas convencionales (mezcla que emplea asfaltos sin ningún aditivo) con el fin de modificar la rigidez, la resistencia bajo carga monotonica, el ahuellamiento, la fatiga, el envejecimiento, y disminuir la susceptibilidad térmica.

Por otro lado, los principales factores que afectan la durabilidad de mezclas asfálticas, asumiendo que se encuentran bien construidas y diseñadas, son la edad de envejecimiento y el daño por humedad [6]. Es decir, una mezcla asfáltica debe ser diseñada y construida no solo para que resista las cargas impuestas por el tránsito sino también la acción del medio ambiente. Cuantificar la influencia que tiene el ambiente sobre el comportamiento de este tipo de material no es una tarea fácil. La forma como se realiza, actualmente, es separando cada uno de los componentes que lo conforman (agua, temperatura y rayos ultra-violeta, entre otros) y evaluar la influencia de cada uno de ellos (desde el punto de vista mecánico y químico) de manera separada sobre el ligante y las mezclas [6-11]. Adicionalmente, por lo general, estos estudios utilizan ensayos y equipos (por ejemplo, hornos para ensayo de película delgada del tipo TFOT o rotatorios RT-FOT, microondas, dispositivos de envejecimiento de ligantes a presión PAV), que no pueden reproducir totalmente la influencia que tiene cada uno de los componentes del ambiente sobre las propiedades mecánicas y reológicas de las mezclas y los ligantes asfálticos [12-14]. Incluso la mayor parte de las investigaciones combinan estos ensayos y equipos para intentar evaluar la forma como cambian las propiedades de estos materiales cuando experimentan condiciones reales del ambiente [6, 12, 14]. En conclusión general, se reporta que estas metodologías de ensayo tienen como limitación principal que aún son incapaces de reproducir las condiciones reales a las cuales están expuestas las mezclas asfálticas *in situ*. Una forma de medir *in situ* la influencia que tiene el ambiente en el comportamiento de mezclas asfálticas es realizando tramos o pistas de prueba a escala. La limitación de este tipo de pruebas radica en que son costosas y en ellas no se puede medir de manera directa ni por separado, la influencia que tienen las cargas vehiculares y el ambiente.

El artículo presenta los resultados experimentales al ensayar una mezcla asfáltica densa en caliente tipo MDC-2 [15] modificada con una asfaltita proveniente del César, Colombia. Para la elaboración de las mezclas y la evaluación de las mismas, fueron modificados los dos tipos de cementos asfálticos (CA) fabricados en Colombia: CA 80-100 y CA 60-70 (se refieren a CA cuya medida en el ensayo de penetración ASTM D-5 está en un rango entre 80 a 100 y 60 a 70 décimas de mm respectivamente). Estos dos ligantes presentan grados de funcionamiento PG 58-22 y PG 64-22 respectivamente. Adicionalmente, son los CA utilizados en Colombia cuando la temperatura media anual promedio de la zona donde se construirá la capa asfáltica es inferior (CA 80-100) y superior (CA 60-70) a 24°C [15]. La asfaltita se adicionó de manera directa al CA a alta temperatura (modificación por vía húmeda). Para la evaluación de la resistencia mecánica bajo carga monotónica de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas se empleó el ensayo Marshall. Con el fin de evaluar el comportamiento de las mezclas, bajo carga cíclica, se realizaron ensayos de módulo resiliente (INV. E-749) y

deformación permanente medida en la dirección vertical (EN 12697-22). Adicionalmente, el artículo presenta la influencia que tienen las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá sobre las propiedades mencionadas. Se optó por analizar mezclas tipo MDC-2 debido a que son las más utilizadas en Colombia para conformar capas de rodadura las cuales son las que se encuentran sometidas de manera directa a las condiciones del ambiente. De la misma forma, las condiciones climáticas de Bogotá fueron escogidas, principalmente, debido a que la ciudad se encuentra en una zona donde se presentan las siguientes condiciones ambientales en un día determinado: clima predominantemente frío con temperaturas mínimas y máximas promedio de 6°C y 20°C respectivamente, humedad entre el 60 al 100%, presencia de lluvias periódicas en cualquier momento del día, precipitación diaria promedio entre 2.06 y 9.03 cm y altura sobre el nivel del mar de 2640 m. Este estudio caracteriza el envejecimiento de las mezclas modificadas de manera general sin independizar el efecto de cada uno de los componentes del medio ambiente de la ciudad de Bogotá (agua, viento, rayos UV, temperatura, etc.). Con el fin de entender con mayor precisión la influencia del ambiente sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas, en este artículo se presentarán los resultados de los primeros 24 meses del proyecto.

METODOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

En la tabla 1 se presentan los valores obtenidos de los ensayos de caracterización al agregado pétreo. Se observa en esta tabla que los valores de cada uno de los ensayos cumplen con el requisito mínimo de calidad exigido por las especificaciones del INVIAS (Instituto Nacional de Vías) [15] para fabricar mezclas tipo MDC-2. Para cumplir con las especificaciones del INVIAS [15], se modificó la granulometría original de los agregados, tomando como referencia los valores promedios en porcentajes de la franja granulométrica que exige la especificación para la elaboración de las mezclas tipo MDC-2 (ver tabla 1). A los cementos asfálticos se les realizaron los ensayos típicos que exige la especificación del INVIAS [15] para caracterizarlos y mostrar los resultados que se presentan en las tablas 2. La asfaltita utilizada proviene de la Mina San Alberto (César, Colombia). Una descripción detallada de la asfaltita puede ser consultada en INVIAS [17]. Este material presenta un peso específico de 1.10 g/cm³ y partículas de coloración negra brillante que pasan el tamiz No. 40 en un ensayo de granulometría por tamizado. Sobre el CA convencional y modificado se realizaron ensayos de penetración (INV. E-706) a diferentes temperaturas y punto de ablandamiento siguiendo los procedimientos recomendados por INVIAS [16].

Tabla 1. Caracterización del agregado pétreo y granulometría MDC-2.

Ensayo	Método	Resultados	Tamiz		% Que pasa
			Normal	Alterno	MDC-2
Peso específico	ASTM D 854-00	2.56%			
Equivalente de arena	ASTM D 2419-95	86%	19.0 mm	3/4"	100
Caras fracturadas	ASTM D 5821-01	95%	12.5 mm	1/2"	80-95
Índice de alargamiento	NLT 354-91	9.2%	9.5 mm	3/8"	70-88
Índice de aplanamiento	NLT 354-91	9.5%	4.75 mm	No. 4	49-65
Ataque en sulfato de sodio	ASTM C 88-99 ^a	12.4%	2.00 mm	No. 10	29-45
Microdeval	ASTM D 6928-03	20.3%	425 μm	No. 40	14-25
Resistencia al desgaste	ASTM C 131-01	23.5%	180 μm	No. 80	8-17
Máquina de los Ángeles			75 μm	No. 200	4-8

Tabla 2. Características generales de los CA 80-100 y CA 60-70.

Ensayo	Método	Unidad	CA 80-100	CA 60-70
Ensayos sobre el asfalto original				
Penetración (25°C, 100g, 5s)	ASTM D-5	0.1 mm	85	67
Índice de penetración	NLT 181/88	-	-0.5	-0.7
Viscosidad absoluta (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1400	1750
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	>105	>105
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%	>99	>99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	<0.2	<0.2
Punto de inflamación CoC	ASTM D-92	°C	295	275
Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT				
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	0.2	0.4
Penetración (25°C, 100g, 5s)	ASTM D-5	%	65	70

DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Luego de realizar los ensayos al agregado pétreo y a los ligantes asfálticos se fabricaron cinco briquetas (compactadas a 75 golpes por cara) para cada porcentaje de asfalto de 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 y 6.5%, con el fin de realizar el diseño Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto de las mezclas convencionales. Los porcentajes óptimos de cemento asfáltico son de 5.3% y 5.6% para el caso de mezclas fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70 respectivamente. En estos porcentajes se están cumpliendo los requisitos mínimos exigidos por la especificación del INVIAS [15] para MDC-2 y tránsitos tipo NT1 y/o NT2 (bajos y medios volúmenes de tránsito).

FASE EXPERIMENTAL

Una vez se obtuvo el porcentaje óptimo de CA, se fabricaron nuevas briquetas agregando por vía húmeda la asfaltita en porcentajes de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5% (con respecto al peso total de la briqueta de 1200 g), manteniendo el porcentaje de CA. Por vía húmeda se entiende que el aditivo (la asfaltita en

este caso) se adiciona a alta temperatura al CA y no al agregado pétreo. Por cada porcentaje de aditivo se fabricaron cinco briquetas para ensayarlas en el aparato Marshall con el fin de evaluar la respuesta que experimentan las mezclas bajo carga monotónica en tracción indirecta. Además se realizó el mismo estudio aumentando y rebajando el porcentaje óptimo de CA en 0.3%. La temperatura de mezclado del CA con la asfaltita fue de 155 °C. Esta temperatura fue escogida debido a que por encima de la misma el CA experimenta envejecimiento por pérdida de componentes químicos por oxidación, y por debajo, el mezclado se dificulta especialmente cuando el contenido de asfaltita es alto. El tiempo de mezclado del CA con la asfaltita fue de 45 minutos para porcentajes de adición de asfaltita de 0.5 y 1.5% y de una hora para porcentajes de 2.5 y 3.5%. Esta temperatura y tiempos de mezcla son similares a aquellos reportados por otros investigadores cuando han modificado CA con aditivos plastoméricos (p.e., [18]). Con el fin de determinar las temperaturas de mezcla y compactación para la fabricación de las mezclas, fueron realizados ensayos de viscosidad sobre los ligantes modificados (tabla 3).

Tabla 3. Temperaturas de mezcla y compactación.

Asfaltita [%]	CA 80-100		CA 60-70	
	Temperatura de mezcla [°C]	Temperatura de compactación [°C]	Temperatura de mezcla [°C]	Temperatura de compactación [°C]
0.0	135	130	142	134
0.5	145	141	153	149
1.5	153	148	160	156
2.5	155	150	167	163
3.5	161	157	173	168

Con los resultados obtenidos del ensayo Marshall se determinó un porcentaje de cemento asfáltico con base en el máximo valor de la relación estabilidad – flujo E/F (llamada por algunos investigadores como rigidez Marshall; esta relación físicamente puede ser entendida como una resistencia mecánica evaluada en el estado de falla de las mezclas, bajo carga monotónica), y en los resultados de los ensayos de viscosidad. Con el valor de CA, y adicionando la asfaltita en los porcentajes de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5%, se fabricaron nuevas briquetas para realizar los ensayos de módulo resiliente (INV. E 749) y resistencia a la deformación permanente de mezclas asfálticas (EN 12697-22, [19]). El módulo resiliente fue obtenido bajo tres temperaturas (10, 20 y 30°C) y frecuencias de carga diferentes (2.5, 5.0 y 10.0 Hz) utilizando un equipo NAT (Nottingham Asphalt Tester). Las muestras para determinar el módulo fueron ensayadas bajo una carga cíclica en tracción indirecta y, además, presentaban las mismas dimensiones de las briquetas Marshall. El ensayo de resistencia a la deformación permanente, bajo carga repetida, fue realizado con un esfuerzo de 100 kPa y a 3600 ciclos de carga siguiendo el procedimiento normalizado por EN 12697-22 [19].

Para evaluar la influencia del medio ambiente se elaboraron 180 briquetas del tipo Marshall de mezcla asfáltica MDC-2 por tipo de CA, para exponerlas al ambiente de la ciudad de Bogotá, utilizando el contenido óptimo de CA para el caso de las mezclas convencionales y de CA y asfaltita para las mezclas modificadas. Este contenido fue obtenido con base en los ensayos de caracterización monotónica y dinámica. Estas muestras fueron colocadas en el techo de un edificio de la ciudad de Bogotá. Durante los primeros 24 meses del proyecto, a estas briquetas se les realizaron ensayos de módulo resiliente y resistencia a la deformación permanente para evaluar la evolución de estos parámetros con el tiempo de exposición al medio ambiente. Con los resultados de estos ensayos se desarrolló una ecuación empírica para predecir la evolución de la rigidez de la mezcla analizada con el tiempo de exposición al medio ambiente. En este estudio no fue posible evaluar la resistencia a fatiga y al agrietamiento por

temperatura de las mezclas consideradas. Este aspecto será analizado en un estudio posterior.

RESULTADOS

PROPIEDADES BAJO CARGA MONOTÓNICA

Los resultados de las propiedades bajo carga monotónica de las mezclas convencionales y modificadas pueden ser consultados en [20]. Se reporta de manera general un incremento en la resistencia mecánica, evaluada a través de la relación estabilidad/flujo del ensayo Marshall, de 3.84 veces cuando se adiciona 0.5% de asfaltita al 5.3% de CA 80-100. Para el caso de las mezclas fabricadas con CA 60-70 se reporta un incremento de 1.89 veces cuando se adiciona 2.5% de asfaltita al 5.6% de CA.

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA

En las figuras 1-2 se presenta la evolución del módulo resiliente y la deformación permanente en la dirección vertical de las mezclas asfálticas modificadas. Se observa un incremento típico del módulo cuando se aumenta la frecuencia de carga y disminuye la temperatura del ensayo. La rigidez de las mezclas incrementa notablemente, y por lo tanto la resistencia a la deformación permanente, cuando se adiciona asfaltita al CA. Para el caso de la temperatura de ensayo de 10°C el módulo de las mezclas modificadas incrementa aproximadamente entre un 51-113% y 35-64% con respecto a la mezcla convencional cuando se adiciona asfaltita entre 0.5-3.5% a los CA 80-100 y CA 60-70 respectivamente. Para temperaturas de 20°C y 30°C estos incrementos son de 63-678% y 51-160% respectivamente. La deformación permanente disminuyó entre 19.1-40.8% (CA 80-100) y 5.3-20.2% (CA 60-70) cuando se adicionó asfaltita entre 0.5-3.5% respectivamente. Este aumento en rigidez y resistencia a la deformación se debe a que con la incorporación de la asfaltita al CA se obtiene un material más viscoso tal como se reportó en [20].

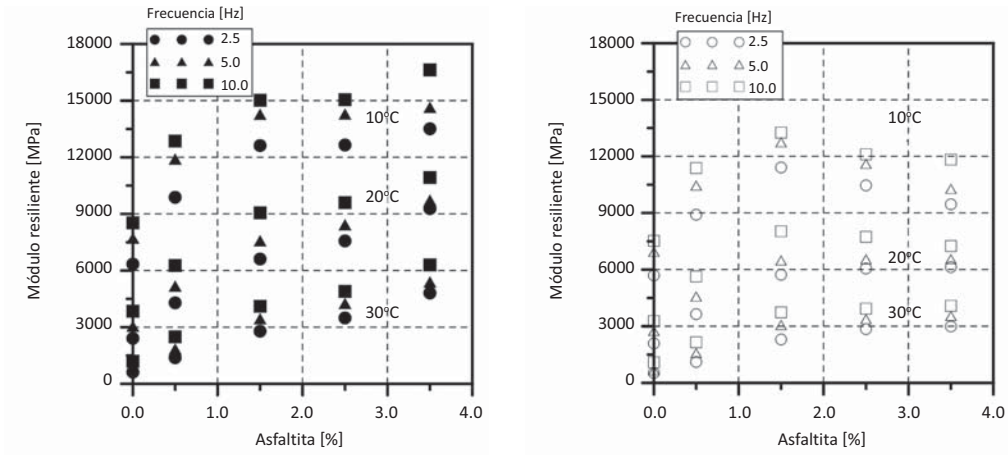


Figura 1. Evolución del módulo resiliente vs. porcentaje de asfaltita para mezclas modificadas MDC-2 empleando a) CA 80-100 y b) CA 60-70.

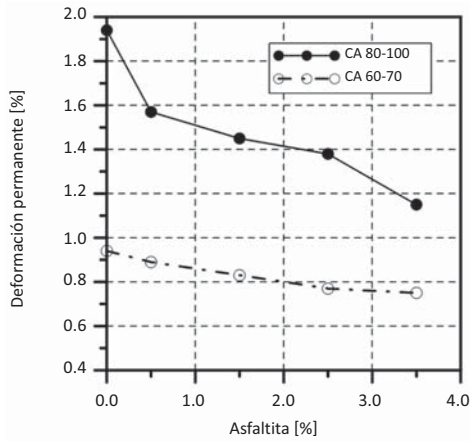


Figura 2. Evolución de la deformación permanente vertical vs. porcentaje de asfaltita para mezclas modificadas MDC-2 empleando CA 80-100 y CA 60-70.

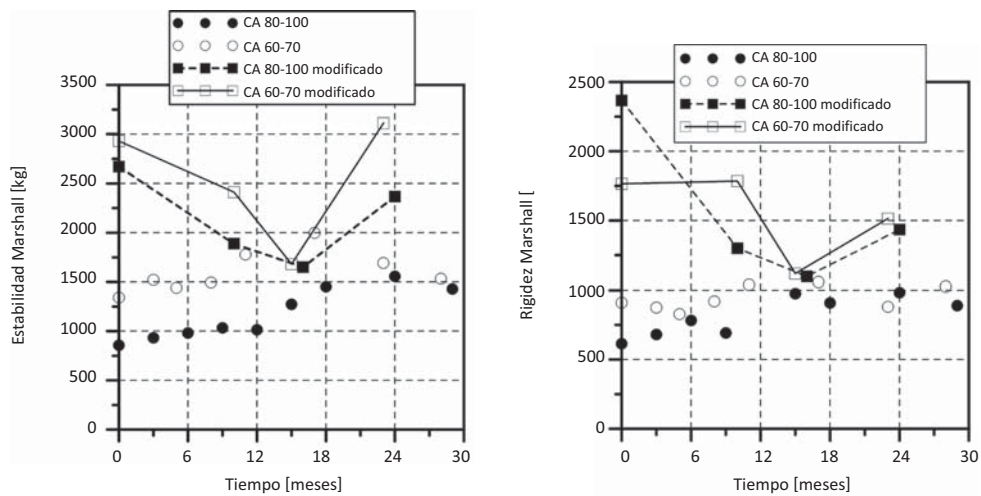


Figura 3. Evolución de a) estabilidad Marshall y b) E/F con el tiempo de envejecimiento, para mezclas convencionales y modificadas.

INFLUENCIA DEL MEDIO AMBIENTE DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.

Las mezclas modificadas y sometidas al medio ambiente de la ciudad de Bogotá, fueron fabricadas utilizando la siguiente composición: 5.3% de CA 80-100 y 0.5% de asfaltita, y 5.6% de CA 60-70 con 1.5% de asfaltita. En la figura 3 se presenta la evolución de los parámetros E y E/F de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas con el tiempo (t en meses) de exposición al medio ambiente de Bogotá. Se observa para las mezclas fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70 un incremento en la resistencia bajo carga monotónica con el tiempo de exposición. Para el caso de las mezclas fabricadas con CA 80-100 este incremento en $t=29$ meses es de 75% y 60% para E y E/F respectivamente. Para aquellas fabricadas con CA 60-70 en $t=17$ meses el incremento de E es de 54% y luego disminuye en $t=28$ meses a 15%. E/F experimenta en $t=28$ meses un leve incremento de 7% y en algunos periodos de tiempo se observan intervalos de crecimiento y disminución de este parámetro mecánico. Lo anterior puede ser explicado por dos fenómenos que están ocurriendo en las mezclas simultáneamente. Primero, el envejecimiento por oxidación que experimenta el cemento asfáltico, cuando las mezclas presentan diferentes gradientes de temperatura y exposición a radiación UV (ultra-violeta), tal como ha sido ampliamente reportado por otros investigadores (p.e., [6-10, 21]). Y segundo, el agua en las mezclas produce pérdida de adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto, lo cual genera un aumento del flujo y disminución de la relación E/F . Para el caso de las mezclas modificadas, el comportamiento que experimenta es totalmente contrario al de las convencionales. En los primeros 15 meses de exposición al medio ambiente, las mezclas modificadas experimentan una disminución (entre 59 a 126%) en la resistencia bajo carga monotónica para luego incrementar hasta alcanzar valores similares e incluso supe-

riores al de las mezclas sin envejecer. El decaimiento en la resistencia, tal vez, es debido a la generación de micro-fisuras que se producen a bajas temperaturas cuando las mezclas son rígidas (comportamiento frágil), luego estas micro-fisuras se estabilizan y el aumento en rigidez se debe a un fenómeno de envejecimiento y oxidación del asfalto. El fenómeno de micro-fisuración a bajas temperaturas ha sido ampliamente reportado por diversos investigadores en [22-24].

En la figura 4 se presenta la relación (E_r/E_{r0}) entre el módulo resiliente que se obtiene luego de someter las briquetas al ambiente durante distintos periodos de tiempo (E_r) y el módulo resiliente inicial de las mezclas en un tiempo $t=0$ meses (E_{r0}). Para el caso de las mezclas fabricadas con CA 80-100, el módulo alcanzado en $t=29$ meses aumenta entre un 64 y 185% (dependiendo de la temperatura y frecuencia del ensayo) con respecto al inicial, incrementando la resistencia a la deformación permanente (figura 5). Las mezclas con CA 60-70 experimentan una disminución máxima en su módulo de 35% en los primeros cinco meses de exposición, disminuyendo su resistencia a las deformaciones permanentes (ver figuras 4-5). Luego el E_r aumenta y experimenta en $t=28$ meses, valores que superan ligeramente el inicial, aumentando la resistencia a la deformación. Estos resultados pueden ser expresados matemáticamente a través de las ecuaciones (1a-b) para las mezclas fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70 respectivamente. Esta ecuación puede ser utilizada solamente para la mezcla analizada en el rango de tiempo evaluado (28-29 meses) ya que se debe prever un cambio del comportamiento de la misma a medida que aumente t . Las variables estado k_1 - k_3 son obtenidas a través de regresión y no presentan un significado físico definido (ver tabla 4). En la figura 4a se presenta la simulación de los ensayos ejecutados empleando las ecuaciones (1a-b) y el coeficiente de correlación es $r^2=0.79$. Para el caso de las mezclas modificadas con asfaltita y fabricadas con CA 80-100 (ver figura

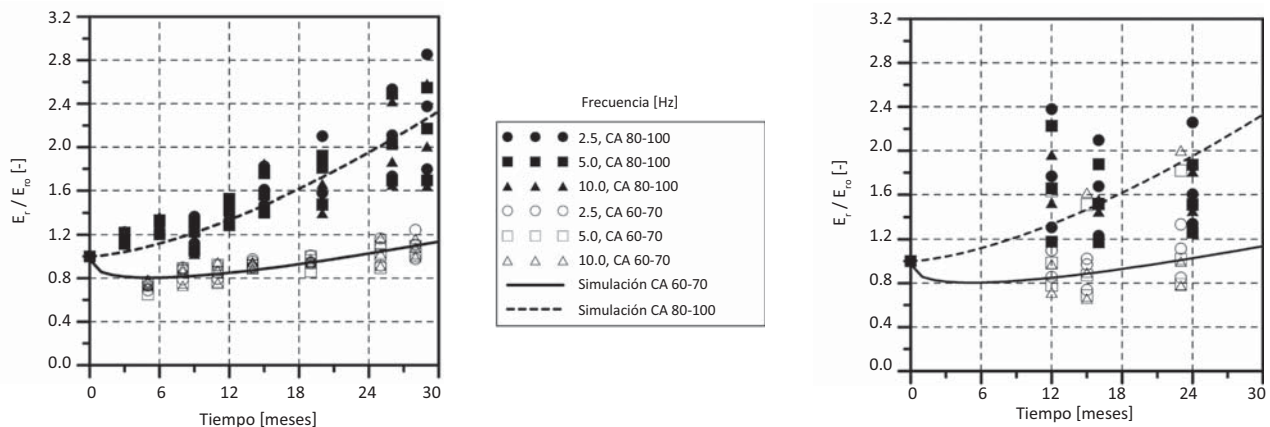


Figura 4. Evolución de la relación entre el módulo resiliente (E_r) y el módulo inicial (E_{r0}) con el tiempo de envejecimiento (t) para mezclas a) convencionales y b) modificadas.

4b), el módulo alcanzado en $t=24$ meses aumenta entre un 20 y 140% (dependiendo de la temperatura y frecuencia del ensayo) con respecto al inicial y por lo tanto su resistencia a las deformaciones permanente incrementa (figura 5). Contrario a lo observado en las mezclas sin modificar, las mezclas con asfaltita experimentan una fase de estabilización en los valores de rigidez entre $t=12$ meses hasta $t=24$ meses. Por lo anterior, estas mezclas presentan una correlación muy pobre cuando se utiliza la ecuación (1a) para simularlas ($r^2=0.53$). Las mezclas con CA 60-70 modificadas experimentan una disminución máxima en su módulo de 35% en los primeros 15 meses de exposición para luego aumentar y experimentar en $t=23$ meses, módulos que superan ligeramente el valor inicial, a excepción de aquellos obtenidos para temperaturas de 30°C en donde se observa un incremento de hasta 100%. Estos resultados de evolución del módulo son coherentes con los reportados en la acumulación de las deformaciones permanentes (figura 5).

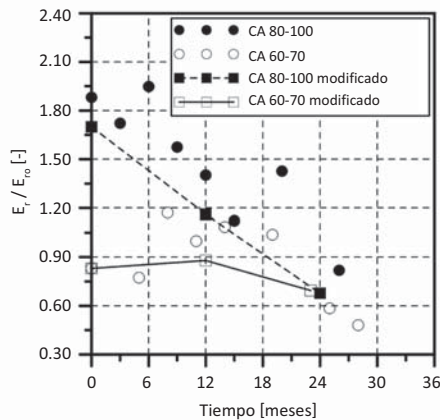


Figura 5. Evolución de la deformación vertical permanente con el tiempo de envejecimiento (t) para mezclas fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70.

Tabla 4. Variables para simular la rigidez de la mezcla MDC-2 en función del tiempo de exposición al medio ambiente.

CA	k1	k2	k3
80-100	0.0081	-	-
60-70	0.028	-0.032	0.15

$$\frac{E_r}{E_{r0}} = 1 + k_1 t^{3/2} \quad \text{para CA 80-100} \quad (1a)$$

$$\frac{E_r}{E_{r0}} = 1 - (k_1 + k_2 t + k_3 \sqrt{t}) \quad \text{para CA 60-70} \quad (1b)$$

CONCLUSIONES

En general, las mezclas asfálticas modificadas con asfaltita tienden a poseer un comportamiento rígido. A bajas temperaturas de servicio estas mezclas pueden tener un comportamiento frágil, lo que lleva a pensar que tendrían un mejor desempeño en climas cálidos. Los valores de estabilidad y rigidez Marshall de las mezclas modificadas son mayores para cualquier porcentaje de CA y asfaltita, en comparación con la mezcla convencional. Los módulos de las mezclas modificadas son superiores a aquellos alcanzados por las convencionales, y los mayores incrementos se obtienen cuando la temperatura del ensayo aumenta. Lo anterior permite prever que la asfaltita como modificador de asfaltos puede ser un material que mejore las características de rigidez y resistencia a las deformaciones permanentes de mezclas que sean utilizadas en climas cálidos.

En este estudio también se ejecutó una fase experimental destinada a medir la influencia de las condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá sobre las propiedades mecánicas de una mezcla de concreto asfáltico tipo MDC-2 fabricada con CA 80-100 y CA 60-70, y modificadas con asfaltita. Para el caso de las mezclas fabricadas con CA 80-100 y modificadas, se concluye que la rigidez bajo carga monotónica y cíclica incrementa con la exposición al medio ambiente. Para el caso de las mezclas fabricadas con CA 60-70 y modificadas, en los primeros meses de exposición el módulo y la resistencia bajo carga monotónica disminuyen tal vez por fenómenos de microfisuración térmica, y luego aumenta por efecto del envejecimiento del ligante asfáltico.

Las fases futuras del proyecto deben medir propiedades como envejecimiento a corto y largo plazo de los asfaltos y resistencia a fatiga de las mezclas asfálticas. Adicionalmente, es necesario evaluar los cambios que experimentan las propiedades químicas de los ligantes modificados.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Transporte - MINTRANSPORTE - Dirección de Transporte y Tránsito. *Parque Automotor de Transporte de Carga en Colombia*. Bogotá D.C: Ministerio de Transporte, 2006, pp. 109.
- [2] Ministerio de Transporte - MINTRANSPORTE - Oficina de Planeación. *El Transporte en Cifras*. Bogotá D.C: Ministerio de Transporte, 2004, pp. 48.
- [3] A.T. Papagiannakis, T.J. Loughheed. "A Review of Crumb-Rubber Modified Asphalt Concrete Technology". Research report for project T9902-09 "Rubber-Asphalt Study", Washington D.C: Washington State Transportation Commission and U. S. Department of Transportation, 1995, pp. 106.
- [4] A.R. Copeland, J.S. Jr. Youtcheff, A. Shenoy. "Moisture Sensitivity of Modified Asphalt Binders: Factors

- Influencing Bond Strength”. *Transportation Research Record: Journal of the TRB*, No. 1998, Nov 2007, pp. 18-28.
- [5] H.A. Rondón, F.A. Reyes, A.S. Figueroa, E. Rodríguez, C.M. Real, T.A. Montealegre. “Estado del Conocimiento de Mezclas Asfálticas Modificadas en Colombia”. *Revista Infraestructura Vial*. No. 19, febrero, 2008, pp. 12-21.
- [6] G.D. Airey. “State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials”. *International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 4, No. 3, September 2003, pp. 165-176.
- [7] G.R. Kemp, N.H. Predoehl. “A Comparison of Field and Laboratory Environments of Asphalt Durability”. *Proc. Assn. Asphalt Paving Technol.* Vol. 50, November, 1981, pp. 492-537.
- [8] J.Y. Welborn. “Physical Properties as Related to Asphalt Durability: State of the Art”. *Transportation Research Record: Journal of the TRB*. Issue number 999, 1984, pp. 31-36.
- [9] O.K. Kim, C.A. Bell, J.E. Wilson, G. Boyle. “Development of Laboratory Oxidative Aging Procedures for Asphalt Cements and Asphalt Mixtures”. *Transportation Research Record: Journal of the TRB*. Issue number 1115, January 1987, pp. 101-112.
- [10] S.F. Said. “Aging Effect on Mechanical Characteristics of Bituminous Mixtures” *Transportation Research Record: Journal of the TRB*. Issue number 1901, 2005, pp. 1-9.
- [11] J. Shen, S. Amirkhanian, B. Tang. “Influence of Accelerated Aging Test Temperature on the Properties of Binders.” *Int. J. of Pavement Engineering*. Vol. 7, No. 3, September 2006, pp. 191-198.
- [12] H.B. Jemison, R.R. Davison, C.J. Glover, J.A. Bullin. “Evaluation of Standard Oven Tests for Hot-Mix Plant Aging”. *Transp. Res. Record: J. of TRB*. Issue number 1323, January 1991, pp. 77-84.
- [13] A.F. Verhasselt. “Field Ageing of Bituminous Binders: Simulation and Kinetic Approach”. In: Di Benedetto, H., Francken, L., *Proc. Fifth International RILEM Symposium, Mechanical Tests for Bituminous Materials*. Vol. 1, 1997, pp. 121-128.
- [14] F. Migliori, J.F. Corté. “Comparative Study of RTFOT and PAV Aging Simulation Laboratory Tests”. *Transp. Research Record: J. of TRB*. Issue number 1638, January 1998, pp. 56-63.
- [15] INVIAS – Instituto Nacional de Vías. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*. Bogotá D.C., Colombia, Editorial: Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte, 2007.
- [16] INVIAS – Instituto Nacional de Vías. *Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras*. V. I y II. Bogotá D.C., Colombia, Editorial: Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte 2007a.
- [17] INVIAS – Instituto Nacional de Vías. *La Asfaltita como Modificador de los Asfaltos Colombianos. Modificación de Asfalto de la Refinería de Cartagena con Asfaltita*. Lab. Central del INVIAS, Bogotá, Colombia, Editorial: Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Obras Públicas, 1997, 33 pp.
- [18] C. Fang, T. Li, Z. Zhang, D. Ping. “Modification of Asphalt by Packaging Waste-Polyethylene”, *Polymer Composites*, Vol. 29, No. 5, May 2008, pp. 500-505.
- [19] CEN - Committee European of Normalization. “Bituminous Mixture Test Methods for Hot Mix Asphalts – Part25: Cyclic Compression Tests”. 2005.
- [20] H.A. Rondón, F.A. Reyes, “Comportamiento de una Mezcla Densa en Caliente Modificada con Asfaltita”. *Revista Tecno Lógicas*, No. 22, Julio 2009, pp. 141-161.
- [21] H.A. Khalid. “A New Approach for the Accelerated Ageing of Porous Asphalt Mixtures”. *Proc. of the Institution of Civil Engineers*. Vol. 153, No. 3, August 2002, pp. 171-181.
- [22] J.E. Kliewer, H. Zeng, T.S. Vinson. “Aging and Low-Temperature Cracking of Asphalt Concrete Mixture”. *Journal of Cold Regions Engineering*. Vol. 10, No. 3, September 1996, pp. 134-148.
- [23] K. Nesnas, M.E. Nunn. “A Thermal Pavement Response Model for Top-Down Reflection Cracking in Composite Pavements”. In *85th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. paper No. 06-0127, Washington, D.C., January 2006.
- [24] P.E. Sebaaly, A. Lake, J. Epps. “Evaluation of Low-Temperature Properties of HMA Mixtures”. *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 128, No. 6, November 2002, pp. 578-586.