

IAG166-01-2013
COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA BAJO LAS
CONDICIONES AMBIENTALES DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.
COMPORTAMENTO DE MISTURA ASFÁLTICA NAS CONDIÇÕES
AMBIENTAIS DA CIDADE DE BOGOTÁ

Hugo Alexander Rondón Quintana
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá D.C., Colombia
harondonq@udistrital.edu.co

Fredy Alberto Reyes Lizcano
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C., Colombia
fredy.reyes@javeriana.edu.co

Resumen

El artículo presenta el cambio que experimenta la rigidez y la acumulación de la deformación permanente de una mezcla asfáltica del tipo denso y en caliente cuando es expuesta a las condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia) durante 59 meses. Las mezclas fueron fabricadas utilizando tres cementos asfálticos (CA): dos convencionales (CA 80-100 y CA 60-70) y uno modificado (CA 20-40). El objeto del estudio es evaluar el efecto que tienen las condiciones reales del clima de la ciudad de Bogotá D.C., sobre la respuesta bajo carga dinámica de una mezcla de concreto asfáltico. La tendencia general de las mezclas con el tiempo de exposición fue experimentar un aumento en los valores de rigidez debido principalmente a procesos de endurecimiento por envejecimiento del ligante asfáltico.

Resumo

O artigo apresenta a mudança que experimenta a rigidez y a acumulação da deformação permanente de uma mistura asfáltica tipo densa e quente, quando ela é exposta às condições climáticas da cidade de Bogotá DC (Colômbia) durante 59 meses. As misturas foram fabricadas utilizando três tipos de cimentos asfálticos (AC), duas convencionais (CA CA 80-100 e 60-70) e uma modificada (CA 20-40). A tendência geral das misturas de acordo com o tempo de exposição foi experimentar um acréscimo nos valores de rigidez principalmente devido a processos de endurecimento por envelhecimento do ligante asfáltico.

INTRODUCCIÓN

En el presente artículo, se presenta un estudio que tiene como objetivo principal evaluar la influencia que tienen las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia) sobre la rigidez de una mezcla densa en caliente tipo MDC-2 (de acuerdo a las especificaciones del Instituto Nacional de Vías – INVIAS, 2007). Se optó por analizar este tipo de mezcla debido a que es la más utilizada en Colombia para conformar capas de rodadura, las cuales son las que se encuentran sometidas de manera directa a las condiciones del ambiente. El análisis se realizó

sobre la mezcla asfáltica y no sobre sus componentes individuales (cemento asfáltico y agregado pétreo), ya que es de amplio conocimiento que cementos asfálticos y agregados pétreos de alta calidad no necesariamente aseguran la conformación de mezclas durables al envejecimiento. Adicionalmente muy pocos estudios han sido realizados con el fin de evaluar la influencia de la interacción agregado pétreo-cemento asfáltico, en comparación con aquellos realizados únicamente sobre el cemento asfáltico. Las condiciones climáticas de Bogotá D.C. fueron escogidas debido principalmente 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 5°C y 19°C respectivamente, presencia de lluvias periódicas en cualquier momento del día, humedad entre el 60 al 100% y altura promedio sobre el nivel del mar de 2640 m. Este estudio caracteriza el envejecimiento de las mezclas analizadas de una manera general sin independizar el efecto de cada uno de los componentes del medio ambiente de la ciudad de Bogotá D.C. (agua, viento, rayos UV, temperatura, etc.). En este artículo se presentan los resultados de los primeros 59 meses del proyecto y se evaluaron mezclas fabricadas con los dos cementos asfálticos (CA) fabricados en Colombia, CA 60-70 (PG 64-22) y CA 80-100 (PG 58-22), y un CA modificado producido por Shell Colombia S.A. denominado CA 20-40 (PG 72-22). Las mezclas fabricadas con estos ligantes fueron expuestas a las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá D.C., durante el periodo reportado. CA 60-70, CA 80-100 y CA 20-40 se refieren a cementos asfálticos cuya medida en el ensayo de penetración ASTM D-5 está en un rango entre 60 a 70, 80 a 100 y 20 a 40 décimas de mm respectivamente. Para evaluar la influencia del medio ambiente sobre los parámetros mecánicos de la mezcla se realizaron ensayos de caracterización dinámica como son el de módulo resiliente y la resistencia a la deformación permanente. Adicionalmente fueron ejecutados ensayos de resistencia baja carga monotónica (Marshall).

ANTECEDENTES

El envejecimiento de asfaltos se clasifica en dos grandes tipos: corto y largo plazo (Airey, 2003). Envejecimiento a corto plazo es debido principalmente a la oxidación y volatilización del ligante dentro de la mezcla asfáltica durante su fabricación en la planta de asfaltos (incluyendo el almacenamiento) y la construcción en obra (extensión y compactación). Envejecimiento a largo plazo es debido a la oxidación y endurecimiento in situ que experimenta la mezcla durante su vida en servicio en el pavimento. Los ensayos de película delgada en RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) y PAV (Pressure Asphalt Vessel) son los más utilizados para evaluar la resistencia al envejecimiento a corto y largo plazo del cemento asfáltico (CA) respectivamente. Otros ensayos para evaluar envejecimiento a corto plazo son el “Rolling Microfilm Oven Test” y el “Tilt Oven Durability Test”. Para largo plazo otros ensayos que se utilizan son el “Rotating Cylinder Ageing Test” (RCAT), “Iowa Durability Test”, “SHRP-PAV”, y el “HiPAT”. Sobre mezclas asfálticas, los estudios sobre el fenómeno de envejecimiento pueden ser divididos en cuatro categorías: calentamiento, oxidación, tratamientos con UV o infrarrojos y “Steric hardening”. El procedimiento básico consiste en envejecer primero la mezcla y luego determinar el efecto del envejecimiento sobre los parámetros claves del material como rigidez, viscosidad, resistencia, etc. En el procedimiento por calentamiento se exponen normalmente las mezclas a altas temperaturas durante un determinado periodo de tiempo. Los ensayos de oxidación utilizan una combinación de altas temperaturas y presiones de oxidación.

Un CA envejecido genera, disminución en la adherencia entre el agregado pétreo y el ligante (aumentado la probabilidad de incremento del fenómeno de “stripping”), cambio del comportamiento dúctil a frágil del ligante y la mezcla asfáltica acompañado de un incremento en su rigidez y viscosidad. En algunas ocasiones un leve envejecimiento del CA es deseable en las mezclas debido al incremento en rigidez (Khalid y Walsh, 2000; Khalid, 2002), siempre y cuando el material no cambie su comportamiento dúctil a frágil bajo carga. De acuerdo con Kim et al. (1987), las fallas prematuras o el pobre funcionamiento de pavimentos asfálticos son a menudo el resultado de la débil adherencia entre el ligante y las partículas del agregado, debido a algunas de las siguientes causas: la acción de la humedad, esfuerzos mecánicos y el envejecimiento del asfalto. La oxidación de asfaltos es considerada generalmente como el principal factor que contribuye al endurecimiento y fragilización del mismo. Endurecimiento excesivo del cemento asfáltico es indeseable porque a menudo lleva a problemas asociados con la fragilidad y agrietamiento de la capa asfáltica en el pavimento, especialmente a bajas temperaturas de servicio. La tasa de endurecimiento es afectada por la composición química del asfalto, la luz, las propiedades de los agregados y la temperatura ambiente. Un estado del conocimiento sobre el tema fue reportado por los autores del presente artículo en Rondón y Reyes (2012).

METODOLOGÍA

Caracterización de materiales

Al agregado pétreo se le realizaron los siguientes ensayos, siguiendo las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (2007a): Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (ASTM C-136-01), peso específico y absorción de agregados finos (ASTM D 854-00), peso específico y absorción de agregados gruesos (INV. E-223), resistencia al desgaste de los agregados (tamaños menores de 3/4”) por medio de la máquina de Los Ángeles (ASTM C 131-01), desgaste Micro-Deval (ASTM D6928-03), pérdida en ensayo de solidez (ASTM C 88-99a), partículas fracturadas (ASTM D 5821-01), ensayo para medir el equivalente de arena (ASTM D 2419-95), 10% de finos en seco (DNER-ME 096-98), índice de plasticidad (ASTM D 4318-00) y partículas alargadas y aplanadas (ASTM D 4791-99). Los resultados de estos ensayos se presentan en la tabla 1. A los ligantes asfálticos se les realizaron los ensayos típicos que exige la especificación INVIAS (2007) para caracterizarlos como son: penetración (ASTM D-5), viscosidad absoluta (ASTM D-4402), ductilidad (ASTM D-113), solubilidad en tricloroetileno (ASTM D-2042), contenido de agua (ASTM D-95), punto de ablandamiento (INV. E-712) y ensayos al residuo luego del ensayo de película delgada en horno rotatorio (RTFOT por sus siglas en inglés, ASTM D-2872). Los resultados de estos ensayos se presentan en la tabla 2.

Diseño de mezclas asfálticas

El diseño de las mezclas asfálticas se realizó a través del método Marshall (INV. E-748, INVIAS, 2007a). Este método fue el utilizado ya que es el exigido actualmente en Colombia para el diseño de mezclas de concreto asfáltico. Para cumplir con las especificaciones del INVIAS (2007) y fabricar mezclas asfálticas tipo MDC-2, 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 briquetas del ensayo Marshall (ver tabla 3). Los porcentajes óptimos de cemento asfáltico fueron de 5.3%, 5.6% y 5.6% para el caso de mezclas fabricadas con CA 80-100, CA 60-70 y CA 20-40 respectivamente.

Tabla 1: Caracterización de los agregados.

Ensayo	Método	Recomendado	Resultado
Peso específico	ASTM D 854-00	No aplica	2.56
Equivalente de arena	ASTM D 2419-95	50% Mín.	86%
Caras fracturadas (1 cara)	ASTM D 5821-01	85% Mín.	95%
Caras fracturadas (2 caras)	ASTM D 5821-01	70% Mín.	78%
Partículas alargadas	ASTM D 4791-99	10% Máx.	9.2%
Partículas aplanadas	ASTM D 4791-99	10% Máx.	9.5%
Ataque en Sulfato de sodio	ASTM C 88-99a	12% Máx.	12.4%
Microdeval	ASTM D6928-03	20% Máx.	20.3%
Índice de plasticidad - IP	ASTM D 4318-00	No plástico	No plástico
Desgaste máquina de los Ángeles	ASTM C 131-01	25% Máx.	23.5%
10% de finos en seco	DNER-ME 096-98	110% Mín.	116.5%

Tabla 2: Características generales de los cementos asfálticos.

Ensayo	Método	Unidad	CA 80-100	CA 60-70	CA 20-40
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0.1 mm	85	67	37
Índice de penetración	INV. E-724	-	-0.5	-0.7	-0.8
Viscosidad absoluta (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1400	1750	2920
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	>105	>105	-
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%	>99	>99	>99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	<0.2	<0.2	<0.2
Gravedad específica (25°C)	ASTM D-70	-	1.00	1.01	1.02
Punto de inflamación COC	ASTM D-92	°C	295	275	300
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	0.2	0.4	0.2
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	%	65	70	76

Tabla 3: Granulometría mezcla MDC-2.

Tamiz		% que pasa
Normal	Alternativo	MDC-2
19.0 mm	3/4"	100
12.5 mm	1/2"	80-95
9.5 mm	3/8"	70-88
4.75 mm	No. 4	49-65
2.00 mm	No. 10	29-45
425 µm	No. 40	14-25
180 µm	No. 80	8-17
75 µm	No. 200	4-8

Fase Experimental

Luego de realizar el diseño Marshall se elaboraron las briquetas (180 por tipo de CA) de mezcla asfáltica tipo MDC-2 necesarias para exponerlas al ambiente de la ciudad de Bogotá D.C.,

utilizando el contenido óptimo de CA. Estas muestras fueron colocadas en el techo de un edificio de la ciudad de Bogotá D.C. (ver Figura 1).

Figura 1: Colocación de muestras sometidas al envejecimiento.



Durante estos primeros 59 meses del proyecto, cada 3 o 6 meses a estas briquetas se les han realizado 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. El ensayo de módulo resiliente (INV. E-749, INVIAS, 2007a, ASTM D 412-82) ha sido realizado bajo tres temperaturas (10, 20 y 30°C) y frecuencias de carga (2.5, 5.0 y 10.0 Hz) utilizando un equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT). El ensayo de resistencia a la deformación permanente bajo carga repetida es realizado bajo un esfuerzo de 100 kPa y a 3600 ciclos de carga siguiendo el procedimiento normalizado por EN 12697-22 (CEN, 2005). 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. Adicionalmente se evaluó el efecto del medio ambiente sobre la resistencia bajo carga monotónica en el ensayo Marshall, a través de la relación entre la estabilidad y el flujo (E/F).

RESULTADOS

Evolución de las propiedades dinámicas con el tiempo de exposición al ambiente

En las figuras 2a-c se presenta la evolución del módulo resiliente inicial (E_o , en MPa) de la mezcla MDC-2 (fabricada con CA 80-100, CA 60-70 y CA 20-40 respectivamente) con la temperatura (T , en °C) y la frecuencia de carga (F , en Hz). Se observa un incremento típico del módulo cuando se aumenta la frecuencia de carga y disminuye la temperatura del ensayo. Esta evolución puede ser representada matemáticamente a través de la ecuación empírica (1). Para emplear esta ecuación, es necesaria la identificación de seis variables de estado obtenidas a través de regresiones. Para el caso de la mezcla analizada, los valores de estas variables se presentan en la tabla 4. Estas variables no presentan un significado físico definido y deben cambiar principalmente con el tipo de ligante, la granulometría y el tipo de agregado pétreo utilizado para la fabricación de las mezclas. La frecuencia de carga F en la ecuación (1) puede ser traducida a velocidad del vehículo (V , en cm/s) a través de la ecuación (2) propuesta por Lin (1989, 1989a).

$$E_o = \exp(a + bT^2) + \left[\exp(c + d\sqrt{T}) + (e + fT^3)\sqrt{F} \right]^2 \quad (1)$$

$$F = \frac{1}{2\pi t_c} \quad t_c = \frac{L}{V} 10^{0.004h} \quad (2)$$

t_c es el tiempo de aplicación de carga en segundos de un vehículo en movimiento a diferentes profundidades (h en cm y medida desde la rasante del pavimento) y L es la longitud de contacto de la llanta con el pavimento (generalmente de 30 cm).

Figura 2: Evolución del módulo resiliente inicial (E_o) de la mezcla MDC-2 con la temperatura (T) y la frecuencia de carga (F). Mezcla fabricada con a) CA 80-100, b) CA 60-70 y c) CA 20-40.

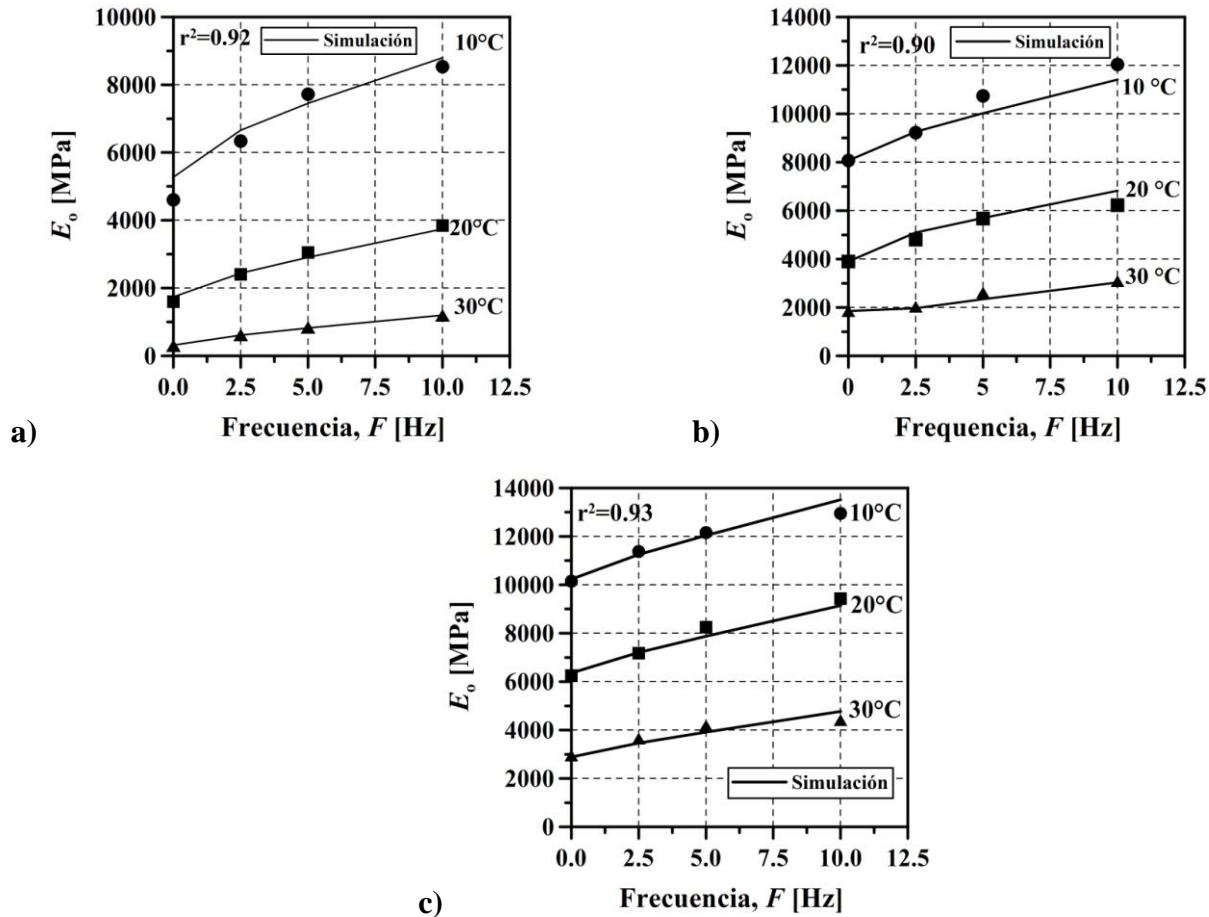


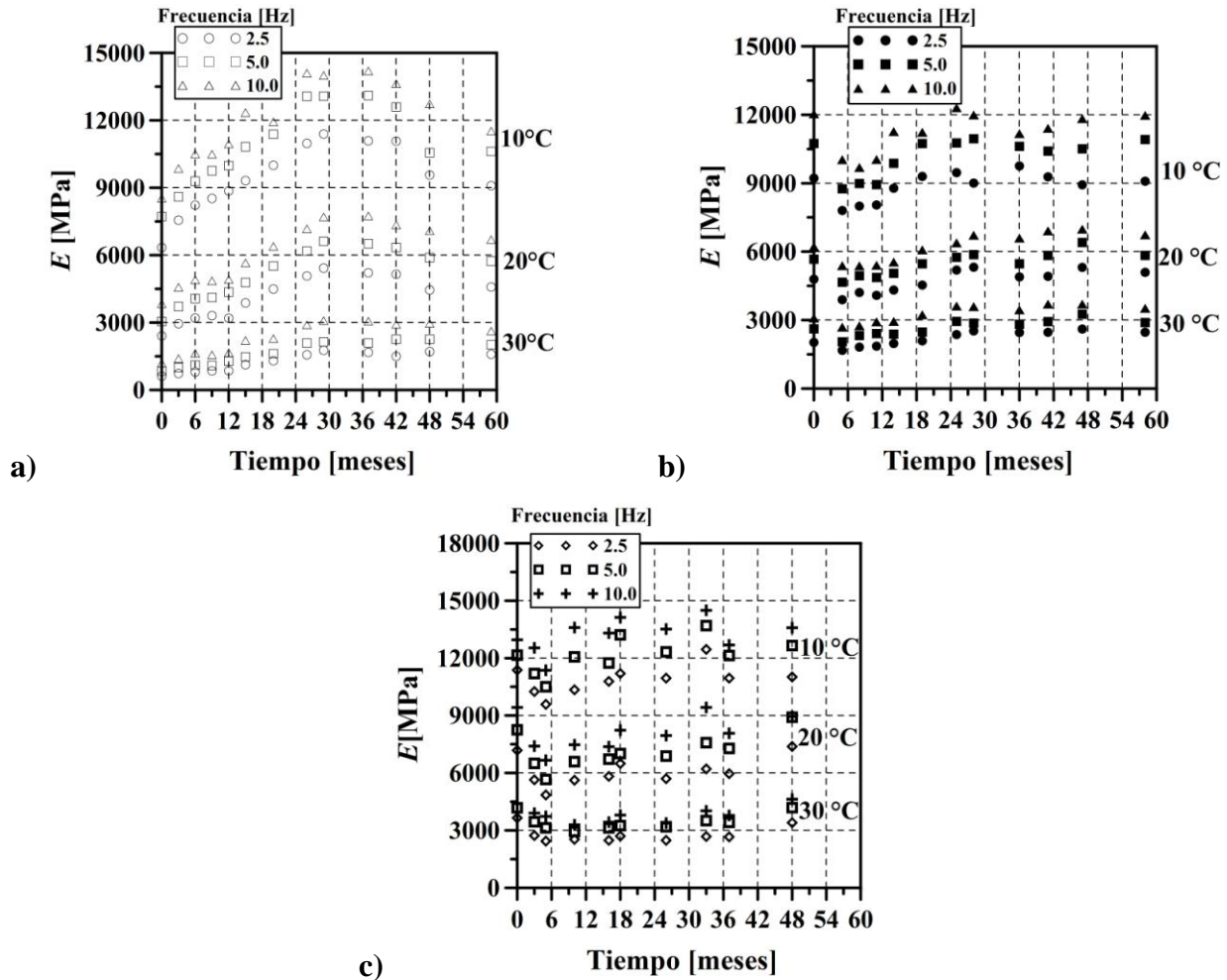
Tabla 4: Variables para simular la rigidez de la mezcla MDC-2 en función de T y F .

CA	a	b	c	D	e	f
80-100	8.78	-0.0035	5.26	-0.63	12.4	-1.75×10^{-4}
60-70	9.21	-0.00214	3.40	-0.31	14.9	-1.5×10^{-4}
20-40	9.39	-0.00158	2.64	-0.18	15.9	-1.4×10^{-4}

En las figuras 3 y 4 se presenta la evolución del módulo resiliente y la deformación permanentes respectivamente de las mezclas asfálticas con el tiempo de exposición al medio ambiente. Se observa para las mezclas fabricadas con CA 80-100, CA 60-70 y CA 20-40 (figuras 3a-c

respectivamente), un incremento típico del módulo cuando se aumenta la frecuencia de carga y disminuye la temperatura del ensayo. Para el caso de las mezclas fabricadas con CA 80-100, el módulo tiende a aumentar con el tiempo de exposición al ambiente (ver figura 3a) y por lo tanto la tendencia general de la resistencia a la deformación permanente es aumentar (figura 4a). Este fenómeno es debido principalmente al envejecimiento por oxidación que experimenta el cemento asfáltico por efectos de temperatura, humedad y exposición a radiación ultra-violeta (UV).

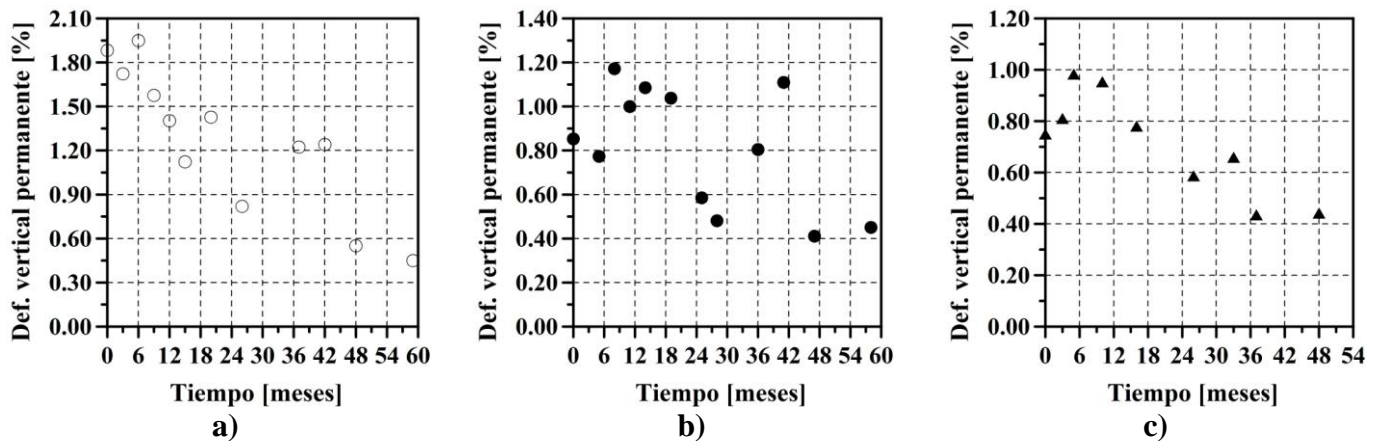
Figura 3: Evolución del módulo resiliente (E) con el tiempo de envejecimiento (t) para mezclas fabricadas con a) CA 80-100, b) CA 60-70 y c) CA 20-40.



Las mezclas fabricadas con CA 60-70 y CA 20-40 experimentan un comportamiento diferente en comparación con aquellas fabricadas con CA 80-100 (ver figuras 3b-c y 4b-c). En los primeros meses de exposición, las mezclas disminuyen su módulo aumentando las deformaciones permanentes, luego dicho módulo se estabiliza y por último la tendencia es a aumentar (especialmente cuando el ensayo se realiza con temperaturas entre 20 y 30°C) tendiendo a disminuir los valores de deformación. La explicación del decaimiento en el módulo en los primeros meses de exposición no es fácil y a la fecha no se tiene claramente identificada. Inicialmente el grupo de investigación piensa que tal vez es debido a la generación de microfisuras que se producen a bajas temperaturas (en Bogotá la temperatura en horas de la noche y la

madrugada oscila entre 5 y 8°C) cuando las mezclas son rígidas (comportamiento frágil). El fenómeno de micro-fisuración a bajas temperaturas ha sido ampliamente reportado por diversos investigadores (p.e., Sebaaly et al., 2002; Nesnas y Nunn, 2006). Sin embargo este efecto es evidenciado en campo donde las mezclas están confinadas lateralmente y las temperaturas están por debajo de 0°C. Por lo anterior, no se tiene una explicación clara del fenómeno. Después de los primeros 6 meses de exposición, estas micro-fisuras tal vez se estabilizan y el aumento en rigidez en los meses siguientes se debe a un fenómeno de envejecimiento y oxidación del asfalto similar al que ocurre en las mezclas fabricadas con CA 80-100. Un comportamiento similar al experimentado por las mezclas fabricadas con CA 60-70 y CA 20-40 fue evidenciado por los autores del presente documento, ejecutando la misma fase experimental sobre mezclas fabricadas con CA 60-70 modificadas por vía húmeda con una gilsonita (asfaltita o asfalto natural) y con un desecho de PVC. Estos resultados pueden ser consultados en Rondón y Reyes (2011, 2012).

Figura 4: Evolución de la deformación vertical permanente con el tiempo de envejecimiento (t) para mezclas fabricadas con a) CA 80-100, b) CA 60-70 y c) CA 20-40.



Los resultados presentados pueden ser expresados matemáticamente a través de la ecuación empírica regresional (3-4). Al igual que en la ecuación (1), en la (3-4) las variables de estado k_1 - k_2 son obtenidas a través de regresión y no presentan un significado físico definido (ver tabla 5). Ecuaciones empíricas regresionales que pueden reproducir la evolución del módulo resiliente con el tiempo de exposición al medio ambiente son enunciadas en (5) y (6) para las mezclas analizadas. Estas ecuaciones son formuladas con base en las ecuaciones (1) y (3-4).

Tabla 5. Variables para simular la rigidez de la mezcla MDC-2 en función del tiempo de exposición al medio ambiente.

T [°C]	CA 80-100		CA 60-70			CA 20-40		
	k_1	k_2	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3
10	0.01	-0.12	0.78	0.03	0.22	0.27	0.03	0.13
20	0.01	-0.14	0.72	0.05	0.28	0.63	0.05	0.37
30	0.01	-0.16	0.69	0.07	0.31	0.67	0.04	0.34

$$\frac{E}{E_o} = \frac{1}{1 + k_1 t + k_2 \sqrt{t}}, \quad \text{para CA 80-100} \quad (3)$$

$$\frac{E}{E_o} = k_1 + k_2 \sqrt{t} + k_3 \exp(-t), \quad \text{para CA 60-70 y CA 20-40} \quad (4)$$

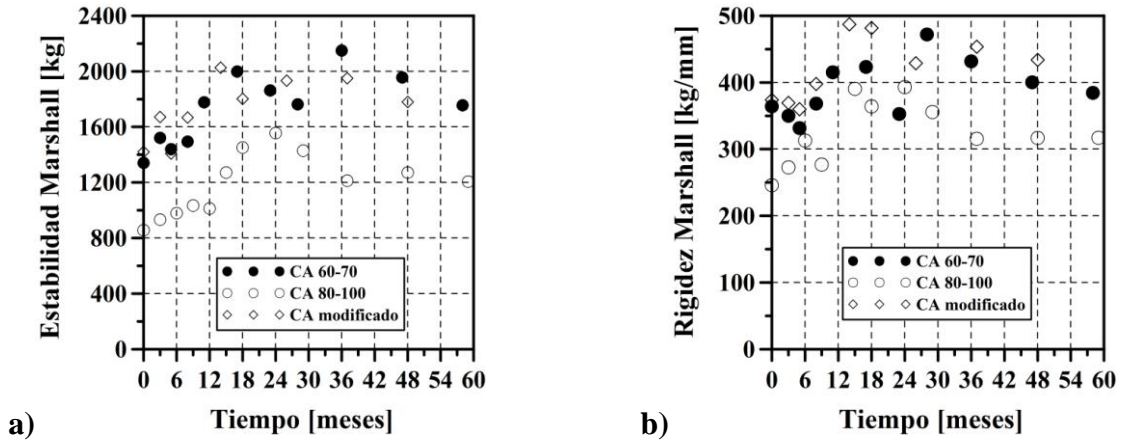
$$E = \left\{ \exp(a + bT^2) + \left[\exp(c + d\sqrt{T}) + (e + fT^3) \sqrt{F} \right]^2 \right\} \left[\frac{1}{1 + k_1 t + k_2 \sqrt{t}} \right], \quad \text{CA 80-100} \quad (5)$$

$$E = \left\{ \exp(a + bT^2) + \left[\exp(c + d\sqrt{T}) + (e + fT^3) \sqrt{F} \right]^2 \right\} [k_1 + k_2 \sqrt{t} + k_3 \exp(-t)], \quad \text{CA 60-70, 20-40} \quad (6)$$

Evolución de la rigidez Marshall con el tiempo de exposición al ambiente

En la figura 5a se observa la evolución en el tiempo (t en meses) de los parámetros de estabilidad del ensayo Marshall y en la figura 5b la relación entre la estabilidad (E) y el flujo (F) (llamada por algunos investigadores como rigidez Marshall).

Figura 5. Evolución de a) estabilidad Marshall y b) relación E/F (rigidez Marshall) con el tiempo de envejecimiento, para mezclas fabricadas con CA 80-100, CA 60-70 y CA 20-40.



CONCLUSIONES

En este estudio se ejecutó una fase experimental destinada a medir la influencia de las condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá D.C. sobre la rigidez de una mezcla de concreto asfáltico tipo MDC-2 fabricada con cementos asfálticos tipo CA 80-100, CA 60-70 y CA 20-40 (éste último un asfalto modificado). De los resultados se concluye que el módulo resiliente de este tipo de mezcla fabricada con CA 80-100, incrementa en promedio durante 48 meses de exposición al medio ambiente entre 1.8 y 2.7 veces para temperaturas $T=10^\circ\text{C}$ y $T=30^\circ\text{C}$ respectivamente. Entre $t=48$ y $t=59$ meses la rigidez disminuye y la tendencia en el módulo es a estabilizarse, alcanzando valores entre 1.3 y 2.4 veces mayores con respecto al inicial para $T=10^\circ\text{C}$ y $T=30^\circ\text{C}$ respectivamente. Las mezclas fabricadas con CA 60-70 y CA 20-40 experimentan una disminución máxima en su módulo de 20% y 30% respectivamente en los primeros seis meses de exposición para luego aumentar y experimentar después de $t=24$ meses, módulos que superan ligeramente el valor inicial (excepto para el caso de la mezcla fabricada con CA 60-70 y $T=30^\circ\text{C}$ en el cual se evidencia un incremento promedio de hasta 25%). De manera general se observa que las mezclas fabricadas con los tres tipos de CA utilizados incrementan su resistencia mecánica bajo carga monotónica (evaluado a través de la estabilidad y la relación E/F

del ensayo Marshall) con el tiempo de exposición al ambiente. Este incremento es de aproximadamente 1.37, 1.6 y 1.8 veces para el caso de las mezclas fabricadas con CA 20-40, CA 60-70 y CA 80-100 respectivamente. Para el caso de las mezclas fabricadas con CA 80-100 el módulo resiliente y la resistencia a la deformación permanente tienden a aumentar en el tiempo debido principalmente a fenómenos de envejecimiento por oxidación del asfalto. De los ensayos de módulo resiliente y rigidez Marshall se constata que el asfalto más blando producido en Colombia (CA 80-100) tiende a rigidizarse y cambiar sus propiedades mayormente con el tiempo de exposición al medio ambiente, volviéndose frágil y quebradizo. Para el caso de Bogotá D.C. es mejor utilizar un asfalto que no modifique mayormente sus propiedades en el tiempo. Se evidencia un mejor comportamiento entonces de los asfaltos CA 60-70 y CA 20-40.

REFERENCIAS

- Airey, G. D. (2003). State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 4, No 3, 165-176.
- Carpenter, S. H., Ghuzlan, K. A. and Shen, S. (2003). Fatigue endurance limit for highway and airport pavement. *Transportation Research Record (TRR): Journal of the Transportation Research Board*, No. 1832, TRB, National Research Council, Washington D.C., 131-138.
- INVIAS - Instituto Nacional de Vías. (2007). Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras. Bogotá D.C., Colombia.
- INVIAS - Instituto Nacional de Vías. (2007a). Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. V. I y II. Bogotá D.C., Colombia.
- Khalid, H. A. (2002). A new approach for the accelerated ageing of porous asphalt mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport* 153, Issue 3, 171-181.
- Khalid, H. A. and Walsh, C. M. (2000). Relating mix and binder fundamental properties of aged porous asphalt materials. In: *Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures (Barcelona)*, 398-405.
- Kim, O-K., Bell, C. A., Wilson, J. E. and Boyle, G. (1987). Development of laboratory oxidative aging procedures for asphalt cements and asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 1115, Transportation Research Board, Washington D.C., 101-112.
- Lin, X. X. (1989). A method of determining the relevant parameters in the calculation of pavement deformation of bituminous surface. *China J. Highway and Transport*, No. 2, 10-20.
- Lin, X. X. (1989a). Study on semi-rigid asphalt pavement. Rep. of Key Sci. and Tech. Projects 85-65, Ministry of Communications, Beijing.
- Nesnas, K. and Nunn, M. E. (2006). 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.
- Reyes, F. A. (2003). *Diseño Racional de Pavimentos*. Escuela Colombiana de Ingeniería, 1ra. Edición, Bogotá D.C., Colombia.
- Rondón, H. A. y Reyes, F. A. (2011). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de PVC. *Revista Tecno Logicas*, No. 27, 11-31.
- Rondón, H. A. y Reyes, F. A. (2012). *Envejecimiento de mezcla asfáltica en condiciones ambientales reales*. Editorial Académica Española, Madrid, España, 2012.
- Rondón, H. A. y Reyes, F. A. (2012a). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con asfaltita. *Revista de Ingeniería*, No. 36, 12-19.
- Sebaaly, P. E., Lake, A. and Epps, J. (2002). Evaluation of low-temperature properties of HMA mixtures. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 128, No. 6, 578-586.