

## CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA SOMETIDA A LAS CONDICIONES AMBIENTALES DE BOGOTÁ

HUGO ALEXANDER RONDÓN\*  
FREDY ALBERTO REYES\*\*  
HERMES ARIEL VACCA\*\*\*

### RESUMEN

El artículo presenta el cambio que experimentan el módulo resiliente, la deformación vertical permanente y la ley de fatiga de una mezcla de concreto asfáltico cuando es expuesta a las condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia) durante 29 meses. La tendencia de la mezcla con el tiempo de exposición es a producirse un aumento en los valores de rigidez, debido principalmente a procesos de endurecimiento por envejecimiento del ligante asfáltico. Este aumento en rigidez genera incremento de la resistencia a la deformación permanente y disminución de la vida de fatiga de la mezcla analizada. Con base en la evolución del módulo resiliente con el tiempo de exposición al medio ambiente se propone una ecuación para predecir de manera aproximada el cambio que ocurre en la vida a la fatiga de la mezcla.

**PALABRAS CLAVE:** módulo resiliente; ley de fatiga; envejecimiento; mezcla asfáltica densa en caliente.

---

\* Ingeniero Civil, Universidad Francisco de Paula Santander; Magíster en Ingeniería Civil y Doctor en Ingeniería, Universidad de los Andes. Profesor Asistente, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. harondonq@udistrital.edu.co.

\*\* Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana; Magíster y Doctor en Ingeniería, École Nationale de Ponts et Chaussées, Nantes, Francia. Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. fredy.reyes@javeriana.edu.co.

\*\*\* Ingeniero Civil, Universidad Católica de Colombia; Magíster en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana. Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. vacca@javeriana.edu.co.

## DYNAMIC CHARACTERIZATION OF AN ASPHALT MIXTURE EXPOSED TO ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF BOGOTÁ

### ABSTRACT

The paper presents the evolution of the resilient modulus, permanent vertical deformation, and fatigue law of hot mix asphalt (HMA) when exposed to the weather conditions in the city of Bogotá D.C. (Colombia) for 29 months. The trend of mixture with the exposure time is to experience an increase in stiffness values, mainly due to age-hardening process of the asphalt binder. This increase in stiffness creates increased resistance to permanent deformation and decrease in fatigue life of the analyzed mixture. Based on the resilient modulus evolution with time of exposure to the environment an equation to predict approximately the change for the fatigue life of the mixture is proposed.

KEY WORDS: resilient modulus; fatigue law; aging; dense hot asphalt mix.

## CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE UMA MISTURA ASFÁLTICA SUBMETIDA ÀS CONDIÇÕES AMBIENTAIS DE BOGOTÁ

### RESUMO

O artigo apresenta a mudança que experimentam o módulo de resiliência, a deformação vertical permanente e a lei de fadiga de uma mistura de concreto asfáltico quando é exposta às condições climáticas da cidade de Bogotá D.C. (Colômbia) durante 29 meses. A tendência da mistura com o tempo de exposição é a produzir-se um aumento nos valores de rigidez, devido principalmente a processos de endurecimento por envelhecimento do ligante asfáltico. Este aumento em rigidez gera incremento da resistência à deformação permanente e diminuição da vida de fadiga da mistura analisada. Com base na evolução do módulo de resiliência com o tempo de exposição ao médio ambiente propõe-se uma equação para predizer de maneira aproximada a mudança que ocorre na vida à fadiga da mistura.

PALAVRAS-CÓDIGO: módulo de resiliência; lei de fadiga; envelhecimento; mistura asfáltica densa em quente.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los principales mecanismos de degradación que se intentan controlar en las metodologías empíricas y mecanicistas de diseño de pavimentos son la fatiga y el exceso de deformación permanente en la dirección vertical (ahuellamiento) (p. ej., Shell, 1978; Asphalt Institute, 1982; MEPDG, 2004). El fenómeno de fatiga ocurre en las capas ligadas, y para el caso de estructuras flexibles, se presenta cuando se generan valores elevados de deformación a tracción bajo

carga repetida en la zona inferior de la capa asfáltica. El paso continuo de vehículos hace que la capa asfáltica flexione, generando esfuerzos de tensión en su extremo inferior. Esta repetición de carga hace que la mezcla asfáltica pierda rigidez y origina la aparición de deformaciones plásticas a tracción, que a su vez conducen a la formación de microfisuras. Ante la continuidad de las repeticiones de carga y la disminución de la rigidez se produce la coalescencia de las microfisuras que lleva a la formación de una fisura visible (macrofisura). Si el fenómeno de fatiga



es debido a cargas, las microfisuras se originan en el extremo inferior de la capa asfáltica (zona donde el esfuerzo de tensión es mayor) y se propagan de manera ascendente hacia la superficie del pavimento, en donde se reflejan como fisuras paralelas direccionadas en el sentido longitudinal de la vía, las cuales ante la repetición de las cargas de tránsito se propagan formando piezas angulares que desarrollan un aspecto parecido a la piel de cocodrilo. Si este fenómeno ocurre por temperatura, el efecto de propagación de fisuras ocurre de manera contraria, las microfisuras se generan desde la rasante y se extienden hacia la fibra inferior de la capa asfáltica. Por otro lado, el ahuellamiento es la deformación vertical residual que se va acumulando debido al paso de los vehículos, la cual puede generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento. En una capa asfáltica, este fenómeno se controla principalmente por medio de la rigidez de la mezcla que la conforma.

En Colombia son escasas las investigaciones que se han realizado sobre el fenómeno de fatiga en mezclas asfálticas, debido ante todo a la falta de equipos apropiados para llevar a cabo mediciones en campo y en laboratorio, y al escaso presupuesto destinado para actividades de investigación. Esta situación explica la falta de conocimiento sobre el tema y la inexistencia de un modelo propio que caracterice el comportamiento a la fatiga a partir de las propiedades (mecánicas, químicas, reológicas y físicas) de los materiales, las condiciones del medio ambiente y el comportamiento del tráfico.

En general, los ensayos de fatiga de mezclas asfálticas consisten en someter una muestra, de geometría específica, a solicitaciones repetitivas e idénticas para determinar el número de ciclos de carga que puede soportar (Di Benedetto y De la Roche, 2005). Este número de ciclos de carga soportados antes de la falla se denomina vida a la fatiga. De acuerdo con Epps y Monismith (1972), Rao Tangella *et al.* (1990), Di Benedetto *et al.* (2004) y Di Benedetto y De la Roche (2005), la respuesta a la fatiga de mezclas asfálticas se ve afectada más que todo por los métodos de compactación de la muestra, el modo de carga y tipo

de ensayo aplicado, los parámetros de diseño de la mezcla y las variables asociadas al medio ambiente. Un estado del conocimiento más detallado sobre el fenómeno de fatiga en mezclas asfálticas puede ser consultado en González y Vásquez (2009).

Por otro lado, los principales factores que afectan la durabilidad de mezclas asfálticas, suponiendo que se encuentran bien construidas, son: el proceso de envejecimiento y el daño por humedad (Airey, 2003). Es decir, una mezcla asfáltica debe ser diseñada y construida no sólo para que resista las cargas impuestas por el tránsito, sino también la acción del 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 hace en la actualidad es separando cada uno de los componentes que lo constituyen (agua, temperatura y rayos ultravioleta, 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 (Kemp y Predoehl, 1981; Welborn, 1984; Kim *et al.*, 1987; Airey, 2003; Said, 2005). Adicionalmente, por lo general, estos estudios utilizan ensayos y equipos (p. ej., hornos para ensayo de película delgada del tipo TFOT o rotatorios RTFOT, microondas, vasijas de envejecimiento de ligantes a presión PAV) que no pueden reproducir totalmente la influencia que tiene cada componente del ambiente sobre las propiedades mecánicas y reológicas de las mezclas y los ligantes asfálticos (Jemison *et al.*, 1991; Verhasselt, 1997; Migliori y Corté, 1998). 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 (Jemison *et al.*, 1991; Migliori y Corté, 1998; Airey, 2003). En conclusión general se reporta que estos métodos de ensayo tienen como limitación principal que son incapaces aún 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 de prueba 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 y por separado la influencia que tienen las cargas vehiculares y el ambiente.

Por todo lo expuesto, en este 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, la deformación vertical permanente y la resistencia a la fatiga de una mezcla densa en caliente tipo MDC-2, según las especificaciones del Instituto Nacional de Vías, INVIAS (2007a). Se optó por analizar este tipo de mezcla 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 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: predominio de clima frío con temperaturas mínimas y máximas promedio de 6 °C y 20 °C, humedad entre 60 y 100 %, presencia de lluvias periódicas en cualquier momento del día

y altura sobre el nivel del mar de 2.640 m (ver tabla 1). Con el fin de entender con mayor precisión la influencia del ambiente en el comportamiento de mezclas asfálticas, en futuras investigaciones se analizarán otros climas. En este artículo se presentan los resultados de los primeros 29 meses del proyecto en que se han evaluado mezclas fabricadas con cemento asfáltico (CA) tipo CA 80-100, el ligante usado en Colombia cuando la temperatura media anual promedio de la zona donde se construirá la capa asfáltica es inferior a 24 °C (INVIAS, 2007a). Se refiere CA 80-100 a un cemento asfáltico cuya medida en el ensayo de penetración ASTM D-5 está en un rango entre 80 y 100 décimas de mm.

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, resistencia a la deformación permanente y ley de fatiga. Los ensayos de fatiga fueron hechos bajo deformación controlada, ya que en la práctica las mezclas de concreto asfáltico para capas de rodadura por lo general no trabajan bajo esfuerzo constante.

**Tabla 1.** Promedios meteorológicos mensuales para Bogotá D.C.

Mes	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Precipitación diaria (cm)
Enero	6	20	2,06
Febrero	7	20	3,30
Marzo	8	20	4,73
Abril	9	19	6,74
Mayo	9	19	7,20
Junio	9	18	3,83
Julio	8	18	3,43
Agosto	8	18	3,00
Septiembre	8	19	4,64
Octubre	8	19	9,03
Noviembre	8	19	6,08
Diciembre	7	19	3,80



## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Diseño de mezclas asfálticas y caracterización de materiales

El agregado pétreo empleado para la elaboración de las mezclas asfálticas para el ensayo Marshall (llamadas briquetas) procede de la cantera “Subchoque” (Cundinamarca, Colombia). A estos materiales se les realizaron los siguientes ensayos, siguiendo las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2007b): análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (INV. E-213), peso específico y absorción de agregados finos (INV. E-222),

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 (INV. E-218), desgaste Micro-Deval (INV. E-238), pérdida en ensayo de solidez (INV. E-220), partículas fracturadas (INV. E-227), ensayo para medir el equivalente de arena (INV. E-133) e índices de alargamiento y aplanamiento (INV. E-230). Los resultados de estos ensayos se presentan en la tabla 2 y se observa que los valores cumplen con los requisitos mínimos de calidad exigidos por las especificaciones INVIAS (2007a) para fabricar mezclas tipo MDC-2 para capas de rodadura y tránsito NT3 (altos volúmenes).

**Tabla 2.** Caracterización de los agregados

Ensayo	Requisitos mínimos de calidad INVIAS (2007a) – NT3	Resultado
Peso específico	No aplica	2,56
Equivalente de arena	50 % mín.	86 %
Caras fracturadas (1 cara)	85 % mín.	92 %
Índice de alargamiento	10 % máx	10 %
Índice de aplanamiento	10 % máx.	10 %
Ataque en sulfato de magnesio	18,0 % máx.	12,4 %
Micro-Deval	20 % máx.	20,3 %
Resistencia al desgaste en la máquina de Los Ángeles	25 % máx.	22,5 %

Al cemento asfáltico CA 80-100 se le hicieron los ensayos típicos que exige la especificación INVIAS (2007a) para caracterizarlo 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 3.

Luego de realizar los ensayos al agregado pétreo y a los cementos asfálticos se fabricaron cinco

briquetas (compactadas a 75 golpes por cara) por cada porcentaje de asfalto entre 4,5 y 6,5 %, con el fin de emprender el diseño Marshall (INV. E-748, INVIAS, 2007b) para determinar el contenido óptimo de asfalto de la mezcla. Para cumplir con las especificaciones del INVIAS (2007a) y fabricar mezclas asfálticas tipo MDC-2, se modificó la granulometría original de los agregados, tomando como referencia los valores promedio en porcentajes de la franja granulométrica que exige la especificación para la elaboración de las briquetas del ensayo Marshall. Los cálculos obtenidos del ensayo Marshall están registrados en la tabla 4. El porcentaje óptimo de cemento asfáltico de acuerdo con los datos de la tabla 4 es

de 5,3 %. En este porcentaje se están cumpliendo los requisitos mínimos exigidos por la especificación INVIAS (2007a) para MDC-2 y tránsitos tipo NT1 y NT2 (volúmenes de tránsito bajos y medios).

**Tabla 3.** Características generales del cemento asfáltico CA 80-100

Ensayo	Método	Unidad	CA 80-100	Resultado
<b>Ensayos sobre el asfalto original</b>				
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0,1 mm	80-100	85
Índice de penetración	INV. E-724	-	-1/+1	-0,5
Viscosidad absoluta (60 °C)	ASTM D-4402	Poises	1000 mín.	1400
Ductilidad (25 °C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	100 mín.	>105
Solubilidad en tricloroetileno	ASTM D-2042	%	99 mín.	>99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	0,2 máx.	<0,2
Punto de inflamación COC	ASTM D-92	°C	232 mín.	295
<b>Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT</b>				
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	1,0 máx.	0,2
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	%	48 mín.	65

**Tabla 4.** Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica MDC-2 con CA 80-100

CA [%]	Peso unitario (g/cm <sup>3</sup> )	Estabilidad (E) (kg)	Vacios en la mezcla (%)	Vacios en agregados (%)	Flujo (F) (mm)	Relación E/F (kg/mm)
4,5	2,21	710	7,63	17,52	3,33	213,09
5,0	2,24	835	5,76	16,89	3,45	242,14
5,5	2,24	853	5,09	17,33	3,51	243,48
6,0	2,23	813	4,64	17,96	3,70	219,71

## 2.2 Fase experimental

Luego de realizar el diseño Marshall se elaboraron las briquetas (180 en total) de mezcla asfáltica tipo MDC-2 necesarias para exponerlas al ambiente de Bogotá D.C., utilizando el contenido óptimo de CA. Estas muestras fueron colocadas en el techo de un edificio de la ciudad.

Durante los primeros 29 meses del proyecto, cada tres meses a estas briquetas se les han efectuado 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, 2007b) ha sido realizado con tres temperaturas (10, 20 y 30°C) y frecuencias de carga diferentes (2,5; 5,0 y 10,0 Hz) empleando un equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT), y el 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 (CEN, 2005). Con los resultados de estos ensayos se desarrolló una ecuación empírica para predecir la evolución de la rigidez de la mezcla analizada a lo largo del tiempo de exposición al medio.



Para evaluar la influencia del medio ambiente de Bogotá D.C. sobre la resistencia a la fatiga de la mezcla estudiada, se ejecutaron dos etapas.

*Etapla 1.* Se analizaron 360 ensayos de fatiga y módulo resiliente elaborados sobre muestras de mezclas de concreto asfáltico tipo MDC-1, MDC-2 y MDC-3 (acordes con INVIAS, 2007a) fabricadas con CA 80-100. El análisis se efectuó sobre otros dos tipos de mezclas diferentes a la MDC-2 (MDC-1 y MDC-3), con el fin de determinar la evolución de su resistencia a la fatiga con la rigidez. Los resultados de las fatigas analizadas fueron obtenidos haciendo ensayos por el método de tracción indirecta en un equipo NAT y siguiendo el procedimiento establecido por la especificación prEN 12697-24E (CEN, 2005). La temperatura del ensayo y la frecuencia de carga fueron de 20 °C y 2,5 Hz respectivamente. El tipo de carga empleado en el ensayo fue el de deformación controlada; las dimensiones de las muestras para los ensayos de fatigas son las mismas de las briquetas Marshall. Con los resultados de esta etapa se desarrolló una ecuación empírica que relaciona el cambio que experimenta la vida a la fatiga en laboratorio de mezclas de concreto asfáltico con la rigidez.

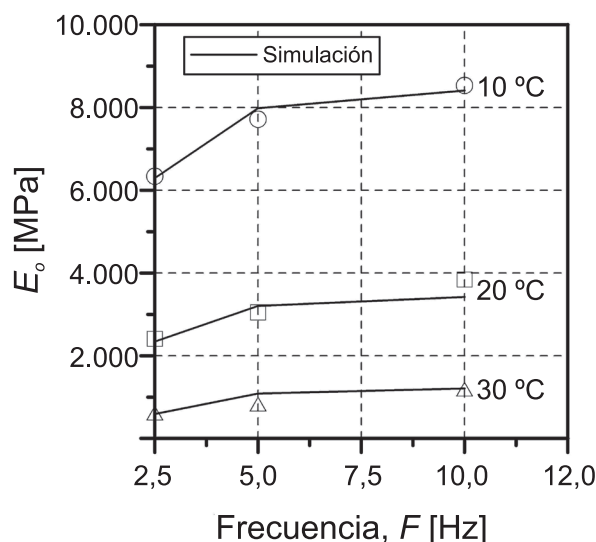
*Etapla 2.* Utilizando la ecuación desarrollada con los resultados de la etapa 1 y con base en los datos de evolución de la rigidez de la mezcla MDC-2 con el tiempo de exposición al medio, se determinó de manera aproximada la disminución de la resistencia a la fatiga que sufre dicha mezcla cuando se expone al clima de Bogotá D.C.

### 3. RESULTADOS

En la figura 1 se presenta la evolución del módulo resiliente inicial ( $E_o$ ) de la mezcla MDC-2 con la temperatura  $T$  y la frecuencia de carga  $F$ . 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 mediante la ecuación empírica 1 en donde las unidades de  $E_o$ ,  $T$  y  $F$  son MPa, °C y

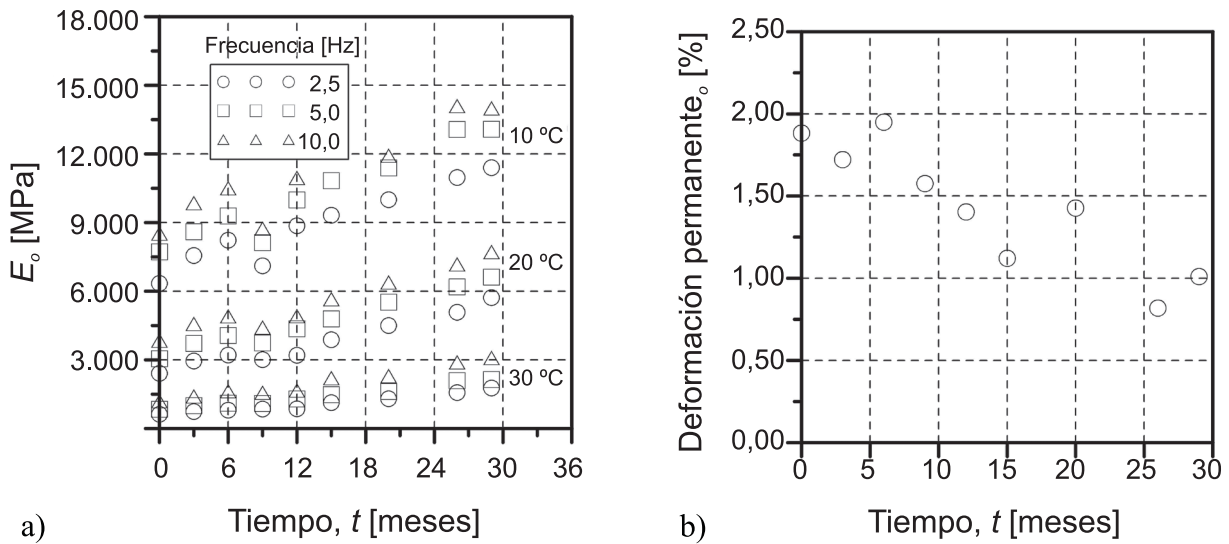
Hz respectivamente. Para emplear esta ecuación, es necesaria la identificación de cuatro variables de estado obtenidas con regresiones. Para el caso de la mezcla analizada los valores de estas variables fueron  $k_1 = -8.723,8$ ;  $k_2 = 9.551,31$ ;  $k_3 = 54.625,9$  y  $k_4 = -74.827,9$ . Estas variables no presentan un significado físico definido y cambian principalmente con el tipo de ligante, la granulometría y el tipo de agregado pétreo utilizado para la fabricación de las mezclas.

$$E_o = \left[ \frac{k_1 \sqrt{T} F^2 + k_2 \sqrt{T} + k_3 F^2 + k_4}{\sqrt{T} F^2} \right] \quad (1)$$



**Figura 1.** Evolución del módulo resiliente inicial  $E_o$  de la mezcla MDC-2 con la temperatura  $T$  y la frecuencia de carga  $F$

En la figura 2a se observa la evolución del módulo resiliente  $E$  de la mezcla asfáltica con el tiempo de exposición al ambiente  $t$ . Para el caso de la mezcla analizada, el módulo tiende a aumentar con el tiempo de exposición al ambiente, y por lo tanto, la resistencia a la deformación permanente aumenta (figura 2b). Este fenómeno puede ser debido ante todo al envejecimiento por oxidación que experimenta el cemento asfáltico por efectos del agua, el aire, la temperatura y la exposición a radiación ultravioleta (UV).

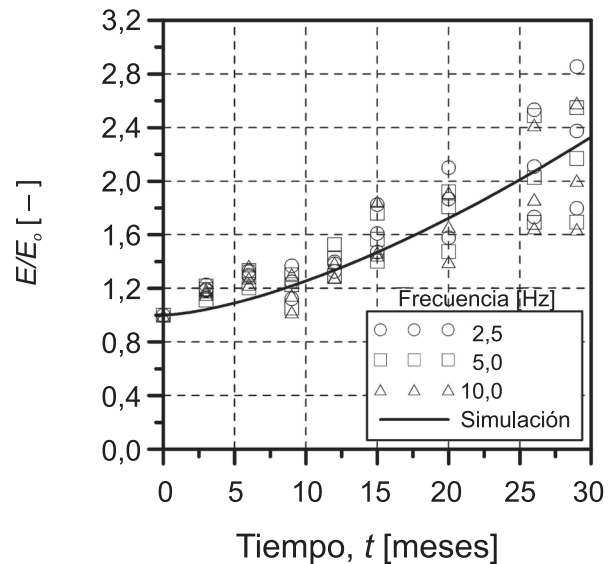


**Figura 2.** a) Evolución del módulo resiliente  $E$ , con el tiempo de exposición  $t$   
 b) Evolución de la deformación permanente vertical con el tiempo de exposición  $t$

En la figura 3 se presenta la relación  $E/E_0$  entre el módulo resiliente que se obtiene luego de someter las briquetas al ambiente durante distintos periodos  $E$  y el módulo resiliente inicial de las mezclas en un tiempo  $t=0$  meses ( $E_0$ ). Para el caso de las mezclas fabricadas con CA 80-100, el módulo alcanzado en  $t=29$  meses aumenta entre 64 y 185 %, dependiendo de la temperatura y frecuencia del ensayo, con respecto al inicial. Estos resultados pueden ser expresados en forma matemática por la ecuación 2. Las unidades de  $t$  son meses y esta ecuación puede ser usada solamente para la mezcla analizada en el rango de tiempo evaluado (29 meses), ya que se debe prever un cambio de su comportamiento a medida que aumente  $t$ . Al igual que en la ecuación 1, en la 2 la variable de estado  $k_5=0,0081$  se obtiene por medio de regresión y no presenta un significado físico definido. Una ecuación empírica de regresión que puede reproducir la evolución del módulo resiliente con el tiempo de exposición al ambiente se enuncia en la ecuación 3 para el caso de la mezcla analizada. Esta ecuación se formula con base en las ecuaciones 1 y 2. En la figura 3 se presenta la simulación de los ensayos ejecutados empleando la ecuación 3; el coeficiente de correlación es  $r^2=0,79$ .

$$\frac{E}{E_0} = \left[ 1 + k_5 t^{3/2} \right] \quad (2)$$

$$E = \left[ \frac{k_1 \sqrt{T} F^2 + k_2 \sqrt{T} + k_3 F^2 + k_4}{\sqrt{T} F^2} \right] \left[ 1 + k_5 t^{3/2} \right] \quad (3)$$



**Figura 3.** Evolución de la relación entre el módulo resiliente  $E$  y el módulo inicial  $E_0$  con el tiempo de envejecimiento  $t$





El efecto del envejecimiento sobre la vida a la fatiga de una mezcla asfáltica sometida a ensayos bajo deformación controlada no es claro. Algunos investigadores como Harvey y Tsai (1997) reportan que un incremento en la rigidez de mezclas asfálticas como producto del envejecimiento en laboratorio del ligante asfáltico no necesariamente reduce la vida de fatiga de mezclas, mientras que otros como Schmidt y Santucci (1969), Raad, Saboundjian y Minassian (2001) y Walubita *et al.* (2005) reportan lo contrario. A pesar de lo anterior, lo que sí se reporta con claridad en la literatura de referencia para los estudios de fatiga bajo deformación controlada es que un incremento en la rigidez redundaría en una disminución de la vida de fatiga de las mezclas. Por lo tanto, si una mezcla envejece, se rigidiza, disminuyendo su resistencia al fenómeno de fatiga por este efecto, y además esta disminución se acentúa debido a la tendencia de la mezcla a fragilizarse. El fenómeno expuesto es más apreciable a bajas temperaturas de servicio (Epps, 1969; Raad, Saboundjian y Minassian, 2001; Walubita *et al.*, 2005).

La figura 4a presenta los resultados de los ensayos de fatiga ejecutados sobre 360 muestras de concreto asfáltico tipo MDC-1, MDC-2 y MDC-3 tal como fueron descritos en la sección 2.2. Se observa una disminución del valor de  $\epsilon_{\max}$  (amplitud de la deformación para que el material falle cuando se

aplican  $N$  ciclos de carga) a medida que se incrementa el módulo resiliente de las mezclas  $E$ , lo que equivale a una disminución de la resistencia a la fatiga. Si los valores de  $\epsilon_{\max}$  se normalizan con respecto al esfuerzo  $\sigma$  aplicado a las muestras durante el ensayo de fatiga, se obtiene una mejor correlación entre este parámetro y la rigidez (ver figura 4b). Estos resultados pueden representarse matemáticamente por la ecuación 4, en la cual  $\epsilon_{\max}$  es adimensional y  $E$  se expresa en MPa. Se escogió esta ecuación teniendo en cuenta que, para un nivel muy pequeño de amplitud de deformación aplicado, el material puede soportar infinitas veces dicha amplitud sin que haya ruptura, según el concepto de límite de resistencia a la fatiga (Reyes, 2003). Un ejemplo reportado por Carpenter, Ghuzlan y Chen (2003) sugiere que con niveles de deformación bajos, entre  $100 \mu\text{m/m}$  y  $70 \mu\text{m/m}$ , las mezclas asfálticas en caliente presentan una vida infinita a la fatiga, pues argumentan que, sin importar la aplicación continua de carga, la mezcla es capaz de recuperarse cuando experimenta niveles de deformación bajos. Los valores de las variables de estado de la ecuación 4 fueron determinados por regresión:  $a = -2,15 \times 10^{-12}$ ,  $b = 0,0021$  y  $c = 1,45 \times 10^{-7}$ . Resultados similares a los encontrados en este estudio fueron presentados por Schmidt y Santucci (1969).

$$\frac{\epsilon_{\max}}{\sigma} = a + \frac{b}{E} + \frac{c}{E^{3/2}} \quad (4)$$

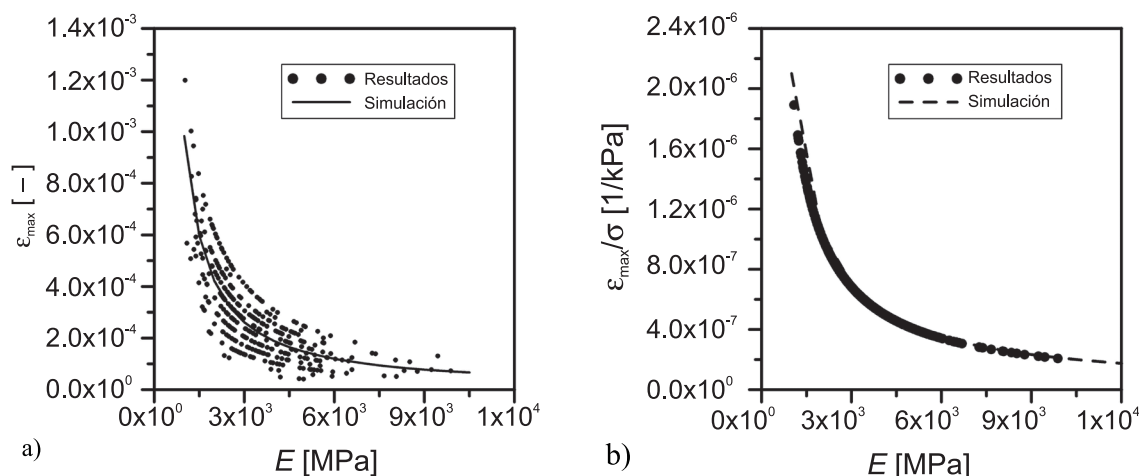


Figura 4. Evolución de a)  $\epsilon_{\max}$  y b)  $\epsilon_{\max}/\sigma$  con  $E$

Si las ecuaciones 3 y 4 se fusionan se obtiene, por medio de la ecuación 5, el cambio que expe-

rimenta  $\epsilon_{max}$  con la evolución de la rigidez de las mezclas sometidas al medio ambiente de Bogotá D.C.

$$\frac{\epsilon_{max}}{\sigma} = a + \frac{b}{\left[ \frac{k_1 \sqrt{T} F^2 + k_2 \sqrt{T} + k_3 F^2 + k_4}{\sqrt{T} F^2} \right] \left[ 1 + k_5 t^{\frac{3}{2}} \right]} + \frac{c}{\left[ \frac{k_1 \sqrt{T} F^2 + k_2 \sqrt{T} + k_3 F^2 + k_4}{\sqrt{T} F^2} \right] \left[ 1 + k_5 t^{\frac{3}{2}} \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

Una forma de evaluar la disminución de  $\epsilon_{max}$  ( $\Delta\epsilon_{max}$ ) debida al aumento de rigidez producto del envejecimiento de las mezclas sometidas a las condiciones reales del medio presentadas en la figura 3 es usando la ecuación 6.

$$\Delta\epsilon_{max} = \frac{\epsilon_{max}(t=0) - \epsilon_{max}(t=29)}{\epsilon_{max}(t=0)} \quad (6)$$

Empleando la ecuación (6) se puede predecir que la vida a la fatiga de la mezcla MDC-2 analizada disminuirá, en  $t=29$  meses, entre 55 a 64 % tan solo por el efecto de aumento de rigidez que experimenta cuando es sometida a las condiciones ambientales de Bogotá D.C. (ver figura 5).

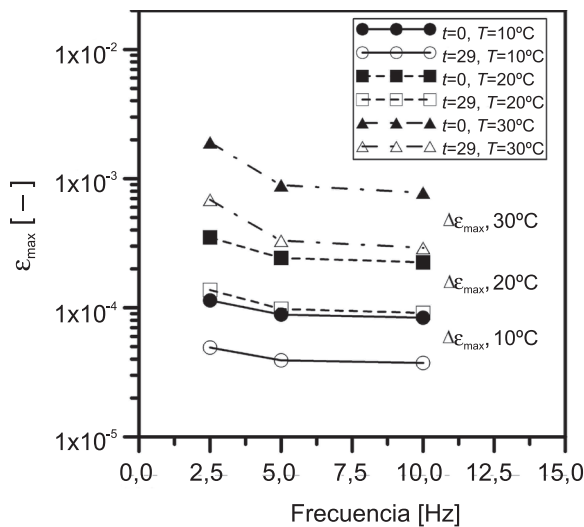


Figura 5. Disminución de  $\epsilon_{max}$  ( $\Delta\epsilon_{max}$ ) con la frecuencia de carga  $F$  y la temperatura  $T$

#### 4. 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 y la vida a la fatiga de una mezcla de concreto asfáltico tipo MDC-2 fabricada con cemento asfáltico tipo CA 80-100. De los resultados se concluye que el módulo resiliente de esta clase de mezcla se incrementa en 29 meses de exposición al medio ambiente entre 64 y 185 %, dependiendo de la temperatura y frecuencia del ensayo. Este aumento en rigidez genera una disminución aproximada de 55 a 64 % en la vida a la fatiga de la mezcla. Se espera que esta disminución sea mayor, ya que en el análisis no se tuvo en cuenta el cambio en la composición química del ligante resultante de su envejecimiento. Las ecuaciones 3, 4 y 5 son aplicables solamente para las condiciones ambientales de Bogotá D.C. y para el tipo de CA y mezcla analizados. Además dichas ecuaciones pueden ser utilizadas siempre y cuando el concreto asfáltico no experimente microfisuración térmica temprana (fatiga térmica) debido a la exposición de mezclas muy rígidas o frágiles en condiciones ambientales con bajas temperaturas medias anuales promedio.

#### AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Javeriana por la financiación del proyecto “Influencia del medio ambiente en el comportamiento de la mezcla MDC-2” (ID PPTA 00003053, ID PRY 002506) y a su laboratorio de ensayos.

#### 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, pp. 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, pp. 131-138.
- CEN –Comité Européen de Normalisation–. *Bituminous mixture test methods for hot mix asphalts – Part 25: Cyclic Compression Tests*. 2005.
- Di Benedetto, H. and De la Roche, C. *State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures*. RILEM Report No. 17. In: Francken (ed.). *Bituminous binders and mixes: State of the art and interlaboratory test on mechanical behavior and mix design*. London: E and FN Spon, , 2005, pp. 97-123.
- Di Benedetto, H.; De la Roche, C.; Baaj, H.; Pronk, A. and Lundstrom, R. (2004). "Fatigue of bituminous mixtures". *Material and Structures*, vol. 37, No. 3, pp. 202-216.
- Epps, J. A. *Influence of mixture variables on the flexural fatigue and tensile properties of asphalt concrete*. Ph. D. thesis (Engineering) U. of California, Berkeley, Calif., 1969, 185 p.
- Epps, J. A. and Monismith, C. L. *Fatigue of asphalt concrete mixtures – summary of existing information*. Fatigue of compacted bituminous aggregate mixtures, ASTM STP 508, American Society for Testing and Materials, MIR, USA, 1972, pp. 19-45.
- González, L. A. y Vásquez, S. E. *Fatiga en mezclas asfálticas: estado del conocimiento*. Trabajo de grado (Ingeniería Civil), Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C. 2009, 105 p.
- Harvey, J. and Tsai, B. W. (1997). "Long-term oven-aging effects on fatigue and initial stiffness of asphalt concrete". *Transportation Research Record (TRR): Journal of the Transportation Research Board*, No. 1590, pp. 89-98.
- INVIAS –Instituto Nacional de Vías–. *Especificaciones generales para construcción de carreteras*. Bogotá D.C., 2007a.
- INVIAS –Instituto Nacional de Vías–. *Normas de ensayos de materiales para carreteras*. Bogotá D.C., 2007b.
- Jemison, H. B.; Davison, R. R.; Glover, C. J. and Bullin, J. A. (1991). "Evaluation of standard oven tests for hot-mix plant aging". *Transportation Research Record (TRR): Journal of the Transportation Research Board*, No. 1323, pp. 77-84.
- Kemp, G. R. and Predoehl, N. H. (1981). "A comparison of field and laboratory environments on asphalt durability". *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 50, pp. 492-537.
- 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 (TRR): Journal of the Transportation Research Board*, No. 1115, pp. 101-112.
- MEPDG, ARA Inc, ERES Consultants Division. *Guide for the mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures*. NCHRP Project 1-37A Transportation Research Board. Washington D.C. Available in: [www.trb.org/mepdg/](http://www.trb.org/mepdg/). 2004. [Consulted on September 12, 2007].
- Migliori, F. and Corté, J. F. (1998). "Comparative study of RTFOT and PAV aging simulation laboratory tests". *Transportation Research Record (TRR): Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1638, pp. 56-63.
- Raad, L.; Saboundjian, S. and Minassian, G. (2001). "Field aging effects on fatigue of asphalt concrete and asphalt-rubber concrete". *Transportation Research Record (TRR): Journal of the Transportation Research Board*, No. 1767, pp. 126-134.
- Rao Tangella, R.; Craus, J.; Deacon, J. A. and Monismith, C. L. *Summary report on fatigue response of asphalt mixtures*. Report to Strategic Highway Research Program, Washington D. C., 1990, 147 p.
- Reyes, F. A. *Diseño racional de pavimentos*. 1ª. ed. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2003. 584 p.
- Said, S. F. (2005). "Aging effect on mechanical characteristics of bituminous mixtures". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1901, pp. 1-9.
- Schmidt, R. J. and Santucci, L. E. (1969). "The effect of asphalt properties on the fatigue cracking of asphalt concrete on the Zaca-Wigmoretest Project". *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 38, pp. 39-64.
- Shell International Petroleum Company. *Shell pavement design manual. Asphalt pavement and overlays for road traffic*. London, 1978, 344 p.
- The Asphalt Institute. *Research and development of the Asphalt Institutes thickness design manual*. 9<sup>th</sup> ed. Ed. College Park, MD, 1982, 204 p.
- Verhasselt, A. F. (1997). "Field ageing of bituminous binders: simulation and kinetic approach". In: Di Benedetto, H. and Francken, L. *Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium, Mechanical Tests for Bituminous Materials*, vol. 1, pp. 121-128. Lyon, France (14-16 May).
- Walubita, L. F.; Martin, A. E.; Jung, S. H.; Glover, C. J.; Park, E. S.; Chowdhury, A. and Lytton, R. L. *Comparison of fatigue analysis approaches for two hot mix asphalt concrete (HMAC) mixtures*. Report 0-4468-2, Project 0-4468: Evaluate the Fatigue Resistance of Rut Resistance Mixes, Texas Transportation Institute, 2005, 290 p.
- Welborn, J. Y. (1984). "Physical properties as related to asphalt durability: state of the art". *Transportation Research Record (TRR): Journal of the Transportation Research Board*, No. 999, pp. 31-36.