

# **Evaluación del efecto del envejecimiento del cemento asfáltico 80-100 en el horno de película delgada sobre el comportamiento estático y dinámico de mezclas asfálticas tipo MDC-2<sup>1</sup>**

**Evaluation of the Rolling Thin Film Oven Aging of the 80-100 Asphalt Cement in the Static and Dynamic Behavior of Asphalt Mixtures<sup>2</sup>**

**Avaliação do efeito de envelhecimento do cimento asfáltico 80-100 no forno de película fina sobre o comportamento estático e dinâmico de misturas asfálticas tipo MDC-2<sup>3</sup>**

SICI: 0123-2126(201212)16:2<379:EECAH>2.0.TX;2-5

*Hermes Ariel Vacca-Gómez<sup>4</sup>*

*María Patricia León-Neira<sup>5</sup>*

*Daniel Mauricio Ruiz-Valencia<sup>6</sup>*

<sup>1</sup> Fecha de recepción: 29 de marzo de 2011. Fecha de aceptación: 20 de enero de 2012. Este artículo se deriva del proyecto de investigación *Influencia del endurecimiento por oxidación del ligante asfáltico 80/100 en el comportamiento dinámico de mezclas asfálticas tipo MDC-2*, código 001949, desarrollado por el grupo de investigación Estructuras y Construcción, de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.

<sup>2</sup> Submitted on: March 29, 2011. Accepted on: January 20, 2012. This article is derived from the research project *Influence of asphalt binder 80/100 hardening by oxidation in the dynamic behavior of asphalt mixtures type MDC-2*, code 001949, developed by the research group *Structures and Construction of Pontificia Universidad Javeriana*, Bogota, Colombia

<sup>3</sup> Data de recebimento: 29 de março de 2011. Data de aceite: 20 de janeiro de 2012. Este artigo deriva-se do projeto de pesquisa *Influência do endurecimento por oxidação do ligante asfáltico 80/100 no comportamento dinâmico de misturas asfálticas tipo MDC-2*, código 001949, desenvolvido pelo grupo de pesquisa Estructuras e Construção, da Pontificia Universidade Javeriana. Bogotá, Colômbia.

<sup>4</sup> Ingeniero civil, Universidad La Gran Colombia, Bogotá, Colombia. Especialista en Geotecnia Vial y Pavimentos y Magíster en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Ingeniero del Laboratorio de Pruebas y Ensayos, profesor instructor e investigador del grupo Estructuras y Construcción, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: vacca@javeriana.edu.co.

<sup>5</sup> Ingeniera civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Ingeniera de calidad del Laboratorio de Pruebas y Ensayos, profesora instructora e investigadora del grupo Estructuras y Construcción, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: mpleon@javeriana.edu.co.

<sup>6</sup> Ingeniero civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Jefe del Laboratorio de Pruebas y Ensayos, profesor asociado e investigador del grupo Estructuras y Construcción, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: daniel.ruiz@javeriana.edu.co.

### Resumen

Este artículo presenta resultados de ensayos de laboratorio para evaluar el efecto del asfalto envejecido (corto plazo) en el desempeño estático y dinámico de mezclas asfálticas tipo MDC-2. Este envejecimiento ocurre durante el proceso de producción y colocación de mezclas asfálticas. Para ello se envejeció el cemento asfáltico 80-100 mediante el ensayo rotatorio de película delgada (*rolling thin film oven* [RTFO]) y se fabricaron especímenes de mezcla asfáltica para determinar sus propiedades mecánicas con ensayos estáticos y dinámicos. Se ensayaron dos mezclas, una fabricada con asfalto original y otra con asfalto envejecido. De acuerdo con los resultados, el comportamiento estático de ambas mezclas es diferente. La estabilidad de la mezcla con asfalto envejecido tuvo un incremento del 18% en comparación con la de asfalto original. El comportamiento dinámico de las dos mezclas fue diferente en los ensayos de módulo dinámico ante carga axial (diferencias del 10,5%) y en los ensayos de módulo resiliente por tensión indirecta (diferencias del 21%) para la misma frecuencia y temperatura. En el ensayo de deformación permanente por carga repetida, la mezcla con asfalto envejecido presentó una reducción del 34% en deformación respecto a la mezcla con asfalto original. En los ensayos de fatiga los resultados para ambas mezclas fueron similares.

### Palabras clave

Asfalto envejecido (RTFO), mezclas asfálticas, ensayos dinámicos y estáticos de laboratorio.

### Abstract

In this article we present the results of laboratory tests to evaluate the effect of the aged asphalt (short term) on the static and dynamic performance of asphalt mixtures type MDC-2. This aging is the one that occurs during the processes of production and construction of the asphalt mixture. The 80-100 asphalt was aged by the Rolling Thin Film Oven test (RTFO); the specimens of asphalt mixtures were made to determine their mechanical properties with static and dynamic tests. Mixtures made with original and aged asphalt were tested. In agreement with the results of the tests, the static behavior of both mixtures (original and aged) is different. The stability of the mixture with aged asphalt had an increase of 18% compared with the increase in the original asphalt. The dynamic behaviour of the two mixtures was different for the dynamic axial modulus tests (differences of 10,5%) and for the indirect tension resilient modulus test (differences of 21%) for the same frequency and temperature. In the test of permanent deformation of the asphalt mixture to repetitive axial loading the mixture made with aged asphalt had a lower permanent deformation (34%) compared with the original mixture. The results of the fatigue tests for both mixtures were similar.

### Key words

Aged asphalt (RTFO), asphalt mixtures, static and dynamic laboratory tests.

### Resumo

Este artigo apresenta resultados de ensaios de laboratório para avaliar o efeito do asfalto envelhecido (curto prazo) no desempenho estático e dinâmico de misturas asfálticas tipo MDC-2. Este envelhecimento ocorre durante o processo de produção e da colocação das misturas de asfalto. Para isso, cimento asfáltico 80-100 foi envelhecido por ensaio rotativo de película fina (*rolling thin film oven* [RTFO]) e foram fabricados espécimes de mistura asfáltica para determinar as suas propriedades mecânicas em ensaios estáticos e dinâmicos. Duas misturas foram ensaiadas, uma fabricada com asfalto original e outra com asfalto envelhecido. A estabilidade da mistura com asfalto envelhecido teve acréscimo de 18% em comparação com a de asfalto original. O comportamento dinâmico das duas misturas foi diferente nos ensaios de módulo dinâmico perante carga axial (diferença de 10,5%) e em ensaios de módulo resiliente por tensão indireta (diferenças de 21%) para a mesma frequência e temperatura. No teste de deformação permanente por cargas repetidas, a mistura de asfalto envelhecido apresentou uma redução de 34% em deformação no que diz respeito à mistura de asfalto original. Nos ensaios de fadiga os resultados foram semelhantes para ambas as misturas.

### Palavras-chave

Asfalto envelhecido (RTFO), misturas asfálticas, ensaios dinâmicos e estáticos de laboratório.

## Introducción

La oxidación del cemento asfáltico consiste en el cambio de su estructura molecular, creando moléculas polares de mayor tamaño (Husain y Anderson, 1994), con lo cual se alteran las propiedades reológicas del asfalto como el módulo ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ). La oxidación es el fenómeno en el cual el oxígeno actúa sobre los constituyentes más reactivos del asfalto y se manifiesta en este principalmente como endurecimiento, pérdida de la consistencia viscoelástica, fisuración y agrietamiento. Este proceso se genera en las diferentes etapas de la producción, la colocación y la vida útil de las mezclas asfálticas, debido a factores como presión, temperatura y tiempo.

El envejecimiento se asocia primariamente con la pérdida de los componentes volátiles y la oxidación del asfalto durante la fabricación de la mezcla asfáltica. Este factor genera un incremento en la viscosidad del asfalto con un endurecimiento de la mezcla (Airey, 2003). El ensayo rotatorio de película delgada, propuesto por Hveem *et al* (1963), fue desarrollado para evaluar el envejecimiento del asfalto a corto plazo.

En este ensayo se expone una película delgada de asfalto a calor y aire, de manera similar a lo sucedido durante el mezclado en caliente y la manipulación de la mezcla. Se han desarrollado investigaciones (Mallick y Brown, 2004; Montepara y Giuliani, 2000, entre otros) en la que se ha encontrado una correlación entre el comportamiento reológico de los asfaltos envejecidos utilizando el (*rolling thin film oven* [RTFO]) y el comportamiento de asfaltos extraídos de mezclas asfálticas recién elaboradas (efecto a corto plazo).

En las especificaciones actuales para clasificación de asfaltos mediante metodología *superior performing asphalt pavements* (Superpave), el potencial de ahuellamiento es verificado con una muestra de asfalto original y otra luego de realizar el envejecimiento en RTFO, mientras que el potencial de fisuración (debida a fatiga y a cambios térmicos) es corroborado mediante el envejecimiento por medio del *pressure aging vessel* (PAV).

Los estudios sugieren que el envejecimiento de asfaltos en el RTFO representa de manera cercana el envejecimiento generado durante el proceso de fabricación de las mezclas asfálticas.

Surge entonces la necesidad de estudiar las mezclas con asfalto envejecido elaboradas con materiales encontrados en el medio colombiano para evaluar la incidencia del asfalto envejecido en las propiedades estáticas y dinámicas de las mezclas asfálticas.

### 1. Evaluación del efecto del envejecimiento a corto plazo de mezclas asfálticas mediante ensayos de laboratorio

Para evaluar el efecto del envejecimiento en el RTFO del cemento asfáltico 80-100 en el comportamiento dinámico de mezclas asfálticas tipo MDC-2, se realizó un diseño de mezclas tipo Marshall de referencia, junto con la elaboración de muestras resultado del diseño. Se evaluaron las propiedades estáticas y dinámicas de la mezcla elaborada y luego se evaluó una mezcla asfáltica que conservó las dosificaciones del diseño original; en este caso el cemento asfáltico original fue reemplazado por asfalto envejecido en el RTFO (INV E 720, 2007).

A continuación se muestra tanto la caracterización física realizada a los materiales usados en la elaboración de las mezclas como la caracterización mecánica de las mezclas asfálticas fabricadas con el asfalto original y envejecido.

#### 1.1. Caracterización de los agregados pétreos

Los agregados empleados en este estudio se evaluaron de acuerdo con los requerimientos exigidos por las Especificaciones y Normas Técnicas del Instituto Nacional de Vías (Invías) (2007), según lo muestra la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de agregados

Característica	Unidad	Norma	Valor medido	Especificación	
				mínimo	máximo
Desgaste máquina de los ángeles (agregado grueso)	%	E-218	26	-	35
Desgaste microdeval	%	E-238	12,8	-	-
10% de finos	kN	E-224	241	-	-
Pérdidas en ensayo de solidez (sodio)	%	E-220	-	-	-
Agregado grueso	%	E-220	8,2	-	12
Agregado fino	%	E-220	5,2	-	12

Continúa

Característica	Unidad	Norma	Valor medido	Especificación	
				mínimo	máximo
Partículas fracturadas mecánicamente	%	E-227	73	60	-
Angularidad método A	%	E-239	45,2	35	-
Índice de aplanamiento	%	E-230	14	-	-
Índice de alargamiento	%	E-230	31	-	-
Partículas planas y alargadas	%	E-240	0,1	-	10
Índice de plasticidad	%	E-125 - 126	N.P.	N.P.	N.P.
Equivalente de arena	%	E-133	30,0	50,0	-
Azul de metileno	%	E-235	6	-	10

Fuente: Invías E 400 (2007)

Las propiedades medidas de los agregados combinados cumplen con las especificaciones del artículo 400 del Invías (2007), a excepción del valor del equivalente de arena. Con el fin de evaluar el potencial de daño que pueda generar la presencia de material fino, se realizó el ensayo de azul de metileno, encontrando un valor de 6, que es considerado como de excelente desempeño anticipado para mezclas asfálticas.

### 1.2. Caracterización del cemento asfáltico

El cemento asfáltico empleado corresponde a un CA 80-100, al cual se le realizaron los ensayos de caracterización indicados en la tabla 2.

Al comparar las propiedades del cemento asfáltico original con el envejecido en el horno rotatorio de película delgada, se observan cambios importantes en los valores de penetración, ductilidad, punto de ablandamiento y adherencia en bandeja, los cuales indican un aumento en la rigidez del asfalto. La variación de las propiedades se puede corroborar al realizar curvas reológicas tanto del cemento asfáltico original como del envejecido mediante el equipo de corte dinámico (*dynamic shear rheometer* [DSR]). Este equipo permite obtener el módulo de corte complejo ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) para diferentes temperaturas. El asfalto envejecido presenta una disminución de  $\delta$ , con su subsecuente aumento en la rigidez del material a una temperatura de 58 °C; este último valor se determina como la temperatura máxima de desempeño de acuerdo con el procedimiento para la clasificación de asfaltos por grado de desempeño (PG). El ángulo de fase del asfalto original fue de 87,35°, mientras que el del asfalto envejecido fue de 84,84°. El módulo complejo  $G^*$  presentó valores de 1625,3 Pa para el asfalto original, mientras que para el asfalto envejecido el valor de  $G^*$  fue de 3448 Pa, lo cual indica una relación modular de 2,12.

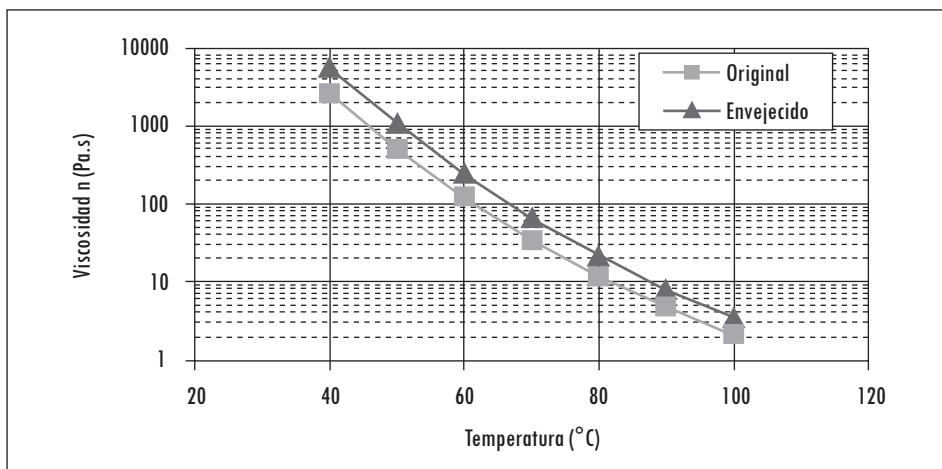
La figura 1 ilustra el aumento de la viscosidad del asfalto envejecido con respecto al original, medido con el DSR, en un intervalo de temperatura de 20 °C a 100 °C, donde este último valor es definido de acuerdo con la disminución de la viscosidad y la pérdida de contacto entre la muestra de asfalto y la geometría dispuesta en el reómetro.

**Tabla 2. Caracterización del cemento asfáltico**

Característica	Unidad	Norma	Valor medido		Especificación	
			Original	Envejecido	Mínimo	Máximo
Penetración 25°, 100 g, 5 s)	0,1 mm	E-706	87	55	80	1
Índice de penetración	-	E-724	0,86	1,02	-1	-
Ductilidad (25°, 5 cm/min)	cm	E-702	145	113	100	-
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland	°C	E-709	288	305	230	-
Punto de ablandamiento	%	E-712	53	58	-	0,2
Contenido de agua	%	E-704	0	-	-	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	100	-	99	-
Adherencia en bandeja	%	E-740	74,1	39,8	-	-
Pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (163°C, 75 minutos)	%	E-720		0,264		1,0
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento (E720) en % de la penetración original	%	E-706		63	48	-
Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento en película en movimiento (E-720)	°C	E-712		5	-	5

Fuente: Invías E 400 (2007)

Figura 1. Curva de viscosidad del asfalto original y envejecido evaluados en DSR



Fuente: presentación propia de los autores

### 1.3. Diseño de las mezclas asfálticas con asfalto original y envejecido

Los resultados obtenidos en el diseño se ilustran en la tabla 3.

Tabla 3. Caracterización de la mezcla asfáltica

Característica	Unidad	Norma	Diseño	Especificación
Contenido de asfalto	%	E-748	5,5	-
Temperatura de mezcla	°C	E-748	143-148	-
Temperatura de compactación	°C	E-748	134-138	-
Densidad bulk	g/cm <sup>3</sup>	E-733	2,264	-
Estabilidad	kg	E-748	1534	900 min.
Vacios con aire	%	E-736	5,8	4-6
Flujo	mm	E-748	3	2-3,5
Vacios en los agregados minerales	min	E-748	15	15 min.

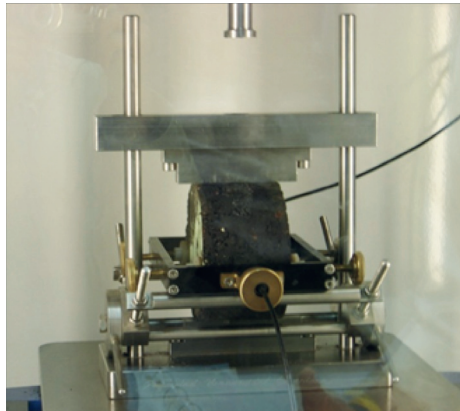
Fuente: Invías E a400 (2007)

En esta etapa se diseña y elabora la mezcla asfáltica empleada para obtener características ideales del comportamiento de esta. Además, se trabaja en el diseño de la mezcla tipo MDC 2 (Invías a400, 2007) preparada con asfalto CA80-100, la cual se obtiene según la metodología Marshall.

#### 1.4. Ensayos estáticos y dinámicos de las mezclas asfálticas

Se evaluaron las propiedades estáticas de las mezclas con asfalto original y con asfalto envejecido mediante el ensayo de estabilidad y flujo. Por su parte para la caracterización dinámica se adelantaron, en el Nottingham Asphalt Tester (NAT), los ensayos de módulo resiliente por tracción indirecta (Invías E749, 2007) (figura 2), fatiga por tracción indirecta (EN 12697-24, 2004) y resistencia a la deformación plástica bajo carga repetida (EN 12697-24 A, 2004). Mediante un equipo MTS® (actuador dinámico, marco y deformímetros) y una cámara de control de temperatura, se realizaron pruebas de módulo dinámico ante carga axial, según la norma Invías E 754 (2007).

Figura 2. Montaje de módulo por tracción indirecta. Nottingham Asphalt Tester



Fuente: Equipo del Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana

##### 1.4.1. Ensayo de estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas

En la tabla 4 se ilustra la variación de los parámetros de estabilidad, flujo y relación estabilidad-flujo, para tres briquetas elaboradas con asfalto sin envejecer y tres con asfalto envejecido.

Tabla 4. Valores de estabilidad, flujo y relación estabilidad/flujo

Briqueta	Sin envejecer			Envejecido		
	Estabilidad	Flujo	Estabilidad/flujo	Estabilidad	Flujo	Estabilidad/flujo
No	kg	mm	kg/mm	kg	mm	kg/mm
1	1259	3,18	397	1764	3,43	514

Continúa



Sin envejecer				Envejecido		
Briqueta	Estabilidad	Flujo	Estabilidad/flujo	Estabilidad	Flujo	Estabilidad/flujo
No	kg	mm	kg/mm	kg	mm	kg/mm
2	1286	2,79	461	1556	3,18	489
3	1354	3,12	434	1366	3,43	398
Promedio	1300	3	430	1562	3	467

Fuente: presentación propia de los autores.

Los resultados anteriores sugieren que la estabilidad, el flujo y la relación de rigidez de la mezcla con asfalto envejecido es significativamente mayor (al menos un 18%) que la mezcla con asfalto original.

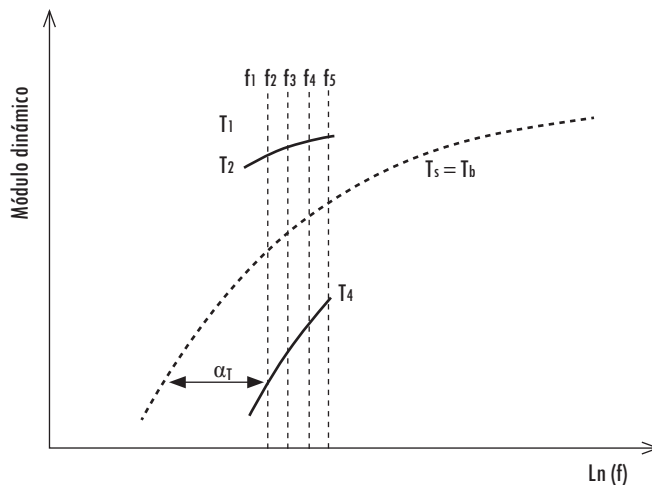
#### 1.4.2 Evaluación del módulo resiliente por tracción indirecta

Los ensayos de tensión indirecta se hicieron para tres temperaturas (10°C, 20°C y 30°C) y tres frecuencias de aplicación de carga (2,5 Hz, 5 Hz y 10 Hz) según la norma del Invías E 749. La obtención de la curva maestra de la mezcla asfáltica se construye con los valores de módulo obtenidos para las diferentes temperaturas y frecuencias relacionadas anteriormente, en el cual se modifican los resultados de escala de frecuencia, mediante un desarrollo matemático (figura 3), donde:

$X$  = Parámetro de reducción de la curva maestra.

$\alpha_T$  = Factor de modificación en función de la temperatura.

Figura 3. Determinación de la curva maestra



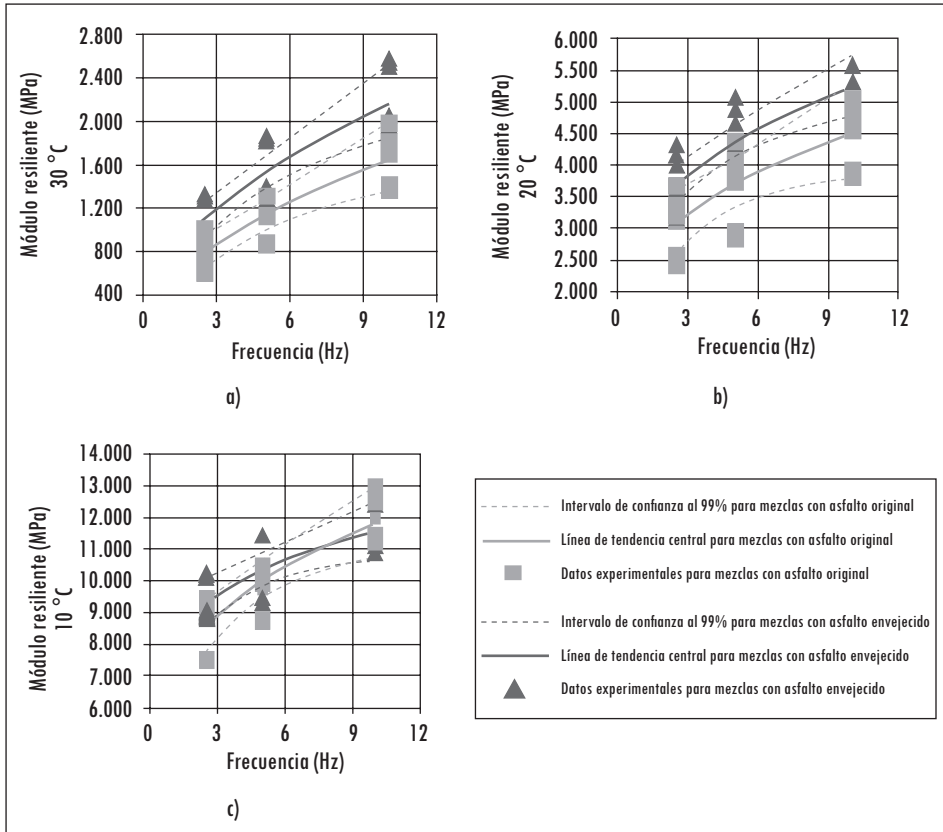
Fuente: Tavera (2002)

En total se ensayaron tres probetas de cada mezcla; para cada temperatura y cada frecuencia se realizaron dos mediciones de esfuerzo, de deformación unitaria y, por ende, de módulo resiliente. Los resultados de este ensayo se muestran en la figura 4. De acuerdo con lo anterior, para cada valor de frecuencia en cada una de las isoterms se tienen asociados seis datos de módulo dinámico; de esta manera, cada una de las líneas de tendencia para el módulo dinámico se graficó con dieciocho datos.

Los resultados obtenidos de módulo por tracción indirecta se ilustran en las figuras 4a, 4b y 4c. La dependencia de los resultados con respecto a la temperatura y a la frecuencia indica que los módulos se incrementan en la medida en que se disminuye la temperatura de ensayo y aumenta la frecuencia de aplicación de carga. En las mismas curvas se presentan los análisis de tendencia central para los datos de laboratorio, incluidas las curvas punteadas que representan los intervalos de confianza al 99% para dichas líneas de tendencia central.

Al analizar los resultados de módulo resiliente, se observa que, en promedio, para todo el rango de frecuencias los módulos de la mezcla elaborada con asfalto envejecido son superiores a los de la mezcla con asfalto original. No obstante la luz de los resultados experimentales, los intervalos de confianza de ambas mezclas (la elaborada con asfalto original y la elaborada con asfalto envejecido) se traslapan en casi todo el rango de frecuencias para una temperatura de 10 °C. Esto implica que no es posible afirmar que para esta temperatura la mezcla envejecida tenga un módulo resiliente superior al de la mezcla original. Sin embargo, no ocurre lo mismo para las otras dos temperaturas (20 °C y 30 °C) y en especial para módulos resilientes inferiores a 4500 MPa, ya que la evidencia estadística y los intervalos de confianza indican que con una probabilidad superior al 95% es posible afirmar que el módulo resiliente de la mezcla envejecida es superior al de la mezcla con asfalto original. Si se acepta esta evidencia estadística, se pueden llegar a presentar diferencias en el módulo resiliente de la mezcla con asfalto envejecido y la mezcla con asfalto original hasta del 21% para la misma temperatura y la misma frecuencia (30 °C y 10 Hz).

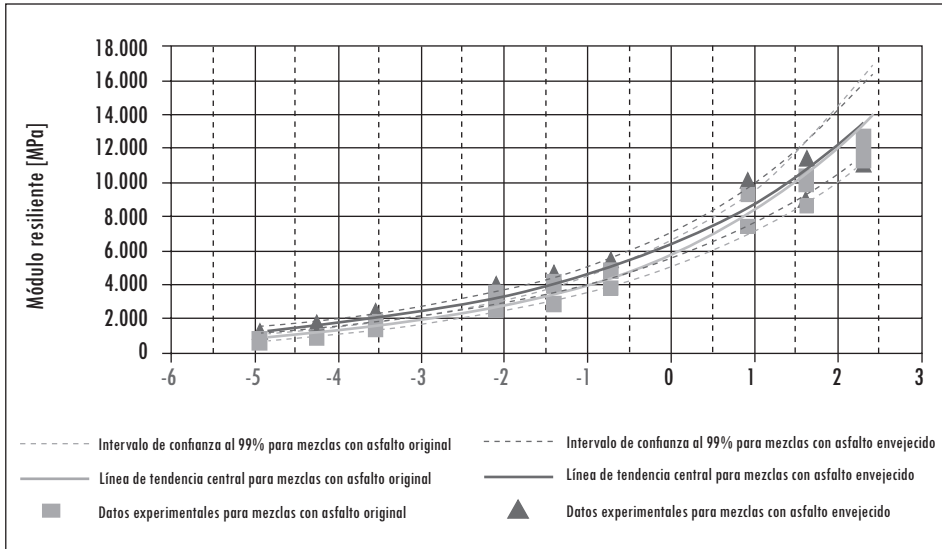
Figura 4. Módulo resiliente (tensión indirecta) de mezclas con asfalto envejecido y original a una temperatura de a) 30°C b) 20°C y c) 10°C.



Fuente: presentación propia de los autores.

Al construir la curva maestra (que se grafica en la figura 5) y al realizar un análisis con base en los intervalos de confianza al 99%, se puede llegar a la misma conclusión de párrafos anteriores. Estas observaciones se fundamentan en que para menos de 4500 MPa los intervalos de confianza asociados a las líneas de tendencia central no se traslapan.

**Figura 5. Curva maestra para módulo resiliente por tracción indirecta con asfalto original y envejecido**

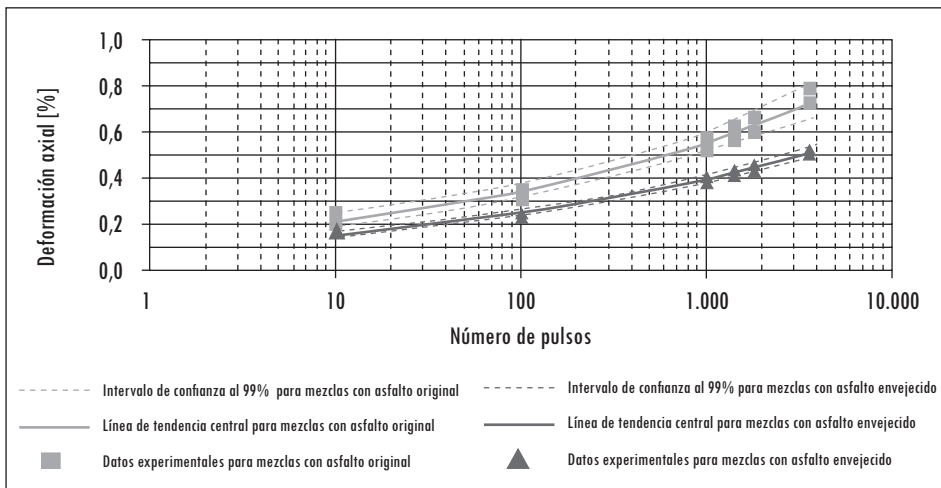


Fuente: presentación propia de los autores.

### 1.4.3 Evaluación de la deformación permanente

En la figura 6 se ilustra la deformación de las mezclas asfálticas evaluadas bajo la acción de un esfuerzo cíclico a una temperatura de 40 °C, induciendo la deformación de la mezcla (norma EN 12697-24 A).

Figura 6. Evaluación de la deformación permanente



Fuente: presentación propia de los autores.

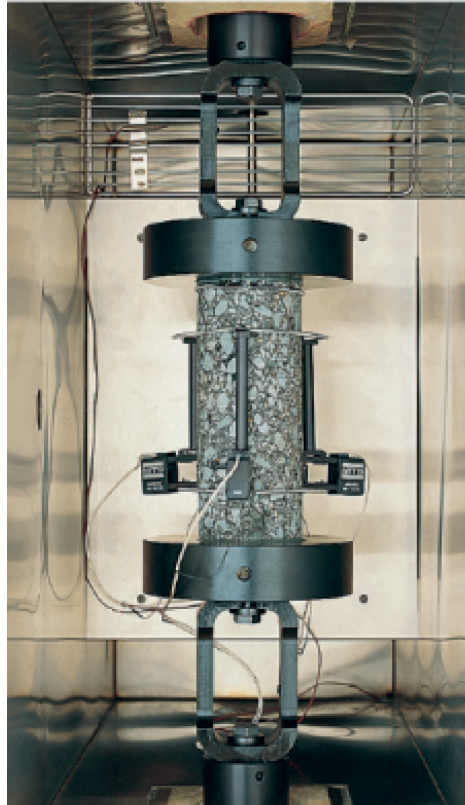
En la curva de la mezcla envejecida se identifica una disminución de la deformación permanente respecto a la de la mezcla con asfalto original (66%). Así mismo, al analizar los intervalos de confianza —considerando que nunca se traslapan—, se puede afirmar que para todo el rango de pulsos aplicados la deformación permanente de la mezcla envejecida es siempre menor que la de la mezcla con asfalto original.

Sin embargo, ninguna de las dos mezclas supera el límite de deformación de 1% establecido en las especificaciones del Instituto Nacional de Vías de Colombia. Al analizar los intervalos con un nivel de confianza del 99% para las líneas de tendencia central del ensayo de deformación permanentes, es notable que las probetas envejecidas tengan menos dispersión en los resultados que las probetas elaboradas con asfalto sin envejecer.

#### 1.4.4 Módulo dinámico para carga axial

En la figura 7 se presenta el montaje para los ensayos dinámicos ante carga axial (norma Invías E 754), el cual se realizó para tres temperaturas (10 °C, 20 °C y 30 °C) y tres frecuencias de aplicación de carga (2,5 Hz, 5 Hz y 10 Hz). Los resultados de este ensayo se muestran en la figura 8. En total se ensayaron tres probetas de cada mezcla, y para cada temperatura y cada frecuencia se reportan tres mediciones promedio de módulo dinámico.

Figura 7. Montaje de ensayo de módulo dinámico



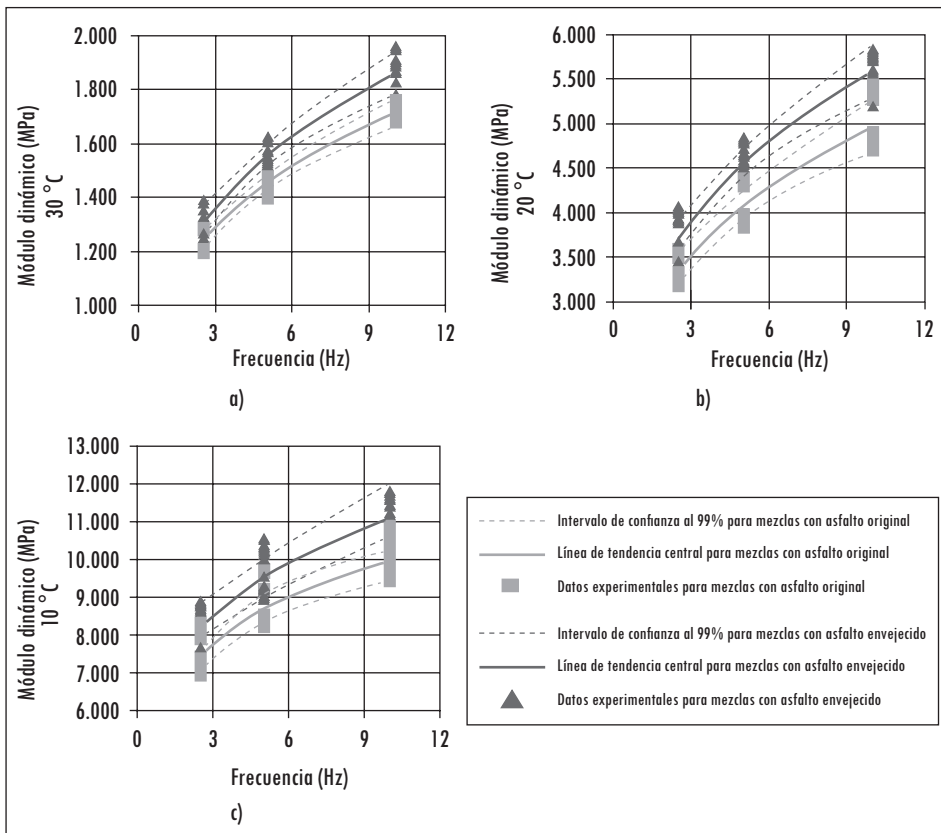
Fuente: presentación propia de los autores.

A cada briqueta ensayada se le tomaron ocho mediciones de módulo dinámico para cada temperatura y frecuencia. De acuerdo con lo anterior, para cada valor de frecuencia en cada una de las isothermas se tienen asociados 24 datos de módulo dinámico; de esta manera cada una de las líneas de tendencia para el módulo dinámico se graficaron con 72 datos.

La dependencia de los resultados de módulo dinámico respecto a la temperatura y a la frecuencia es la esperada; es decir, los módulos se incrementan en la medida en que se disminuye la temperatura de ensayo y se incrementa la frecuencia de aplicación de carga. A diferencia de los resultados de módulo resiliente presentados atrás, la evidencia estadística y los intervalos de confianza permiten afirmar que el módulo dinámico de la mezcla asfáltica con asfalto envejecido es superior al módulo dinámico de la mezcla elaborada con asfalto original, ya que los intervalos de confianza no se traslapan para todos los rangos de frecuencia y

temperatura analizados. Si se acepta esta evidencia estadística, se pueden llegar a presentar diferencias entre el módulo dinámico para cargas axiales de la mezcla con asfalto envejecido y la mezcla con asfalto original hasta del 10,5% para la misma temperatura y la misma frecuencia (30 °C y 10 Hz, y 20 °C 10 Hz).

Figura 8. Módulo dinámico (carga axial) de mezclas con asfalto envejecido y original a una temperatura de a) 30 °C, b) 20 °C y c) 10 °C



Fuente: presentación propia de los autores.

Por otro lado, vale la pena anotar que al comparar el módulo resiliente y el módulo dinámico para la misma frecuencia y misma temperatura, se aprecian diferencias entre el módulo por tensión indirecta y el módulo por carga axial, lo cual se explica por la naturaleza de ambos ensayos.

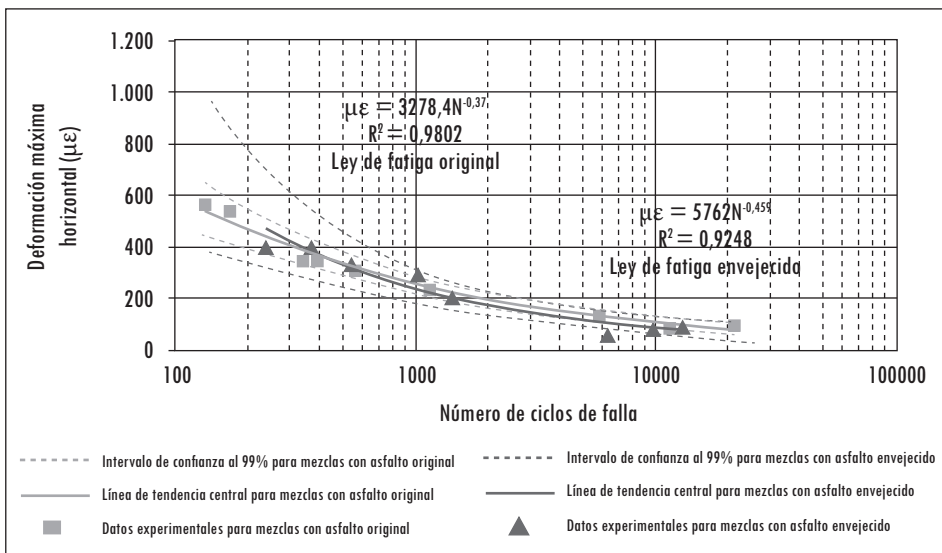
### 1.4.5 Evaluación de la ley de fatiga

El ensayo de fatiga en el laboratorio se realiza a una temperatura de 20 °C y a una frecuencia de 2,5 Hz. Este ensayo aplica ciclos de carga y descarga de manera progresiva, modificando en este proceso las condiciones estructurales de la mezcla debido a las tensiones y deformaciones en las probetas ensayadas. En la figura 9 se muestran las leyes de fatiga de las mezclas con cemento asfáltico envejecido y sin envejecer. La curva de fatiga es lineal en escala logarítmica (Log (e)) y es función lineal del logaritmo del número de ciclos (N), donde se tiene que:

$$\epsilon = AN^{-b} \tag{1}$$

Teniendo en cuenta los valores del parámetro *b*) observados en la figura 10 para el asfalto original y envejecido son de -0,370 y -0,459, respectivamente, se deduce que el asfalto envejecido tiene una tendencia a disminuir su vida de fatiga. Sin embargo, al analizar estadísticamente estas curvas y al comparar los intervalos de confianza de las curvas de regresión, no se puede establecer una variación entre las leyes de fatiga de las mezclas evaluadas.

Figura 9. Curva de fatiga para las mezclas con asfalto original y envejecido



Fuente: presentación propia de los autores.



## Conclusiones

- Al medir las propiedades reológicas de los asfaltos, se observa el aumento del módulo de corte  $G^*$  en el asfalto envejecido y la disminución del ángulo de fase  $\delta$ . El ángulo de fase del asfalto original fue de  $87,35^\circ$ , mientras que el del asfalto envejecido fue de  $84,84^\circ$ . El módulo complejo  $G^*$  presentó valores de 1625,3 Pa para el asfalto original y de 3448 Pa para el asfalto envejecido, con una relación modular de 2,12.
- La estabilidad de la mezcla con asfalto original es el 82% de la estabilidad de la mezcla con asfalto envejecido y la relación estabilidad-flujo presenta un incremento para las mezclas fabricadas con el asfalto envejecido del 8% respecto a las fabricadas con el asfalto sin envejecer.
- La rigidez de la mezcla asfáltica envejecida presenta similitud con la mezcla asfáltica original en los valores de módulo resiliente para temperaturas bajas y frecuencias de aplicación altas. Los módulos resilientes a  $20^\circ\text{C}$  y  $30^\circ\text{C}$  presentan incrementos de hasta el 21%, y es más rígida la mezcla con asfalto envejecido.
- El módulo dinámico para cargas axiales de la mezcla con asfalto envejecido puede llegar a ser hasta un 10,5% superior al módulo de la mezcla con asfalto original para la misma temperatura y la misma frecuencia.
- La deformación permanente de la mezcla con asfalto envejecido es el 66% de la deformación permanente de la mezcla con asfalto original.
- Los análisis estadísticos indican que no se puede establecer una diferencia entre la vida de fatiga de la mezcla con asfalto original y la envejecida.
- Los resultados de las variaciones entre la mezcla asfáltica original y la envejecida deben ser tenidos en cuenta al seleccionar los parámetros de módulo y fatiga requeridos en los diseños de pavimentos, con el fin de que sean tenidas en cuenta en las propiedades mecánicas del material, debido al proceso de mezclado, colocación y compactación de la mezcla en obra.

## Referencias

- AIREY, G. State of the art report on Ageing test methods for bituminous pavement Materials. *The international Journal of Pavement Engineering*. 2003, vol. 4, núm. 3 pp. 165-176.
- BSI (National Standards Body of the UK). *BS EN 12697-24:2004. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Fatigue*. Londres: BSI, 2004.
- BSI (National Standards Body of the UK). *BS EN12697 A. Uniaxial cyclic compression test*. Londres: BSI, 2004.
- HUSAIN, U. y ANDERSON, D. *The pressure Aging Vessel PAV: A test to simulate rheological changes due to field aging*. American Society of testing Materials, 1994.

- HVEEM, F. N.; ZUBE, E. y KOG, J.S Proposed new test and specifications for paving grade asphalt. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologist*. 1963, vol. 32, pp. 271-327.
- INVÍAS-Instituto Nacional de Vías. *Normas de ensayos de materiales para carreteras*. Bogotá: Invías, 2007, vols. 1 y 2.
- MALLICK, R. y BROWN, E. An evaluation of superpave binder aging methods. *The international Journal of Pavement Engineering*. 2004, vol. 5, núm. 1, pp 9-18.
- MONTEPARA, A. y GIULIANI, F. *Comparison between ageing simulation test of road bitumen*. Proc. 2<sup>nd</sup> Eurasphalt and Eurobitume Congress. Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures. Barcelona, 2000. pp. 398-405.
- TAVERA, A. *Manual de instalación, operación, mantenimiento y montaje de los ensayos para el equipo NAT*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2002.