

Predicción de resistencia bajo carga monotónica de una mezcla asfáltica sometida a condiciones ambientales de Bogotá

Monotonic Strength Prediction of an Asphalt Mixture under Environmental Conditions in Bogotá D.C.

HUGO ALEXANDER RONDÓN QUINTANA*

CARLOS FELIPE URAZÁN BONELLS**

ÉDGAR HUMBERTO SÁNCHEZ COTTE***

RESUMEN

Las principales causas del deterioro de mezclas asfálticas en una estructura de pavimento flexible son originadas por las cargas impuestas por el tránsito y los agentes ambientales. Cuantificar la influencia que tiene el ambiente sobre el comportamiento de este tipo de material es complejo debido a que en campo, una mezcla asfáltica cambia sus propiedades principalmente por el efecto que causan el agua, el aire, los cambios de temperatura o la combinación aire-agua-temperatura. En este artículo se presenta una metodología de ensayo acelerado para intentar predecir el efecto que ocasionan las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá D.C. sobre la resistencia mecánica bajo carga monotónica en tracción indirecta de una mezcla de concreto asfáltico tipo MDC-2. Esta metodología debe ser considerada como una primera aproximación. Los resultados reportados en este artículo motivan a continuar con otras fases del proyecto a fin de sustentar en un futuro una metodología más precisa y adecuada para predecir el comportamiento que experimentan mezclas asfálticas sometidas a condiciones reales del medioambiente.

Palabras clave: metodología, mezclas asfálticas, envejecimiento, condiciones ambientales.

ABSTRACT

The main causes of deterioration of flexible pavement mixture' structure are the result of the load imposed by traffic and environmental agents. Quantifying the environment's influence on the behavior shown in this type of material is a complex thing to do because, at the real conditions, asphalt mixture properties mostly change due

FECHA DE ENVÍO: 4 DE AGOSTO DE 2010 • FECHA DE ACEPTACIÓN: 29 DE OCTUBRE DE 2010

*Ingeniero Civil, Universidad Francisco de Paula Santander; Magíster, Ingeniería Civil y Doctor en Ingeniería, Universidad de Los Andes. Consultor e Interventor obras civiles; Auxiliar de Investigaciones CITEC, Universidad de Los Andes; Docente Universidad Católica de Colombia, Piloto de Colombia y Distrital Francisco de José Caldas; y posgrado, Pontificia Universidad Javeriana y UDFJC. Filiación actual: Programa Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle (Grupo Indetec). Áreas de investigación: materiales granulares, asfaltos modificados, uso de materiales alternativos y ecuaciones constitutivas. Correo electrónico: harondon@unisalle.edu.co.

**Ingeniero Civil y Especialista Administración de Obras de Construcción, Universidad Francisco de Paula Santander. Doctor Gestión Territorio e Infraestructuras Transporte, Universidad Politécnica de Cataluña. Profesor e Investigador, Programa Ingeniería Civil, Universidad de La Salle (Grupo Indetec). Correo electrónico: caurazan@unisalle.edu.co.

***Ingeniero Civil, Universidad Minuto de Dios y Magíster Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes. Profesor e Investigador, Programa Ingeniería Civil, Universidad de La Salle (Grupo Indetec). Correo electrónico: ehsanchez@unisalle.edu.co.

to the effect of water, air, temperature changes or a combination of air-water-temperature. This paper presents an accelerated test method to try and predict the effect that environmental conditions in Bogotá D.C. have over mechanical strength when submitted to monotonic load at an indirect test of tension of an asphalt concrete mix, type MDC-2. This methodology must be considered as a first approximation. The results reported in this paper are an encouragement to continue with the other phases of the project in order to sustain a more accurate and proper methodology to predict the behavior of asphalt mixtures submitted to real environment conditions in the future.

Keywords: methodology, asphalt mixture, aging, environmental conditions.

Introducción

Los principales factores que afectan la durabilidad de las mezclas asfálticas, suponiendo que se encuentran bien construidas son: la edad 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 medioambiente. Cuantificar la influencia que tiene el ambiente sobre el comportamiento de este tipo de material no es tarea fácil ya que en campo, una mezcla asfáltica cambia sus propiedades principalmente por el efecto que causan el agua, el aire, los cambios de temperatura o la combinación aire-agua-temperatura. Simular en el laboratorio estas condiciones es complejo. La forma como se realiza actualmente consiste en separar cada uno de los componentes que lo conforman (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 & Predoehl, 1981; Welborn, 1984; Kim et ál., 1987; Shiau et ál., 1991; Bishara et ál., 2000; Bocci & Cerni, 2000; Brown & Scholz, 2000; Khalid & Walsh, 2000; Khalid, 2002; Airey, 2003; Said, 2005; Shen et ál., 2006). Adicionalmente, por lo general estos estudios utilizan ensayos y equipos (por ejemplo, hornos para ensayo de película delgada del tipo TFOT o rotatorios RTFOT, microondas, vasijas de envejecimiento de asfalto 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 (Jemison et ál., 1991; Choquet & Verhasselt, 1992; Kuppens et ál., 1997; Verhasselt, 1997). 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 ál., 1991; Migliori & Corté, 1998; Montepara, 1999; Montepara & Giuliani, 2000; Airey, 2003).

En conclusión general, se reporta que estas metodologías de ensayo tienen como limitación principal que son incapaces aun 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 muy 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 lo expuesto, en este estudio se presenta una primera aproximación para generar a futuro una metodología de ensayo acelerado que permita predecir el fenómeno de envejecimiento de mezclas asfálticas *in situ*. Para tal fin se ejecutaron dos etapas en el presente estudio:

1. Descripción etapa 1. Mezclas del tipo MDC-2 fueron sometidas a solicitaciones reales de temperatura, precipitación, rayos ultravioletas, aire, etc. durante 30 meses con el fin de conocer el cambio que experimentan en la resistencia bajo carga monotónica en tracción indirecta. Se optó por utilizar 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. Las mezclas fueron fabricadas con tres tipos de cemento asfáltico diferentes (CA 80-100, CA 60-70 y CA 20-40). Las mezclas con CA 80-100 y CA 60-70 fueron sometidas a los 30 meses de estudio, mientras que las mezclas con CA 20-40 fueron sometidas tan solo a 18 meses. La diferencia en los tiempos de evaluación radica en que inicialmente el estudio se proyectó para valorar los dos tipos de CA producidos en Colombia (CA 80-100, CA 60-70) y nueve meses después se identificó la necesidad de valorar adicionalmente un cemento asfáltico modificado (CA 20-40) que presentara una consistencia similar al CA 60-70, con el fin de comparar los resultados que se habían obteniendo con este tipo de asfalto a la fecha, los cuales no tenían una tendencia y significado físico claramente definido.
2. Descripción etapa 2. En campo, el medioambiente genera dos fenómenos que están ocurriendo en las mezclas simultáneamente:
 - a. Envejecimiento por oxidación que experimenta el cemento asfáltico y, por tanto, las mezclas, cuando es solicitado a diferentes gradientes de temperatura y exposición a radiación ultravioleta (UV) (Vargas et ál., 2008). Este

fenómeno genera un aumento en la rigidez acompañado con disminución de la ductibilidad de las mezclas (Rondón & Reyes, 2009).

- b. El agua en las mezclas produce pérdida de adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto, lo cual genera disminución en su resistencia mecánica (Majidzadeh & Brovold, 1968; Lottman & Johnson, 1971; Peterson, 1982; Stuart, 1986; Kandhal et ál., 1989; Mohamed, 1993; Amirkhanian & Williams, 1993; Williams & Miknis, 1998; Bagampadde et ál., 2005; Mallick et ál., 2005; Lu & Harvey 2006, 2006a, Caro et ál., 2008; Kanitpong & Bahia, 2008; Kringos et ál., 2008, 2008a; Mohammad et ál., 2008; Kassem et ál., 2009).

Para acelerar el efecto del proceso de oxidación (envejecimiento) de ligantes asfálticos, en este estudio los CA 80-100, 60-70 y 20-40 inicialmente fueron sometidos a temperatura de 170 °C durante 30, 60 y 120 minutos (fase 1). Con estos ligantes envejecidos fueron fabricadas mezclas del tipo MDC-2, las cuales —a su vez— fueron sumergidas en agua durante seis meses para evaluar el efecto de la humedad (fase 2).

Los resultados de las etapas 1 y 2 del proyecto fueron comparados con el fin de obtener si este método propuesto de ensayo predice de alguna forma el comportamiento que experimentan mezclas MDC-2 sometidas a condiciones reales del medioambiente de Bogotá.

Metodología

Caracterización de materiales

El agregado pétreo empleado para la elaboración de las mezclas asfálticas para el ensayo Marshall (llamadas briquetas) es procedente de la cantera Subachoque (Cundinamarca, Colombia). A estos materiales se le realizaron los siguientes ensayos, de acuerdo con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (Invias, 2007a): 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 $\frac{3}{4}$ " por medio de la máquina de Los Ángeles (INV. E-218),

desgaste microdeval (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 1 y se observa que los valores cumplen con los requisitos mínimos de calidad exigidos por las especificaciones Invias (2007) para fabricar mezclas tipo MDC-2 para capas de rodadura.

Tabla 1. Caracterización de los agregados

| ENSAYO | VALOR |
|--|-------|
| Peso específico | 2,56 |
| Equivalente de arena (%) | 86,0 |
| Caras fracturadas (%) | 92,0 |
| Índice de alargamiento (%) | 10,0 |
| Índice de aplanamiento (%) | 10,0 |
| Ataque en sulfato de sodio (%) | 12,4 |
| Microdeval (sin saturar) (%) | 20,3 |
| Resistencia al desgaste de la máquina de los Ángeles (%) | 22,5 |

Fuente: los autores.

A los cementos asfálticos no modificados se les realizaron los ensayos típicos que exige la especificación Invias (2007) para caracterizarlos, como son: penetración, viscosidad absoluta, ductilidad, solubilidad en tricloroetileno, contenido de agua, punto de ablandamiento y ensayos al residuo luego del ensayo de película delgada en horno rotatorio (RTFOT, por sus siglas en inglés). Al cemento asfáltico modificado adicionalmente se le realizó el ensayo de recuperación elástica por torsión. Los resultados de estos ensayos se presentan en las tablas 2-4.

Tabla 2. Características generales del cemento asfáltico CA 80-100

| ENSAYO | MÉTODO | UNIDAD | CA 80-100 | RESULTADO |
|--|-------------|--------|-----------|-----------|
| ENSAYOS SOBRE EL ASFALTO ORIGINAL | | | | |
| 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 |

| ENSAYO | MÉTODO | UNIDAD | CA 80-100 | RESULTADO |
|--------------------------------|-------------|--------|-----------|-----------|
| 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 |

ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO LUEGO DEL RTFOT

| | | | | |
|---------------------------------|-------------|---|----------|-----|
| Pérdida de masa | ASTM D-2872 | % | 1,0 máx. | 0,2 |
| Penetración (25 °C, 100 g, 5 s) | ASTM D-5 | % | 48 mín. | 65 |

Fuente: los autores.

Tabla 3. Características generales del cemento asfáltico CA 60-70

| ENSAYO | MÉTODO | UNIDAD | CA 60-70 | RESULTADO |
|--------|--------|--------|----------|-----------|
|--------|--------|--------|----------|-----------|

ENSAYOS SOBRE EL ASFALTO ORIGINAL

| | | | | |
|---------------------------------|-------------|--------|-----------|------|
| Penetración (25 °C, 100 g, 5 s) | ASTM D-5 | 0,1 mm | 60-70 | 67 |
| Índice de penetración | INV.E-724 | - | -1/+1 | -0,7 |
| Viscosidad absoluta (60 °C) | ASTM D-4402 | Poises | 1500 mín. | 1750 |
| 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. | 275 |

ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO LUEGO DEL RTFOT

| | | | | |
|---------------------------------|-------------|--------|------------|------|
| Pérdida de masa | ASTM D-2872 | % | 1.0 máx. | 0.4 |
| Viscosidad absoluta (60 °C) | ASTM D-4402 | Poises | 10000 máx. | 5200 |
| Índice de durabilidad | - | - | 3 máx. | <3 |
| Penetración (25 °C, 100 g, 5 s) | ASTM D-5 | % | 52 mín. | 70 |

Fuente: los autores.

Tabla 4. Características generales del cemento asfáltico CA 20-40

| ENSAYO | MÉTODO | UNIDAD | CA 20-40 | RESULTADO |
|--------|--------|--------|----------|-----------|
|--------|--------|--------|----------|-----------|

ENSAYOS SOBRE EL ASFALTO ORIGINAL

| | | | | |
|---|-----------|--------|---------|----|
| Penetración (25 °C, 100 g, 5 s) | ASTM D-5 | 0,1 mm | 20-40 | 37 |
| Punto de ablandamiento (R&B) | ASTM D-36 | °C | 60 mín. | 74 |
| Recuperación elástica por torsión a 25 °C | NLT-329 | % | 10 mín. | 35 |

| ENSAYO | MÉTODO | UNIDAD | CA 20-40 | RESULTADO |
|--|-------------|--------|----------|-----------|
| Punto de inflamación COC | ASTM D-92 | °C | 230 mín. | 300 |
| ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO LUEGO DEL RTFOT | | | | |
| Pérdida de masa | ASTM D-2872 | % | 1,0 máx. | 0,2 |
| Penetración (25 °C, 100 g, 5 s) | ASTM D-5 | % | 70 mín. | 76 |

Fuente: los autores.

Diseño de mezclas asfálticas con la metodología Marshall

Luego de realizar los ensayos al agregado pétreo y a los cementos asfálticos, se fabricaron cinco briquetas (compactadas a 75 golpes por cara) para cada porcentaje de asfalto entre 4,5 y 6,5% con el fin de realizar el diseño Marshall (INV.E-748, Invias, 2007a) para determinar el contenido óptimo de asfalto de las mezclas asfálticas. 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. Los cálculos obtenidos del ensayo Marshall para las briquetas elaboradas con asfalto convencional CA 80-100, CA 60-70 y CA 20-40 están registrados en las tablas 5-7, respectivamente.

Los porcentaje óptimos de cemento asfáltico de acuerdo con los datos de las tablas 5-7 son 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. En estos porcentajes se están cumpliendo los requisitos mínimos exigidos por la especificación Invias (2007) para MDC-2 y tránsitos tipo NT1 o NT2.

Tabla 5. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica MDC-2 con CA 80-100

| CA [%] | PESO UNITARIO [G/CM ³] | ESTABILIDAD (E) [KG] | VACÍOS EN LA MEZCLA [%] | VACÍOS 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 |

Fuente: los autores.

Tabla 6. Resumen ensayo Marshall para mezcla asfáltica MDC-2 con CA 60-70

| CA [%] | PESO UNITARIO [G/CM ³] | ESTABILIDAD (E) [KG] | VACÍOS EN LA MEZCLA [%] | VACÍOS EN AGREGADOS [%] | FLUJO (F) [MM] | RELACIÓN E/F [KG/MM] |
|--------|------------------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|----------------------|
| 5,0 | 2,24 | 1189 | 5,83 | 16,95 | 3,40 | 349,86 |
| 5,5 | 2,25 | 1323 | 4,47 | 16,80 | 3,60 | 367,84 |
| 6,0 | 2,25 | 1393 | 3,48 | 16,96 | 3,69 | 377,18 |
| 6,5 | 2,26 | 1229 | 3,02 | 17,60 | 3,92 | 313,38 |

Fuente: los autores.

Tabla 7. Resumen ensayo Marshall para mezcla asfáltica MDC-2 con CA 20-40

| CA [%] | PESO UNITARIO [G/CM ³] | ESTABILIDAD (E) [KG] | VACÍOS EN LA MEZCLA [%] | VACÍOS EN AGREGADOS [%] | FLUJO (F) [MM] | RELACIÓN E/F [KG/MM] |
|--------|------------------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|----------------------|
| 5,0 | 2,28 | 1398 | 4,28 | 15,51 | 3,67 | 380,93 |
| 5,5 | 2,30 | 1492 | 2,53 | 15,01 | 3,74 | 398,93 |
| 6,0 | 2,32 | 1507 | 0,92 | 14,67 | 4,00 | 376,75 |
| 6,5 | 2,29 | 1431 | 1,70 | 16,38 | 4,38 | 326,71 |

Fuente: los autores.

Ensayos para evaluar el objetivo del proyecto

Luego de conocer los contenidos óptimos de CA y agregado pétreo para fabricar las mezclas asfálticas se elaboraron 180 briquetas del tipo MDC-2 (por tipo de CA) para exponerlas al ambiente de Bogotá. Estas muestras fueron colocadas en el techo de un edificio de la ciudad. Las muestras que recibieron de manera directa la influencia del ambiente fueron ensayadas aproximadamente cada tres meses durante los primeros 30 meses del proyecto para el caso de las mezclas fabricadas con los CA 80-100 y CA 60-70, y 18 meses para aquellas que emplearon el CA modificado (CA 20-40). El parámetro que se evaluó en el estudio fue la resistencia mecánica bajo carga monotónica en tracción indirecta mediante el ensayo Marshall. Con los resultados de esta primera etapa del proyecto se evaluó la evolución en el tiempo de la resistencia mecánica de las mezclas cuando son sometidas a las condiciones ambientales de Bogotá.

Con el fin de intentar predecir el cambio en la resistencia mecánica que experimentan las mezclas en la etapa 1, se propone como primera aproximación, una

metodología que tenga en cuenta los fenómenos de envejecimiento por oxidación del CA y de separación del ligante asfáltico con el agregado pétreo debido a la presencia de agua. Para tal fin se ejecutaron las siguientes dos fases en una segunda etapa del proyecto:

- Fase 1: los CA 80-100, 60-70 y 20-40 fueron sometidos a una temperatura de 170 °C durante 30, 60 y 120 minutos con el fin de acelerar el fenómeno de oxidación (envejecimiento). Por tipo de CA envejecido fueron fabricadas seis briquetas para ser ensayadas con el método Marshall. Con los resultados se obtuvo la evolución de la resistencia mecánica de las mezclas cuando se oxidan de manera acelerada los ligantes. El valor máximo de resistencia obtenido se tomó como referencia para fabricar las briquetas necesarias para ejecutar la fase 2. Este valor se definió debido a que en mezclas asfálticas, la oxidación del CA genera aumento en la rigidez acompañado por disminución en la ductilidad.
- Fase 2: con los ligantes envejecidos y teniendo en cuenta como referencia los valores máximos de resistencia alcanzados en la fase 1, fueron fabricadas en total 36 briquetas del tipo MDC-2 por tipo de CA. Estas muestras fueron sumergidas en agua durante seis meses con el fin de evaluar el efecto de la humedad. Cada mes eran retiradas del agua 18 briquetas (seis briquetas por tipo de CA) para realizar el ensayo Marshall y determinar la disminución típica de resistencia que experimentan estos materiales en presencia del agua.

Los resultados obtenidos en la fase 2 se compararon con los de la etapa 1 del proyecto con el fin de evaluar si eran compatibles.

Resultados

Evolución de rigidez Marshall en el tiempo

En la figura 1a se observa la evolución en el tiempo (t en meses) de los parámetros de estabilidad del ensayo Marshall, y en la figura 1b la relación entre la estabilidad (E) y el flujo (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 en un ensayo de tracción indirecta. Se observa para las mezclas fabricadas con CA 80-100, CA 60-70

y CA 20-40 un incremento en la estabilidad en los meses iniciales de exposición al medioambiente (figura 1a). Sin embargo, se observa una disminución notable en este parámetro a partir del mes 14 y 17 para las mezclas fabricadas con CA 20-40 y CA 60-70, respectivamente. Las mezclas elaboradas con CA 60-70 en $t=17$ meses incrementa su estabilidad en un 81,6% su valor comparado con el alcanzado en $t=0$; aquellas fabricadas con CA 80-100 en $t=24$ meses incrementan en un 81,7%; y las fabricadas con CA 20-40 incrementan en $t=14$ meses en un 42,7%.

En la figura 1b se observa que la resistencia mecánica de las mezclas fabricadas con CA 60-70 tiende a aumentar con el tiempo de exposición, y en $t=17$ meses incrementa un 41,6% con respecto al valor inicial alcanzado en $t=0$. A partir de $t=17$ meses la tendencia de la mezcla es experimentar valores similares de rigidez. Para el caso de las mezclas con CA 80-100 y CA 20-40, el incremento en $t=24$ meses y $t=14$ meses es de 53% y 36,9%, respectivamente en comparación con el valor obtenido en $t=0$. Adicionalmente, se observa un decaimiento de los valores de la relación E/F en algunos periodos, los cuales pueden ser explicados por los dos fenómenos descritos con anterioridad en la introducción y los cuales están ocurriendo en las mezclas simultáneamente. La oxidación del asfalto rigidiza las mezclas pero el efecto del agua disminuye la resistencia de éstas.

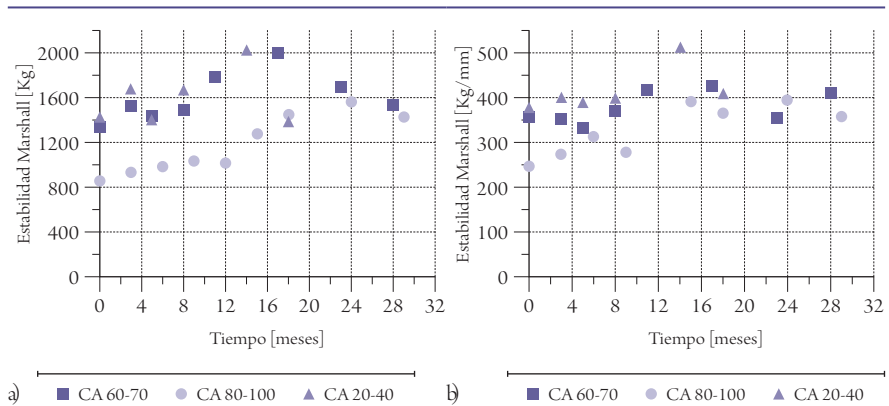


Figura 1. Evolución de a) estabilidad Marshall y b) relación E/F con el tiempo de envejecimiento, para mezclas fabricadas con CA 80-100, CA 60-70 y CA 20-40

Fuente: los autores.

Evolución de los parámetros mecánicos bajo carga monotónica envejeciendo el cemento asfáltico a 170 °C y sumergiendo las mezclas en agua

En la figuras 2a y 2b se observa la evolución de la estabilidad y la rigidez Marshall, respectivamente, de las mezclas cuando se someten los CA a una temperatura de 170 °C durante distintos periodos, con el fin de oxidarlos de manera acelerada (fase 1). Los máximos valores de estabilidad y rigidez para las mezclas fabricadas con CA 60-70 y CA 20-40 se obtienen cuando se someten estos ligantes a esta temperatura durante 30 y 60 minutos, respectivamente. Para el caso de las mezclas fabricadas con CA 80-100, la mayor estabilidad se obtiene cuando se somete el ligante durante 60 minutos y la rigidez cuando se realiza a 30 minutos. Estos tiempos cuando alcanzan los mayores incrementos en estabilidad y rigidez fueron los utilizados para fabricar nuevas muestras y sumergirlas en agua con el fin de evaluar el efecto de la humedad.

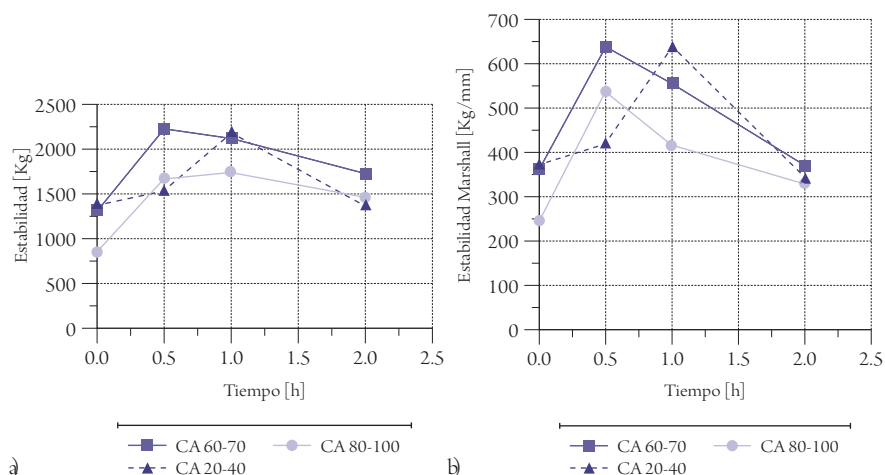


Figura 2. Evolución de a) estabilidad y b) rigidez Marshall cuando se envejece el cemento asfáltico a 170 °C

Fuente: los autores.

Para evaluar el efecto del agua sobre las mezclas (fase 2) se utilizó como parámetro mecánico la rigidez Marshall debido a que éste relaciona la estabilidad con el desplazamiento máximo alcanzado en el estado de falla de la briqueta bajo carga monotónica en tracción indirecta (flujo). La figura 3 muestra una disminución típica

de la resistencia de las mezclas cuando se sumergen en agua. En $t=0$ el valor de la relación E/F es el obtenido con las mezclas fabricadas cuando el CA es sometido a 170°C durante 30-60 minutos (fase 1 de oxidación acelerada). Se observa que al aumentar el tiempo de saturación en agua de las mezclas, éstas alcanzan un estado en el cual el tiempo de sumersión afecta muy poco la resistencia de éstas (cuarto al sexto mes). En este punto se obtiene un valor de rigidez el cual puede ser comparado con los resultados obtenidos de la figura 1 (figura 4). La disminución de la resistencia durante los seis meses de saturación en agua fue de 20, 31 y 35% para las mezclas fabricadas con CA 80-100, CA 60-70 y CA 20-40, respectivamente.

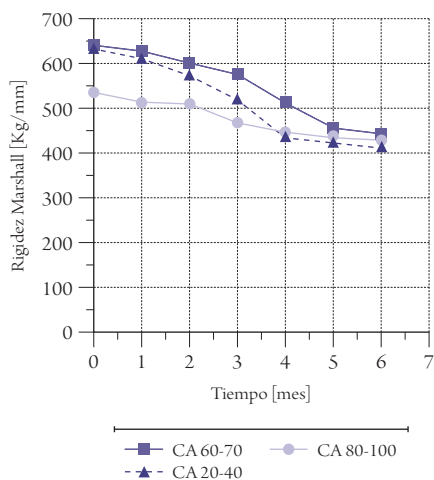


Figura 3. Efecto del agua sobre las mezclas fabricadas con los ligantes asfálticos envejecidos

Fuente: los autores.

Los resultados presentados en las figuras 2b y 3 (fases 1 y 2) pueden ser expresados matemáticamente mediante la siguiente ecuación empírica:

$$\frac{E}{F} = A + \frac{1}{a + b \exp(-t)} \quad (1)$$

E es la estabilidad en kg, F es el flujo en mm, A es la relación E/F alcanzada luego de someter el CA a 170°C durante 30 a 60 minutos (fase 1 de oxidación), t es el tiempo de saturación de las mezclas en agua en meses (fase 2 de evaluación de la influencia del agua), y a , b son parámetros de regresión. Para el caso del CA 80-100, CA 60-70 y CA 20-40, los parámetros de regresión son $a=-9,10 \times 10^{-3}$, $b=-0,12$; $a=-4,44 \times 10^{-3}$, $b=-0,18$ y $a=-4,16 \times 10^{-3}$, $b=-0,076$, respectivamente. El coeficiente de

regresión r^2 oscila entre 0,97 y 0,99, cuando se emplea la ecuación (1) para simular los resultados presentados en la figura 3.

En la figura 4 se observa que el comportamiento que experimentan las mezclas sometidas a 170 °C (fase 1) y un periodo de sumersión en agua de seis meses (fase 2) genera relaciones E/F similares a aquellas que experimentan las mezclas entre 12 y 20 meses de exposición al medioambiente. Incluso se puede observar que si la tendencia de las mezclas sometidas al medioambiente continúa incrementando la relación E/F de la forma como se presenta en las figuras 1 y 4, esta metodología de ensayo podría llegar a predecir el comportamiento de éstas para aproximadamente cuatro años de exposición.

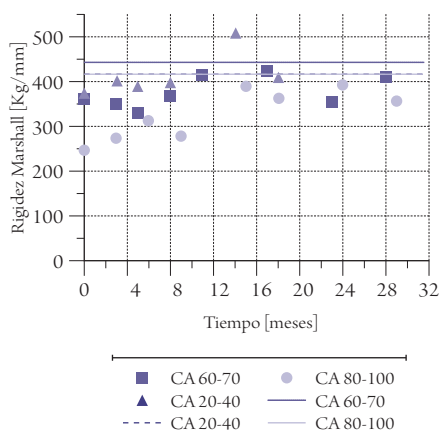


Figura 4. Comparación de las fases 1 y 2 del estudio

Fuente: los autores.

Conclusiones

En este estudio se propone una metodología de ensayo para intentar predecir la evolución de la resistencia mecánica de una mezcla asfáltica tipo MDC-2 cuando es sometida a las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá D.C. La metodología presentada deber ser tenida en cuenta como una primera aproximación y no debe ser considerada como una versión definitiva.

Al someter ligantes asfálticos a una temperatura de 170 °C durante 30-60 minutos, y sumergir luego en agua, mezclas asfálticas con estos CA oxidados de manera acelerada, se puede predecir la resistencia mecánica que experimentan mezclas del tipo MDC-2 fabricadas con CA 80-100, CA 60-70 y CA 20-40 cuando son sometidas durante 12 a 20 meses de exposición a las condiciones ambientales de la ciudad. Futuras investigaciones deben evaluar el cambio en la composición química y reológica que experimentan los asfaltos y las mezclas en las etapas 1 y 2 propuestas en la presente metodología. Se deben evaluar propiedades mecánicas de las mezclas bajo carga cíclica, tales como módulos resilientes, ahuellamiento y ley de fatiga. Adicionalmente, evaluar esta metodología sobre otros tipos de mezcla con agregados pétreos y granulometrías diferentes.

Referencias

- Airey, G.D. (2003). State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 4, 3, 165-176.
- Amirkhanian, S.N. & Williams, B. (1993). Recyclability of moisture damaged flexible pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5, 4, 510-530.
- Bagampadde, U.; Isacson, U. & Kiggundu B.M. (2005). Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures. *International Journal of Pavement Engineering* 6, 4, 229-239.
- Bishara, S.W.; Robertson, R.E. & Mahoney D. (2000). Rapid oxidative aging of binder using microwave energy – An improved method. Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Session 2, Development in Bituminous Products and Techniques, (Barcelona), 27–36.
- Bocci, M. & Cerni, G. (2000). The ultraviolet radiation in short-and long-term aging of bitumen. Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Session 1, Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures (Barcelona), 49-58.
- Brown, S.F. & Scholz, T.V. (2000). Development of laboratory protocols for the ageing of asphalt mixtures. Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Session 1, Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures, (Barcelona), 83-90.
- Caro, S. et ál. (2008). Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1, mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering*, 9, 2, 81–98.
- Choquet, F.S. & Verhasselt, A.F. (1992). Natural and accelerated ageing of bitumens-effects on the asphaltenes. Proc. of an International Symposium on Asphaltene particles

- in Fossil Fuel Exploration, Recovery, Refining and Production Processes, Ed. MK Sharna and TFYen, Plenum Press, New York, 13-29.
- Committee European of Normalization. (2000). Bituminous mixture test methods for hot mix asphalts-Part 25, Cyclic compression tests.
- Instituto Nacional de Vías.(2007). Especificaciones generales de Construcción de carreteras. Bogotá D.C. (Colombia).
- Instituto Nacional de Vías.(2007a). Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. V. I y II. Bogotá D.C. (Colombia).
- Jemison, H.B. et ál. (1991). Evaluation of Standard Oven Tests for hot-mix plant aging. Transportation Research Record, TRB, Washington D.C. 1323, 77-84.
- Kandhal, P.S.; Lubold, Jr. C.W. & Roberts, F.L. (1989). Water damage to asphalt overlays, case histories. NCAT Report No. 89-1. Presented at the Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists, Nashville, Tennessee, February 20-22.
- Kanitpong, K. & Bahia, H.U. (2008). Evaluation of HMA moisture damage in Wisconsin as it relates to pavement performance. *International Journal of Pavement Engineering*, 9, 1, 9-17.
- Kemp, G.R. & Predoehl, N.H. (1981). A comparison of field and laboratory environments of asphalt durability. Proc. Assn. Asphalt Paving Technol. 50, 492-537.
- Khalid, H.A. (2002). A new approach for the accelerated ageing of porous asphalt mixtures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers 153, 3, 171-181.
- Khalid, H.A. & Walsh, C.M. (2000). Relating mix and binder fundamental properties of aged porous asphalt materials. Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Session 1, Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures (Barcelona), 398-405.
- Kim, O-K. et ál. (1987). Development of laboratory oxidative aging procedures for asphalt cements and asphalt mixtures. Transportation Research Record, TRB, Washington D.C. 1115, 101-112.
- Kringos, N. et ál.(2008). Modeling of combined physical–mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes, Part 1, governing processes and formulations. *International Journal of Pavement Engineering*, 9, 2, 115-128.
- Kringos, N. et ál. (2008a). Modeling of combined physical–mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes, Part 2, moisture susceptibility parameters. *International J. Pavement Engineering*, 9, 2, 129-151.
- Kuppens, E.A.M. et ál. (1997). Bitumen-ageing tests for predicting durability of porous asphalt. Di Benedetto, H., Francken, L., Proc. Fifth Int. RILEM Symp. Mech. Tests for Bituminous Materials, 71-77.

- Lottman, R.P. & Johnson, D.L. (1971). The moisture mechanism that causes asphalt stripping in asphaltic pavement mixtures. *Engineering Experimental Station*, Univ. of Idaho.
- Lu, Q. & Harvey, J.T. (2006). Field investigation of factors associated with moisture damage in asphalt pavements. 10th International conference on asphalt pavements (ISAP), Quebec, Canada, 691-700.
- Lu, Q. & Harvey, J.T. (2006a). Evaluation of moisture sensitivity of hot mix asphalt by flexural beam fatigue tests. *Asphalt Concrete*, ASCE, 124-133.
- Majildzadeh, K. & Brovold, F.N. (1968) State of the art, Effect of water on bitumen-aggregate mixtures. Highway Res. Board Special Report 98, No. 1456.
- Mallick, R.B., Pelland, R. & Hugo, F. (2005). Use of accelerated loading equipment for determination of long term moisture susceptibility of hot mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 6, 2, 125-136.
- Migliori, F. & Corté, J.F. (1998). Comparative study of RTFOT and PAV aging simulation laboratory tests. Transportation Research Record, TRB, Washington D.C. 1638, 56-63.
- Mohamed, E.H.H. (1993). Debonding location in asphalt concrete associated with moisture damage. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5, 4, 497-509.
- Mohammad, J.; Khattak, A.M. & Kyatham V. (2008). Mechanistic characteristics of moisture damaged asphalt matrix and hot mix asphalt mixtures. Airfield and Highway Pavements 2008, ASCE, 134-146.
- Montepara, A. (1999). A theoretical-interpretative model of the relationship between UV-radiation ageing of bitumen and viscosity variation. Proc. of Eurobitume Workshop, paper No. 075, Luxemburg.
- Montepara, A. & Giuliani, F. (2000). Comparison between ageing simulation tests of road bitumen. Proc. 2nd Euraspphalt and Eurobitume Congress, Session 1, Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures, (Barcelona), 518-523.
- Peterson, J.C. (1982). Chemistry of asphalt--Aggregate interactions relationship with pavement moisture damage test. Transportation Research Record, TRB. 83, 95-104.
- Rondón, H.A. y Reyes, F.A. (2009). Influencia de las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá sobre el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24, 2, 195-207.
- Said, S.F. (2005). Aging effect on mechanical characteristics of bituminous mixtures. Transportation Research Record. *Journal of the Transportation Research Board*, 1901, Washington D.C. 1901, 1-9.
- Shen, J.; Amirkhanian, S. & Tang, B. (2006). Influence of accelerated aging test temperature on the properties of binders. *International Journal of Pavement Engineering* 7, 3, 191-198.

- Shiau, J.-M. et al. (1991). Characterization of age-hardening potential of asphalt by using Corbett-Swarbrick Asphalt Fractionation Test. Transportation Research Record, TRB, Washington D.C. 1323, 53-60.
- Stuart, K.D. (1986). Evaluation of procedure used to predict moisture damage in asphalt mixtures. Report No. RD-8/091, Federal Highway Administration.
- Vargas, X.A. et al. (2008). Asphalt rheology evolution through thermo-oxidation (aging) in a rheo-reactor. FUEL 87. 13-14, 3018-3023.
- Verhasselt, A.F. (1997). Field Ageing of Bituminous Binders, Simulation and Kinetic approach. Di Benedetto, H., Francken, L. Proc. Fifth International RILEM Symposium, Mechanical Tests for Bituminous Materials, 121-128.
- Wellborn, J.Y. (1984). Physical properties as related to asphalt durability, State of the art. Transportation Research Record, TRB, Washington D.C. 999, 31-36.
- Williams, T.M. & Miknis, F.P. (1998). Use of environmental SEM to study asphalt-water interactions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10. 2, 121-124.

