

Influencia del agua en el fenómeno de *stripping* en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante¹

Influence of Water on Asphalt Mixture Stripping: A Study on Asphalt Binders²

Influência da água no fenômeno de *stripping* em misturas asfálticas: estudo sobre o ligante³

Hugo Alexander Rondón-Quintana⁴

Luis Ángel Moreno-Anselmi⁵

¹ Fecha de recepción: 4 de marzo de 2010. Fecha de aceptación para publicación: 27 de julio de 2010. Este artículo se deriva de un proyecto de investigación denominado *Desarrollo de un método de ensayo acelerado para evaluar el envejecimiento de mezclas asfálticas*, registrado en la Universidad Católica de Colombia, número PIC 158C, y en la Universidad Militar Nueva Granada, con el número DIS 406.

² Submitted on: March 4, 2010. Accepted on: July 27, 2010. This article results from the research project called *Development of an Accelerated Test Method for assessing Asphalt Mixture Aging*, recorded in the Universidad Católica de Colombia, registration number PIC 158C, and Universidad Militar Nueva Granada, with registration number DIS 406.

³ Data de recepção: 4 de março de 2010. Data de aceitação para publicação: 27 de julho de 2010. Este artigo deriva-se de um projeto de pesquisa denominado *Desenvolvimento de um método de ensaio acelerado para avaliar o envelhecimento de misturas asfálticas*, registrado na Universidade Católica da Colômbia, número PIC 158C, e na Universidade Militar Nueva Granada, com o número DIS 406.

⁴ Ingeniero civil, Universidad Francisco de Paula Santander, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá Colombia. Profesor de la Facultad Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: harondon@ucatolica.edu.co.

⁵ Ingeniero civil, Universidad Francisco de Paula Santander, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Profesor de la Facultad Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: luis.moreno@unimilitar.edu.co.

Resumen

Uno de los principales daños de mezclas asfálticas in situ ocurre cuando se separa el ligante asfáltico del agregado pétreo debido a la presencia de agua. Este fenómeno se identifica con el nombre de *stripping*. A pesar del alto número de investigaciones realizadas, este fenómeno y las causas que lo generan no han sido totalmente entendidas e identificadas. El artículo presenta los resultados de un estudio experimental ejecutado con el fin de evaluar la influencia que tiene el ligante asfáltico en el fenómeno, debido sólo al efecto del agua. Para tal fin se realizaron ensayos de resistencia bajo carga monotónica en tracción indirecta sobre dos mezclas de concreto asfáltico fabricadas con dos ligantes diferentes (CA 80-100 y CA 60-70). Como conclusión general se reporta que la interface ligante asfáltico-agregado pétreo se afecta por el cambio en la consistencia que experimentan los cementos asfálticos en presencia del agua.

Palabras clave

Desprendimiento, mezclas asfálticas, efecto del agua, cemento asfáltico.

Abstract

A mayor distress on asphalt mixtures occur due to the physical separation of asphalt cement and the aggregate produced by adhesion failure. This phenomenon is called stripping. The causes that produce stripping are not yet fully understood. This paper describes the influence of asphalt cement on stripping which is due only to water effect. Indirect strength tensile tests were performed on two hot asphalt mixtures with two different asphalt cements (AC 80-100 and AC 60-70). There is a change of consistency in asphalt cement when it is saturated with water, and this change affects asphalt cement-granular aggregate connection.

Key words

Stripping, asphalt mixture, water effect, asphalt cement.

Resumo

Um dos principais problemas que as misturas asfálticas sofrem in situ ocorre quando o ligante asfáltico se separa do agregado pétreo devido à presença de água. Este fenômeno identifica-se com o nome de *stripping*. Apesar do alto número de pesquisas realizadas, este fenômeno e as causas que o produzem ainda não foram totalmente entendidas e identificadas. O artigo apresenta os resultados de um estudo experimental executado com o fim de avaliar a influência que o ligante asfáltico possui no fenômeno, devido só ao efeito da água. Para tal fim realizaram-se testes de resistência sob carga monotônica em tração indireta sobre duas misturas de concreto asfáltico fabricadas com dois ligantes diferentes (CA 80-100 e CA 60-70). Como conclusão geral reporta-se que a interface ligante asfáltico-agregado pétreo se afeta pela mudança na consistência que experimentam os cimentos asfálticos na presença de água.

Palavras chave

Desprendimento, misturas asfálticas, efeito da água, cimento asfáltico.

Introducción

Los principales factores que afectan la durabilidad de las mezclas asfálticas, asumiendo 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 medio ambiente. Cuantificar la influencia del ambiente en el comportamiento de este tipo de material no es una tarea fácil. La forma como se realiza actualmente es separando cada uno de los componentes que lo conforman (agua, aire, temperatura y rayos ultravioleta) y evaluando 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; Shiau *et al.*, 1991; Bishara, Robertson y Mahoney, 2000; Bocci y Cerni, 2000; Brown y Scholz, 2000; Khalid y Walsh, 2000; Khalid, 2002; Airey, 2003; Said, 2005; Shen, Amirkhanian y Tang, 2006).

Además, por lo general estos estudios utilizan ensayos y equipos (p. ej., hornos para ensayo de película delgada del tipo TFOT o rotatorios RTFOT, microondas) que no pueden reproducir totalmente la influencia de cada uno de los componentes del ambiente en las propiedades mecánicas y reológicas de las mezclas y los ligantes asfálticos (Jemison *et al.*, 1991; Choquet y Verhasselt, 1992; Kuppens *et al.*, 1997; Verhasselt, 1997). Incluso la mayor parte de las investigaciones combinan estos ensayos y equipos para intentar evaluar cómo cambian las propiedades de estos materiales cuando experimentan condiciones reales del ambiente (Jemison *et al.*, 1991; Migliori y Corté, 1998; Montepara, 1999; Montepara y Giuliani, 2000; Airey, 2003). En conclusión, se reporta que estas metodologías de ensayo tienen como limitación principal que aún son incapaces de reproducir las condiciones reales a las cuales están expuestas las mezclas asfálticas *in situ*.

Uno de los principales modos de daño de mezclas asfálticas en presencia de agua es el efecto de separación del ligante asfáltico con el agregado pétreo

(Majildzadeh y Brovold, 1968; Lottman y Jonson, 1971; Kandhal, Lubold y Roberts, 1989; Mohamed, 1993; Amirghanian y Williams, 1993; Williams y Miknis, 1998; Bagampadde, Isacson y Kiggundu, 2005; Mallick, Pelland y Hugo, 2005; Caro *et al.*, 2008; Kringos *et al.*, 2008a y 2008b; Mohammad, Khattak y Kyatham, 2008; Kassem *et al.*, 2009). Este fenómeno fue identificado en la década de los treinta (Caro *et al.*, 2008) y la literatura de referencia lo denomina *stripping*.

Peterson (1982) y Stuart (1986) sugieren que el *stripping* ocurre por reacción química entre el asfalto y el agregado. De manera similar, Bagampadde *et al.* (2005) mencionan que la calidad del agregado y la composición mineralógica es uno, de entre tantos factores, que afectan la magnitud de este fenómeno. Kanitpong y Bahía (2008) reportan que la adherencia entre el ligante y el agregado pétreo es fuertemente dependiente de la mineralogía de este último material. Lu y Harvey (2006a y 2006b) demostraron que la edad del pavimento tiene una alta influencia en el daño por humedad.

Las causas que generan este fenómeno son complejas, ya que involucran aspectos físicos, químicos, mecánicos y termodinámicos. El estado del conocimiento en esta área radica en que a pesar del alto número de investigaciones realizadas, el fenómeno de *stripping* y las causas que lo generan no han sido totalmente entendidas e identificadas (Mohamed, 1993; Bagampadde *et al.*, 2005).

Las mezclas asfálticas están compuestas básicamente de cuatro materiales: agregado pétreo, ligante asfáltico, aire y agua. Por lo general, los estudios consultados sobre el fenómeno de *stripping* evalúan la influencia del tipo y de la mineralogía del agregado pétreo. Lo anterior, debido a que ha sido tradicional pensar que este fenómeno ocurre cuando el agua penetra entre la superficie del agregado y la película de asfalto, y debido a la mayor afinidad del agua con el pétreo, la unión se rompe.

Muy poca atención se presta a la influencia del ligante, debido a que es de amplio conocimiento que el asfalto es un material impermeable que reacciona muy poco ante la presencia de agentes químicos externos; sin embargo, el agua presenta como uno de sus componentes químicos esenciales oxígeno y otros compuestos capaces de generar cambios en las propiedades químicas y físicas del asfalto, a largo plazo (p. ej., oxidación y endurecimiento), en especial cuando la interconexión ligante-pétreo es muy delgada. A pesar de lo anterior, ningún estudio de los consultados reporta si el ligante asfáltico cambia sus propiedades tan sólo por la presencia de agua, y si estos cambios influyen en el fenómeno de *stripping*.

Por lo anterior, se ejecutó una fase experimental tendiente a analizar la influencia del ligante asfáltico en el fenómeno de *stripping*, a fin de evaluar el efecto del agua, es decir, no se tuvieron en cuenta el efecto que puede causar el aire y los cambios de temperatura o la combinación aire-agua-temperatura, tal como ocurre in situ. Para tal fin, se sumergieron en agua durante seis meses láminas muy delgadas (4 mm de espesor) de cemento asfáltico tipo CA 80-100 y CA 60-70.

Cada mes se retiraban del agua algunas láminas para fabricar mezclas asfálticas del tipo densas y gruesas en caliente MDC-2 y MGC-0 (de acuerdo con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías [Invías], 2007a) y se midió la resistencia que experimentaban en tracción indirecta bajo carga monotónica a través del ensayo de Marshall. Estos resultados se compararon con aquellos obtenidos sobre mezclas asfálticas sumergidas en agua, pero fabricadas con concreto asfáltico sin sumergir, es decir, fabricadas de la forma tradicional.

Se optó por utilizar mezclas de concreto asfáltico tipo MDC-2 y MGC-0, debido a que son las más utilizadas en Colombia para conformar capas de rodadura y bacheos, respectivamente, y son las que se encuentran sometidas de manera directa a las condiciones del ambiente. A las láminas de cemento asfáltico sumergidas se les realizaron ensayos de penetración para medir si la consistencia del ligante variaba cuando era sumergida en agua.

1. Metodología

1.1 Caracterización de materiales

El agregado pétreo empleado en la elaboración de las mezclas asfálticas para el ensayo de Marshall (llamadas briquetas) procede de la cantera de Subachoque (Cundinamarca, Colombia). A estos materiales se les realizaron los siguientes ensayos, siguiendo las especificaciones del Invías (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 $\frac{3}{4}$ " 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 del Invías

(2007a) para fabricar mezclas tipo MDC-2 y MGC-0, a fin de usarlas en capas de rodadura y bacheo, respectivamente.

Tabla 1. Caracterización de los agregados

Ensayo	Valor
Peso específico	2,56
Equivalente de arena (%)	86
Caras fracturadas (%)	92
Índice de alargamiento (%)	10
Índice de aplanamiento (%)	10
Ataque en sulfato de sodio (%)	12,4
Microdeval (sin saturar) (%)	20,3
Resistencia al desgaste máquina de Los Ángeles (%)	22,5

Fuente: presentación propia de los autores.

A los cementos asfálticos se les realizaron los ensayos típicos que exigen las especificaciones del Invías (2007a) para caracterizarlos: penetración, viscosidad, 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 su sigla en inglés) (tablas 2 y 3).

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	1.000 mín.	1.400
Ductilidad (25 °C, 5 cm/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
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: presentación propia de 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	1.500 mín.	1.750
Ductilidad (25 °C, 5 cm/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	10.000 máx.	5.200
Índice de durabilidad	3 máx.	<3
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	%	52 mín.	70

Fuente: presentación propia de los autores.

1.2 Diseño de mezclas asfálticas empleando la metodología de Marshall

Luego de llevar a cabo los ensayos al agregado pétreo y a los cementos asfálticos se fabricaron seis 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 de Marshall (INV. E-748 [Invías, 2007b]). Esto con el objeto de determinar el contenido óptimo de asfalto de las mezclas MDC-2 y MGC-0. Además, para cumplir con las especificaciones del Invías (2007a) y fabricar las mezclas asfálticas 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 de Marshall. Los cálculos obtenidos del ensayo con los asfaltos CA 80-100 y CA 60-70 están registrados en las tablas 4, 5, 6 y 7.

Tabla 4. Resumen del ensayo de 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	2,25	954	7,23	18,02	3,30	289,09
5,0	2,28	1.198	5,51	17,41	3,41	351,32
5,5	2,28	1.202	5,19	17,12	3,48	345,40
6,0	2,27	1.105	4,89	18,60	3,60	306,94

Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 5. Resumen ensayo de 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	1.406	5,63	16,55	3,36	418,45
5,5	2,25	1.601	4,37	16,60	3,56	449,72
6,0	2,25	1.662	3,21	17,08	3,62	459,12
6,5	2,26	1.498	3,01	17,44	3,90	384,10

Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 6. Resumen del ensayo de Marshall para mezcla asfáltica MGC-0 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	2,28	1.139	7,70	17,53	2,98	381,56
5,0	2,30	1.174	6,29	17,32	3,11	377,28
5,5	2,32	1.252	4,86	17,13	3,37	372,15
6,0	2,32	1.297	3,95	17,39	3,56	364,61
6,5	2,31	1.253	3,77	18,28	3,59	349,21

Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 7. Resumen del ensayo de Marshall para mezcla asfáltica MGC-0 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]
4,5	2,31	1.208	6,81	16,61	2,98	404,61
5,0	2,33	1.291	5,29	16,31	3,37	383,61
5,5	2,31	1.243	5,10	17,20	3,48	357,34
6,0	2,30	1.117	4,82	17,99	3,61	309,24
6,5	2,29	1.084	4,84	19,03	3,74	289,71

Fuente: presentación propia de los autores.

Los porcentajes óptimos de cemento asfáltico, de acuerdo con los datos de las tablas 4 y 5, son de 5,3% y 5,6% para el caso de las mezclas MDC-2 fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70, respectivamente. Para las mezclas MGC-0 estos contenidos fueron de 5,5% y 5% cuando el ligante utilizado

era CA 80-100 y CA 60-70, respectivamente. En estos porcentajes se están cumpliendo los requisitos mínimos exigidos por las especificaciones del Invías (2007a) para MDC-2 y tránsitos tipo NT1 o NT2 (bajos y medios volúmenes de tránsito, respectivamente).

1.3 Ensayos para evaluar el objetivo del proyecto

Como se mencionó, el fenómeno de *stripping* es la separación del agregado pétreo del ligante debido a la presencia de agua en la mezcla asfáltica, lo que disminuye su resistencia bajo carga monotónica y cíclica. Es decir, este fenómeno ocurre en la interconexión ligante-agregados pétreos. Para entender el efecto que genera el agua en el ligante asfáltico y la influencia de este último en el *stripping*, se compararon dos fases experimentales ejecutadas de la siguiente forma:

- Inicialmente fueron fabricadas y sumergidas en agua, durante seis meses, mezclas asfálticas tipo MDC-2 y MGC-0 con los contenidos óptimos de CA 80-100 y CA 60-70, obtenidos del diseño de Marshall. Estas muestras se sometieron mensualmente al ensayo de Marshall para evaluar la resistencia bajo carga monotónica en tracción indirecta. Por cada mezcla y tipo de concreto asfáltico eran fabricadas y ensayadas 10 muestras. El objetivo de estos ensayos fue medir la disminución típica que experimentan en su resistencia las mezclas cuando son saturadas de agua. El agua utilizada era potable y provenía de la red de acueducto.
- En una segunda fase, láminas de CA 80-100 y CA 60-70 con espesor de 4 mm fueron sumergidas en agua durante seis meses. Las láminas de concreto asfáltico se pusieron sobre recipientes de aluminio de área rectangular (40×30 cm) y espesor de 1 cm. Cada mes eran retiradas las láminas del agua con el fin de fabricar mezclas asfálticas tipo MDC-2 y MGC-0 con los contenidos óptimos de CA 80-100 y CA 60-70 obtenidos del diseño de Marshall. Antes de fabricar las mezclas, la superficie de las láminas de concreto asfáltico eran cuidadosamente secadas con estopa y permanecían a la temperatura ambiente del laboratorio durante un día. Luego se separaban de su soporte aplicando calor con soplete a la parte posterior del recipiente de aluminio. El calor no se aplicaba de manera directa al concreto asfáltico, con el fin de evitar su envejecimiento (endurecimiento) por oxidación. La temperatura posterior del recipiente de aluminio se aumentaba hasta obtener una consistencia fluida del asfalto (temperatura cercana al punto de ablandamiento). Las mezclas elaboradas con estos ligantes eran sometidas al ensayo de Marshall y, de manera similar a la fase 1, eran fabricadas 10 muestras por tipo

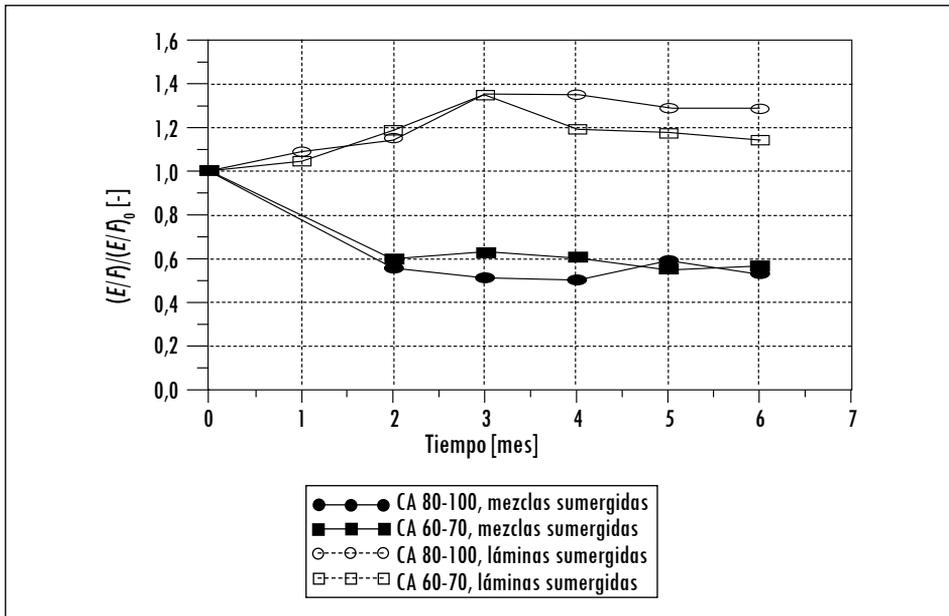
de mezcla y concreto. A las láminas se les realizaron ensayos de penetración (Invías, 2007b [ASTM D-5]) cada tres meses con el fin de evaluar el cambio en la consistencia que experimentaban cuando eran sumergidas en agua.

Los resultados de la fase 2 se compararon con los de la fase 1 para analizar la influencia que tiene el concreto asfáltico en el fenómeno de *stripping* cuando se evalúa tan sólo el efecto del agua.

2. Resultados

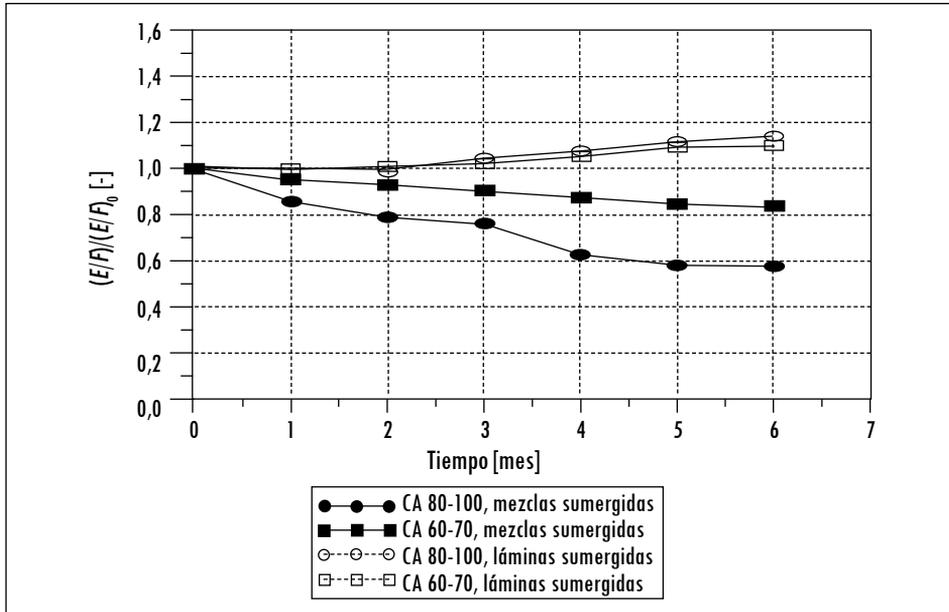
En las figuras 1 y 2 se presentan los resultados de los ensayos de Marshall ejecutados sobre las mezclas MDC-2 y MGC-0, respectivamente. Durante seis meses se midió mensualmente la evolución de la resistencia bajo carga monotónica en tracción indirecta de las mezclas en el estado de falla (relación E/F entre la estabilidad E y el flujo F). En las figuras esta relación se normaliza con el valor alcanzado en el diseño de Marshall (estado inicial $[E/F]_0$), con el fin de observar fácilmente el incremento o la disminución porcentual de este parámetro.

Figura 1. Resultados de evolución de la resistencia mecánica bajo carga monotónica de las mezclas tipo MDC-2 fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 2. Resultados de evolución de la resistencia mecánica bajo carga monotónica de las mezclas tipo MGC-0 fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70



Fuente: presentación propia de los autores.

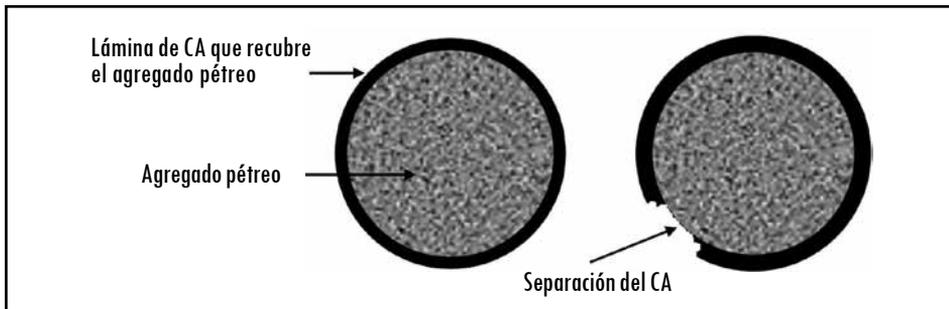
En las figuras 1 y 2 se observa una disminución típica de la resistencia de las mezclas cuando se sumergen en agua. Para el caso de las mezclas MDC-2 (Figura 1), la mayor disminución se obtiene en los dos primeros meses (alrededor de 40%) y luego alcanza una fase en la cual el tiempo de sumersión afecta muy poco la resistencia de las mezclas. Adicionalmente, se observa que la tasa de disminución de la resistencia en este tipo de mezcla es independiente del tipo de concreto asfáltico utilizado. Una tendencia similar experimentan las mezclas MGC-0 (Figura 2), pero se observa que la disminución de la resistencia es mayor cuando se fabrican con CA 80-100 (disminuye un 41% en comparación con el 19% que experimentan las mezclas fabricadas con CA 60-70).

Cuando las mezclas se fabrican utilizando láminas de concreto asfáltico sumergidas en agua, el comportamiento es contrario al reportado. Se observa una tendencia a aumentar la resistencia mecánica de las mezclas con el tiempo de sumergimiento de las láminas en agua y este aumento es dependiente del tipo de mezcla analizada (granulometría del agregado pétreo) e independiente del tipo de concreto asfáltico. El mayor incremento en la resistencia (entre

32% y 35%) la adquieren las mezclas del tipo MDC-2 en el tercer mes de exposición de las láminas al agua. Para el caso de las mezclas MGC-0, la tasa de incremento es menor; pero en el sexto mes aún no ha cesado el aumento en resistencia (12%-18%).

Los resultados sugieren que el concreto asfáltico, en presencia solamente de agua, cambia sus propiedades, ya que aumenta la resistencia mecánica de las mezclas. Lo anterior conduce a pensar que la conexión ligante-pétreos en una mezcla asfáltica se puede romper (fenómeno de *stripping*), debido a que el concreto, por la sola presencia del agua se vuelve rígido, lo que conlleva una contracción del ligante sin cambio de volumen y, por lo tanto, separación con el agregado. Una representación esquemática e idealizada del fenómeno se presenta en la Figura 3.

Figura 3. Esquema idealizado del proceso de contracción del concreto asfáltico y separación del agregado pétreo



Fuente: presentación propia de los autores.

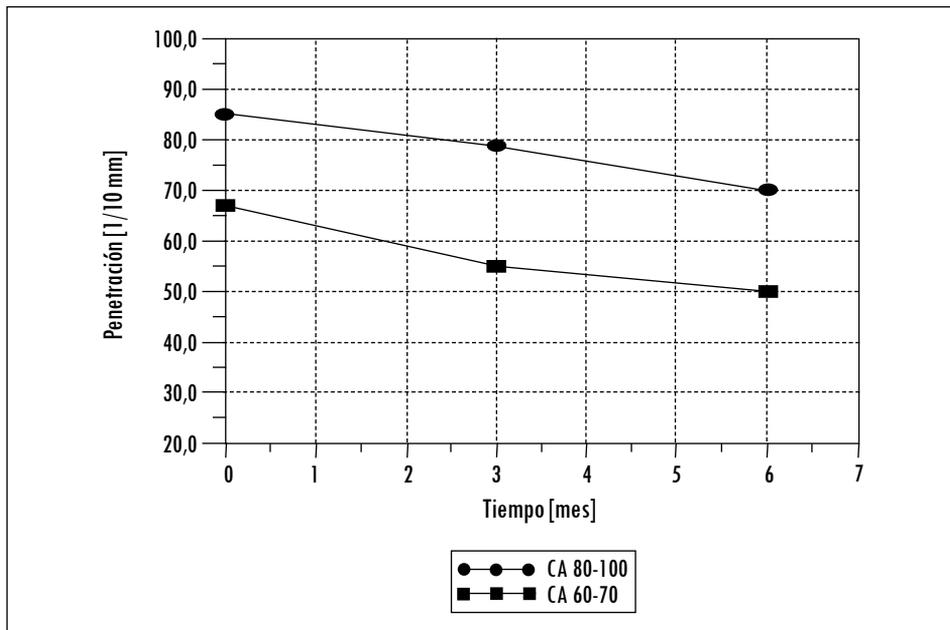
Con el fin de evaluar si el ligante cambia sus propiedades en presencia del agua, se realizaron ensayos de penetración a los concretos asfálticos de las láminas sumergidas. En la Figura 4 se observa que los CA 80-100 y CA 60-70 adquieren una consistencia más rígida en presencia del agua, lo que ayuda a entender el aumento en rigidez de las mezclas observado en las figuras 1 y 2.

3. Conclusiones

Se realizó un estudio experimental para evaluar la influencia del ligante asfáltico en el fenómeno de *stripping* en mezclas asfálticas debido sólo al efecto del agua. A pesar de que el cemento asfáltico es un material impermeable y de muy baja reacción química con agentes externos, como conclusión general se reporta que este tipo de ligante en presencia de agua modifica su consistencia y aumenta su

rigidez. Lo anterior demuestra que la interfase ligante asfáltico-agregado pétreo se afecta por tal cambio de consistencia. El aumento en rigidez causa contracción del ligante asfáltico sin cambio de volumen, lo cual podría ser una de las causas que generen el desprendimiento del cemento asfáltico con el agregado.

Figura 4. Influencia del agua en la magnitud de la penetración en CA 80-100 y CA 60-70



Fuente: presentación propia de los autores.

Para poder entender con mayor claridad los resultados reportados en este estudio es necesario evaluar en un futuro el cambio en las propiedades químicas, reológicas y de resistencia mecánica bajo carga cíclica de los ligantes y las mezclas asfálticas analizadas cuando son sumergidos en agua.

Referencias

- AFANASIEVA, N. y ÁLVAREZ, M. *Estudio del envejecimiento de los asfaltos bajo la acción de algunos factores climáticos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2004.
- AIREY, G. D. State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 2003, vol. 4, núm. 3, pp. 165-176.
- AMIRKHANDIAN, S. N. y WILLIAMS, B. Recyclability of moisture damaged flexible pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1993, vol. 5, núm. 4, pp. 510-530.

- BAGAMPADDE, U.; ISACSSON, U. y KIGGUNDU, B. M. Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 2005, vol. 6, núm. 4, pp. 229-239.
- BISHARA, S. W.; ROBERTSON, R. E. y MAHONEY, D. Rapid oxidative aging of binder using microwave energy – An improved method. *2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Session 2: Development in Bituminous Products and Techniques*, Barcelona, 2000, pp. 27-36.
- BOCCI, M. y CERNI, G. The ultraviolet radiation in short-and long-term aging of bitumen. *2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures*, Barcelona, 2000, pp. 49-58.
- BROWN, S. F. y SCHOLZ, T. V. Development of laboratory protocols for the ageing of asphalt mixtures. *2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures*, Barcelona, 2000, pp. 83-90.
- CARO, S. *et al.* Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering*, 2008, vol. 9, núm. 2, pp. 81-98.
- CHOQUET, F. S. y VERHASSELT, A. F. Natural and accelerated ageing of bitumens – effects on the asphaltenes. In: *International Symposium on Asphaltene Particles in Fossil Fuel Exploration, Recovery, Refining and Production Processes*. New York: Plenum Press, 1992, pp. 13-29.
- COMMITTEE EUROPEAN OF NORMALIZATION (CEN). *Bituminous mixture test methods for hot mix asphalts – Part 25: Cyclic compression tests*, 2000.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (Invias). *Especificaciones generales de construcción de carreteras*. Bogotá, 2007a.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (Invias). *Normas de ensayos de materiales para carreteras*. Vols. I y II. Bogotá, 2007b.
- JEMISON, H. B. *et al.* Evaluation of standard oven tests for hot-mix plant aging. In *Transportation research record*. Washington: Transportation Research Board, 1991, pp. 77-84.
- KANDHAL, P. S.; LUBOLD, Jr. C. W. y ROBERTS, F. L. Water damage to asphalt overlays: case histories. NCAT Report No. 89-1. *Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Nashville, February 20-22, 1989.
- KANITPONG, K. y BAHIA, H. U. Evaluation of HMA moisture damage in Wisconsin as it relates to pavement performance. *International Journal of Pavement Engineering*. 2008, vol. 9, núm. 1, pp. 9-17.
- KASSEM, E. *et al.* Measurements of the moisture diffusion coefficient of asphalt mixtures and its relationship to mixture composition. *International Journal of Pavement Engineering*. 2009, vol. 10, núm. 6, pp. 389-399.
- KEMP, G. R. y PREDOEHL, N. H. A comparison of field and laboratory environments of asphalt durability. *Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologist*. 1981, vol. 50, pp. 492-537.

- KHALID, H. A. A new approach for the accelerated ageing of porous asphalt mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 2002, vol. 153, núm. 3, pp. 171-181.
- KHALID, H. A. y WALSH, C. M. Relating mix and binder fundamental properties of aged porous asphalt materials. *2nd Euraspalt and Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures*, Barcelona, 2000, pp. 398-405.
- KIM, O.-K. *et al.* Development of laboratory oxidative aging procedures for asphalt cements and asphalt mixtures. En *Transportation Research Record*. Washington: Transportation Research Board, 1987, pp. 101-112.
- KRINGOS, N. *et al.* Modelling of combined physical–mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes, Part 1: governing processes and formulations. *International Journal of Pavement Engineering*. 2008a, vol. 9, núm. 2, pp. 115-128.
- KRINGOS, N. *et al.* Modelling of combined physical–mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes, Part 2: moisture susceptibility parameters. *International Journal of Pavement Engineering*. 2008b, vol. 9, núm. 2, pp. 129-151.
- KUPPENS, E. A. M. *et al.* Bitumen-ageing tests for predicting durability of porous asphalt. En DI BENEDETTO, H. y FRANCKEN, L. (eds.). *Fifth International RILEM Symposium, Mechanical Tests for Bituminous Materials*, 1997, pp. 71-77.
- LOTTMAN, R. P. y JOHNSON, D. L. *The moisture mechanism that causes asphalt stripping in asphaltic pavement mixtures*. Engineering Experimental Station. Idaho: University of Idaho, 1971.
- LU, Q. y HARVEY, J. T. Field investigation of factors associated with moisture damage in asphalt pavements. *10th International conference on asphalt pavements (ISAP)*, Quebec, 2006a, pp. 691-700.
- LU, Q. y HARVEY, J. T. *Evaluation of moisture sensitivity of hot mix asphalt by flexural beam fatigue tests*. s. l.: Asphalt Concrete (ASCE), 2006b, pp. 124-133.
- MAJILDZADEH, K. y BROVOLD, F. N. State of the art: Effect of water on bitumen-aggregate mixtures. *Highway Res. Board Special Report 98*, núm. 1456, p. 1968.
- MALLICK, R. B.; PELLAND, R. y HUGO, F. Use of accelerated loading equipment for determination of long term moisture susceptibility of hot mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*. 2005, vol. 6, núm. 2, pp. 125-136.
- MIGLIORI, F. y CORTÉ, J. F. Comparative study of RTFOT and PAV aging simulation laboratory tests. En *Transportation research record*, 1638. Washington: Transportation Research Board, 1998, pp. 56-63.
- MOHAMED, E. H. H. Debonding location in asphalt concrete associated with moisture damage. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1993, vol. 5, núm. 4, pp. 497-509.
- MOHAMMAD, J.; KHATTAK, A. M. y KYATHAM V. *Mechanistic characteristics of moisture damaged asphalt matrix and hot mix asphalt mixtures*. s. l.: Airfield and Highway Pavements, 2008.

- MONTEPARA, A. A theoretical-interpretative model of the relationship between UV-radiation ageing of bitumen and viscosity variation. *Eurobitume Workshop*, Luxemburg, 1999.
- MONTEPARA, A. y GIULIANI, F. Comparison between ageing simulation tests of road bitumen. *2nd Euraspphalt and Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures*, Barcelona, 2000, pp. 518-523.
- PETERSON, J. C. Chemistry of asphalt--Aggregate interactions relationship with pavement moisture damage test. *Transportation Research Record*. 1982, vol. 83, pp. 95-104.
- SAID, S. F. Aging effect on mechanical characteristics of bituminous mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1901. Washington, 2005, pp. 1-9.
- SHEN, J.; AMIRKHANDANIAN, S. y TANG, B. Influence of accelerated aging test temperature on the properties of binders. *International Journal of Pavement Engineering*. 2006, vol. 7, núm. 3, pp. 191-198.
- SHIAU, J.-M. *et al.* Characterization of age-hardening potential of asphalt by using Corbett-Swarbrick Asphalt Fractionation Test. En *Transportation Research Record*, 1323. Washington: Transportation Research Board, 1991, pp. 53-60.
- STUART, K. D. *Evaluation of procedure used to predict moisture damage in asphalt mixtures*. Report No. RD-8/091, Federal Highway Administration, 1986.
- VARGAS, X. A. *et al.* Asphalt rheology evolution through thermo-oxidation (aging) in a rheo-reactor. *FUEL*. 2008, vol. 87, núms. 13-14, pp. 3018-3023.
- VERHASSELT, A. F. Field ageing of bituminous binders: simulation and kinetic approach. En: DI BENEDETTO, H. y FRANCKEN, L. (eds.). *Fifth International RILEM Symposium, Mechanical Tests for Bituminous Materials*, 1997, pp. 121-128.
- WELBORN, J. Y. Physical properties as related to asphalt durability: State of the art. *Transportation Research Record*, 999. Washington: Transportation Research Board, 1984, pp. 31-36.
- WILLIAMS, T. M. y MIKNIS, F. P. Use of environmental SEM to study asphalt-water interactions. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1998, vol. 10, núm. 2, pp. 121-124.