

Análisis de la alteración del asfalto colombiano en inmersión en agua¹

Analysis of the Colombian asphalt alteration in water immersion²

Análise da alteração do asfalto colombiano em imersão em água³

Olga Atencia Herrera⁴

Carlos Enrique Daza-Velásquez⁵

Ana Sofía Figueroa-Infante⁶

Wilmar Darío Fernández-Gómez⁷

Fredy Alberto Reyes-Lizcano⁸

SICI: 0123-2126(201307)17:2<427:AAACIA>2.0.TX;2-Z

¹ Fecha de recepción: 27 de marzo de 2012. Fecha de aceptación: 6 de diciembre de 2012. Este artículo se deriva de un proyecto de investigación denominado "Efecto del agua sobre el fenómeno de *stripping*", ID patrocinador 3318, ID propuesto 4194. Desarrollado por el Grupo de Investigación CECATA, de la Pontificia Universidad Javeriana, con el apoyo de Concescol, Bogotá, Colombia.

² Received: March 27, 2012. Accepted: December 6, 2012. This article is derived from a research project entitled "Effect of water on the phenomenon of *stripping*" sponsor ID 3318, ID suggested 4194. Developed by the CECATA Research Group of the Pontificia Universidad Javeriana, with the support of Concescol, Bogotá, Colombia.

³ Data de recebimento: 27 de março de 2012. Data de aceitação: 6 de dezembro de 2012. Este artigo é derivado do projeto de pesquisa intitulado "Efeito da água sobre o fenômeno de *stripping*", ID patrocinador 3318, ID proposto 4194. Desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa CECATA, da Pontificia Universidade Javeriana, com apoio de Concescol, Bogotá, Colômbia.

⁴ Estudiante de Maestría en Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: oatencia@javeriana.edu.co.

⁵ Químico de la Universidad Nacional de Colombia. Doctorado en Ciencias-Química, de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor asistente del Departamento de Química, de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: daza-carlos@javeriana.edu.co.

⁶ Ingeniera civil, docente de la Universidad de La Salle. Estudiante de doctorado, de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: figueroaa@unisalle.edu.co.

⁷ Ingeniero civil, de la Universidad Católica de Colombia. Magíster en Ingeniería Civil, de la Universidad de los Andes. Estudiante de doctorado, de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: fernandezw@javeriana.edu.co.

⁸ Ingeniero civil, de la Pontificia Universidad Javeriana. Master en Geotecnia, de la Ecole Nationale Supérieure de Mécanique. Doctorado en Ciencias del Ingeniero, del Laboratoire Central de Ponts et Chaussées. Profesor de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: fredy.reyes@javeriana.edu.co.

Resumen

Esta investigación estudia el efecto de la oxidación inducida por la acción del agua sobre el ligante asfáltico en condición sumergida. Con el objeto de evaluar el bitumen bajo la acción del agua, se valoró el desempeño reológico, por medio de ensayos en el reómetro de corte dinámico; el físico, mediante los ensayos empíricos convencionales; y el químico, con ensayos de cromatografía líquida (fraccionamiento SARA) y espectroscopía infrarroja (IR). Los resultados demostraron que los tiempos de inmersión muestran cambios en la respuesta física y viscoelástica de los asfaltos colombianos 60/70 y 80/100, incrementándose el valor de G^* y el ángulo δ al aumentarse los tiempos de exposición al agua. Lo anterior es consecuente con lo obtenido en los análisis infrarrojos para el asfalto 60/70 y el 80/100.

Palabras clave

Agua, oxidación, ligante asfáltico, cambios físico-químicos, cambios reológicos.

Abstract

This research studies the effect of oxidation induced by the action of water on the asphalt binder in a submerged condition. With the purpose of evaluating the bitumen under the action of water, the rheology performance was assessed by testing it in dynamic shear rheometer; the physical by conventional empirical tests and the chemical with tests on liquid chromatography (fractionation SARA) and infrared spectroscopy (IR). The results showed that the immersion times show changes in the physical and viscoelastic response of Colombian asphalts at a 60/70 and 80/100, increasing the value of G^* , and the angle δ at an increased exposure time to water. This is consistent with the findings in the infrared analysis for asphalt 60/70 and 80/100.

Keywords

Water, oxidation, asphalt binder, physico-chemical changes, rheological changes.

Resumo

Esta pesquisa estuda o efeito da oxidação induzida pela ação da água sobre o ligante asfáltico em condições submersas. Com o objeto de avaliar o betume sob a ação da água foi avaliado o desempenho reológico, por intermédio de ensaios no reómetro de corte dinâmico; o físico, mediante os ensaios empíricos convencionais; e o químico, com ensaios de cromatografia líquida (fracionamento SARA) e espectroscopia infravermelha (IR). Os resultados demonstraram que os tempos de imersão mostram mudanças na resposta física e viscoelástica dos asfaltos colombianos 60/70 e 80/100, incrementando o valor de G^* e o ângulo δ ao aumentar os tempos de exposição à água. Isto é consequente com o obtido em análises infravermelhas para o asfalto 60/70 e 80/100.

Palavras-chave

Água, oxidação, ligante asfáltico, mudanças físico-químicas, mudanças reológicas.

1. Introducción

Desde su descubrimiento hasta el día de hoy, el asfalto constituye uno de los materiales más usados por la humanidad; pues, además de permitir su aplicación en la pavimentación de carreteras, también aporta economía y versatilidad a la construcción en el campo vial. Muestra de esto es el hecho de que el 96% de la red vial de Estados Unidos, el 70% de las vías de Colombia y el 35% de las vías en Bogotá fueron construidas en asfalto (ECOPETROL, 2003; NCAT, 1999).

Sin embargo, resultados del envejecimiento acelerado obtenido mediante simulación en el laboratorio de agentes ambientales y el paso del tiempo demuestran la susceptibilidad de este material a la intemperie, perdiendo así sus cualidades, funcionalidad y posterior durabilidad; se concluye que el principal causante del deterioro es el proceso de oxidación (envejecimiento por inclusión de oxígeno), el cual es ocasionado por agentes como agua, rayos UVB y UVA, temperatura, tráfico y cargas (Bahía, H. y Anderson, 1995; Afanasieva, 1999; Petersen, 2000; Ruan *et al.*, 2003; Qi y Wang, 2004; Petersen, 2009 y Lesueur, 2009; Rajan *et al.*, 2010).

El desconocimiento de los procesos físico-químicos del envejecimiento por oxidación ha motivado la elaboración de recientes investigaciones encaminadas a determinar la forma en que contribuye cada agente externo en el deterioro de una mezcla, a través de los efectos causados en los ligantes asfálticos (Anderson *et al.*, 1994; Bahía, H. y Anderson, 1995; Wahhab *et al.*, 1998; Afanasieva, 1999; Ruan *et al.*, 2003; Martínez y Caicedo, 2005; Rajan *et al.*, 2010). Por ello, con esta investigación se estudia el efecto de oxidación inducido por acción aislada del agua sobre el bitumen.

Con el objeto de valorar la proporción de efectos de la oxidación producidos por la acción del agua, se evaluó el comportamiento físico mediante ensayos de caracterización estandarizados, y químico mediante técnicas instrumentales IR-infrarrojo del bitumen frente a la interacción con esta, tanto en estado “fresco” como sumergido durante nueve meses, en cinco etapas de verificación, a uno, tres, seis y nueve meses de inmersión; de modo que se pudiera calificar y cuantificar cómo afectó esta a través del tiempo.

2. Metodología

Dos tipos de asfalto colombiano fueron evaluados y comparados en cinco tiempos diferentes de exposición al agua. Los dos tipos de asfalto se evaluaron en condición original, para luego ser sumergidos en agua durante nueve meses, exponiéndose al oxígeno disuelto. Para ello se dispusieron películas de cada tipo de asfalto en láminas de 2 mm de espesor, a una temperatura promedio de 16 °C, con oxígeno controlado. Para la evaluación se realizó seguimiento a sus características físicas mediante los ensayos normalizados y a las características viscoelásticas, empleando el reómetro de corte dinámico (DSR).

Adicional a las mediciones anteriores, se realizó la separación por cromatografía según la ASTM D-4124 (2009) y posteriormente se aplicaron técnicas de espectroscopia infrarroja (FT-IR), que determinaría la presencia de grupos carbonilos como una medida de la oxidación. Se calculó el área medida bajo la banda de carbonilos entre 1.650 hasta 1.820 cm^{-1} , centrada en 1.710 cm^{-1} , sobre el área bajo la banda de sustituciones de los grupos alquilo centrada en 2.939 cm^{-1} como un parámetro indicador de oxidación, y fue reportado como el parámetro de carbonilos (Cp).

2.1. Materiales

Se utilizó el bitumen de la refinería de Barrancabermeja con denominación 60/70 y 80/100. Los asfaltos estudiados se encuentran en la tabla 1.

- Ensayos de caracterización física: viscosidad Brookfield avaluada desde 80 °C hasta 180 °C (176 -356 °F), penetración en 5 s, 25 °C (77 °F) y 100 g, ductilidad a 5 cm/min y 25 °C (77 °F), punto de ablandamiento en agua destilada, punto de ignición y llama y peso específico.
- Ensayos de caracterización reológica: DSR a 10 rad/s, RTFOT y PAV.
- Ensayos de caracterización química: SARA (separación cromatográfica según ASTM D-4124), espectroscopia infrarroja (FT-IR) y resonancia magnética nuclear (RMN).

3. Resultados y discusión

3.1. Ensayos de caracterización física

Los resultados obtenidos para los asfaltos estudiados cumplieron la normativa colombiana con base en la penetración, al encontrarse en los rangos especificados por el Instituto Nacional de Vías (Invías) (tabla 2).

Tabla 1. Muestras del asfalto estudiado

Denominación del asfalto	Convención	Significado
60/70	60/70 o 0 MS	Asfalto 60-70 condición fresca
	60/701 ms o 1 MS	Asfalto 60-70 un mes en inmersión
	60/703 ms o 3 MS	Asfalto 60-70 tres meses en inmersión
	60/706 ms o 6 MS	Asfalto 60-70 seis meses en inmersión
	60/709 ms o 9 MS	Asfalto 60-70 nueve meses en inmersión
80/100	80/100 o 0 MS	Asfalto 80-100 condición fresca
	80/1001 ms o 1 MS	Asfalto 80-100 un mes en inmersión
	80/1003 ms o 3 MS	Asfalto 80-100 tres meses en inmersión
	80/1006 ms o 6 MS	Asfalto 80-100 seis meses en inmersión
	80/1009 ms o 9 MS	Asfalto 80-100 nueve meses en inmersión

Fuente: presentación propia de los autores.

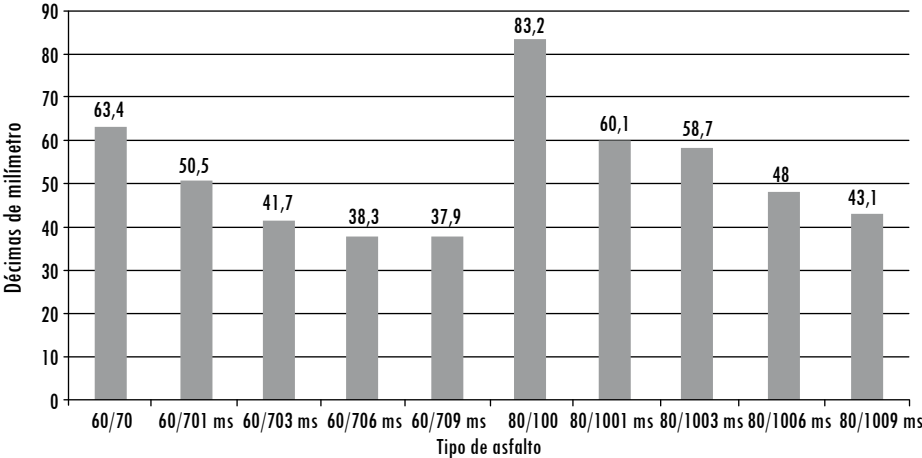
Tabla 2. Resultados obtenidos y su comparación con la normas Invías

Característica evaluada	Unidad	Norma de Ensayo I. N. V.	60/70 Norma Invías		Obtenido para 60/70	80/100 Norma Invías		Obtenido para 80/100
			Mín.	Máx.		Mín.	Máx.	
Penetración	0,1 mm	E-706-07	60	70	63,4	80	100	83,2
Índice de penetración	-	E-724-07	-1	+1	0	-1	+1	0,26≈0,3
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	cm	E-702-07	100		> 110	100		> 144
Punto de ignición copa abierta de Cleveland	°C	E-709-07	230		323	230	361	358
Gravedad específica	-	E-707-07	-	-	1,012	-	-	1,007
Pérdida por calentamiento en película delgada (163 °C)	%	E-721-07	-	1	0,3	-	1	0,5
Penetración del residuo en %, de la penetración original	%	E-706-07	52	-	62	48	-	61

Fuente: presentación propia de los autores.

Posterior a la verificación anterior se realizó el seguimiento de las características físicas en todos los periodos de inmersión propuestos, para evidenciar la variación de la penetración, puntos de ablandamiento, ductilidad, y punto de ignición y llama de los materiales asfálticos en los tiempos de inmersión (OMS, 1MS, 3MS, 6MS y 9MS). Se observó en la primera figura que las penetraciones disminuyeron en el tiempo, para los dos tipos de material asfáltico (figura 1). Las disminuciones fueron mayores al extenderse los periodos de inmersión, ya que a mayor tiempo de exposición al agua, se observó menor valor de la penetración, respecto al resultado inicial.

Figura 1. Penetración de los materiales asfálticos en el tiempo



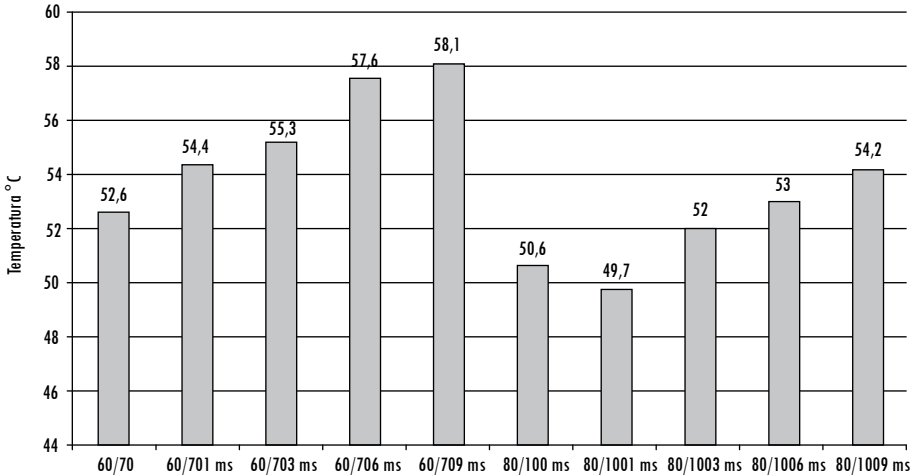
Fuente: presentación propia de los autores.

Así también, para los resultados de “punto de ablandamiento” de los asfaltos 60/70 y 80/100 se observó un incremento de la temperatura de ablandamiento a medida que se extendió el tiempo de exposición (Wahhab *et al.*, 1998 y Oyekunle, 2007). Luego se observó el anterior comportamiento, incluso al comparar el valor inicial y final de cada tiempo de prueba, pero en el 80/100 esta proporción se perdió al primer mes y retornó al tercero, lo cual es un comportamiento no esperado (figura 2).

En cuanto a la ductilidad (figura 3), se observó que en ambos materiales esta disminuyó con el tiempo de inmersión, al comparar valor inicial y final; fueron más visibles los cambios reportados para el asfalto 60/70 que para el 80/100 (aunque en ambos casos no se observó un comportamiento predecible). Esta

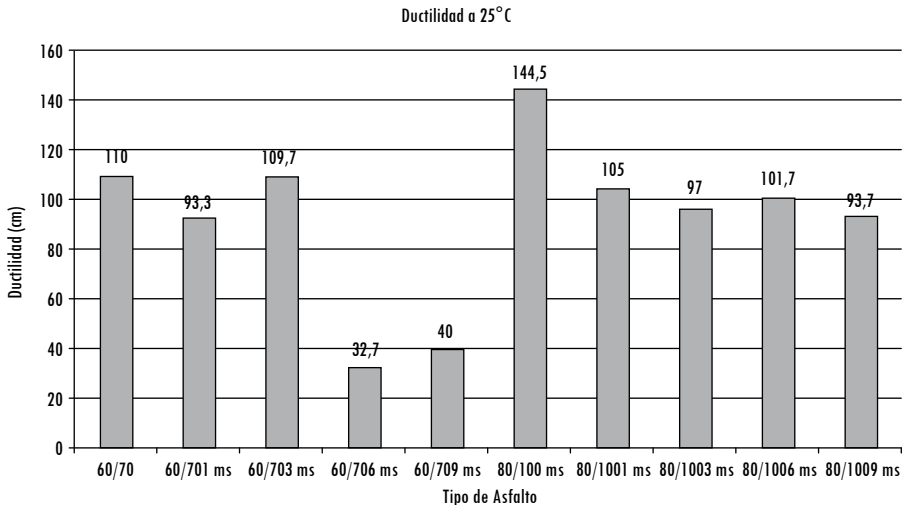
disminución se mostró como un comportamiento típico de los asfaltos que han desarrollado alguna reacción con el oxígeno (Ruan *et al.*, 2003; Petersen, 2009; Rondón y Moreno, 2010).

Figura 2. Punto de ablandamiento de los materiales asfálticos en el tiempo



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 3. Ductilidad de los materiales asfálticos en el tiempo

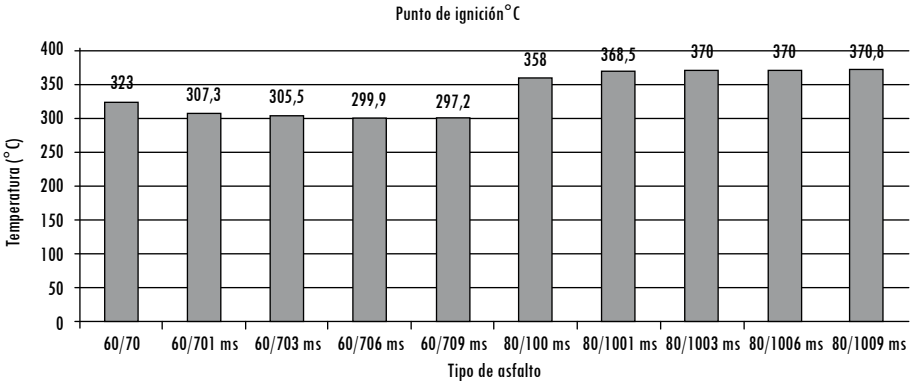


Fuente: presentación propia de los autores.

Por otra parte, para el punto de llama, a mayor tiempo de inmersión menos gases volátiles se concentraron en la parte superior de la copa de Cleveland para el asfalto 80/100. Aunque los niveles de oxidación son diferentes en agua que en otros métodos de envejecimiento por calentamientos extendidos, este incremento podría explicarse como un fenómeno similar a lo ocurrido durante las pérdidas en peso reportadas por los asfaltos tras un envejecimiento en RTFOT, en el cual dichas pérdidas se presentan por la disipación de gases volátiles durante el proceso de oxidación (figura 4), de acuerdo con Ruan *et al.* (2003) y Qi y Wang (2004).

Contrario a lo anterior, el asfalto colombiano 60/70 presenta disminución en la seguridad, mostrándose cada vez más flamable (I. N. V.-709, 2007). Esto implica la presencia de otro componente perteneciente al agua que reaccionó con el asfalto 60/70 e hizo de este un material más comburente; sin embargo, en investigaciones posteriores deben realizarse las pruebas al agua que determinen la presencia de una sustancia desconocida (figura 4).

Figura 4. Puntos de ignición para los asfaltos colombianos 60/70 y 80/100



Fuente: presentación propia de los autores.

4. Ensayos de caracterización reológica

Se realizó la viscosidad absoluta a 60 °C, utilizando el reómetro de corte directo y un viscosímetro convencional. Los resultados y valores mínimos de acuerdo con la norma colombiana se observan en la tabla 2.

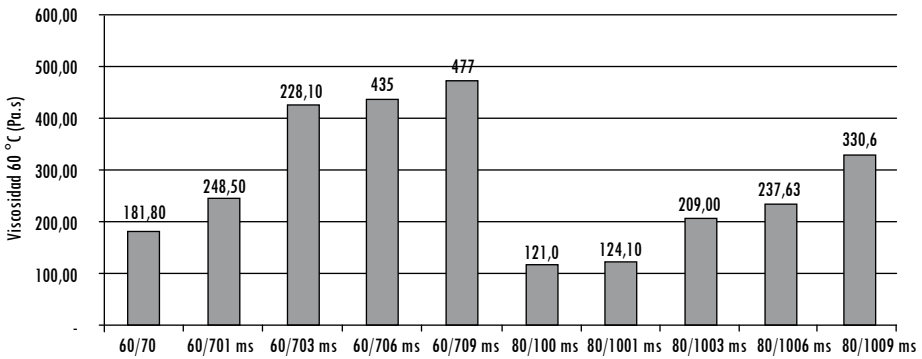
El resultado de la viscosidad absoluta expresada en pascales por segundo (Pa.s) se muestra en la figura 5. Estos fueron obtenidos mediante el equipo DSR, al ensayar una probeta de asfalto bajo una condición de esfuerzos cortantes, a una temperatura de 60 °C.

Tabla 2. Resultados reológicos controlados por Invías (2007)

Característica evaluada	Und.	Requerido Invías 60/70	Obtenido DSR 60/70	Requerido Invías 80/100	Obtenido DSR 80/100
Viscosidad absoluta (60 °C)	Poises	1500	1818	1000	1210
	Pascales por segundo	150	181,8	100	121

Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 5. Viscosidad absoluta, en los tiempos de prueba establecidos

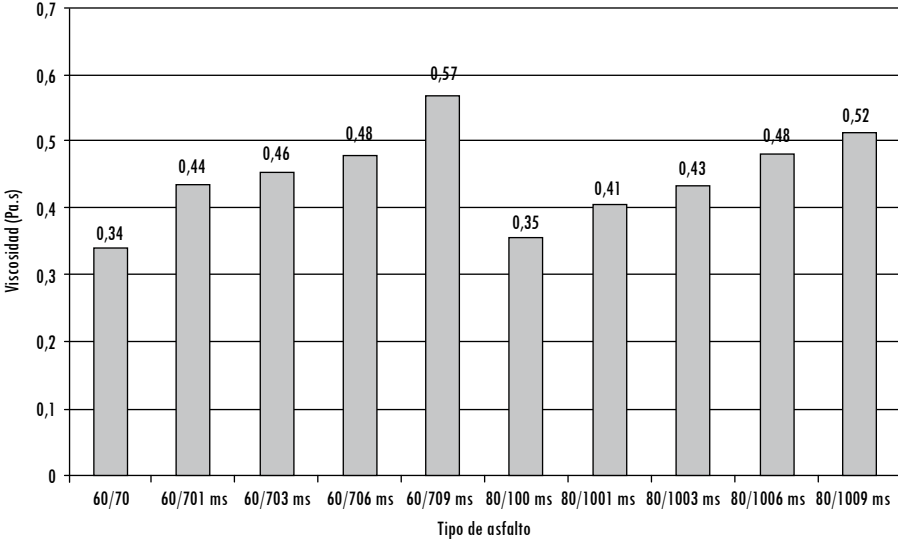


Fuente: presentación propia de los autores.

En la figura 6 se muestran los resultados de la viscosidad de bombeo a 135 °C en pascales por segundo (Pa.s) para los distintos materiales asfálticos durante los periodos de prueba. Se obtuvo un incremento de la viscosidad en las temperaturas óptimas de mezclado y compactación para los ligantes empleados en mezclas asfálticas colombianas. El incremento en la viscosidad del asfalto representó el grado de rigidez que los materiales asfálticos ganaron con el tiempo de inmersión. *Clasificación PG (performance grade) asfalto 60/70 en todos los tiempos de prueba*

Se obtuvo la clasificación final por grado de desempeño para la máxima temperatura y la temperatura de fatiga; para temperaturas negativas no se realizó la clasificación debido a que en Colombia no se presentan (tabla 3).

Figura 6. Viscosidad Brookfield (135 °C) en los tiempos de prueba



Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 3. Temperaturas máximas de PG (°C) para todas las muestras

PG	0 MS	1 MS	3 MS	6 MS	9 MS
60/70	64	64	64	70	70
80/100	58	58	64	64	64

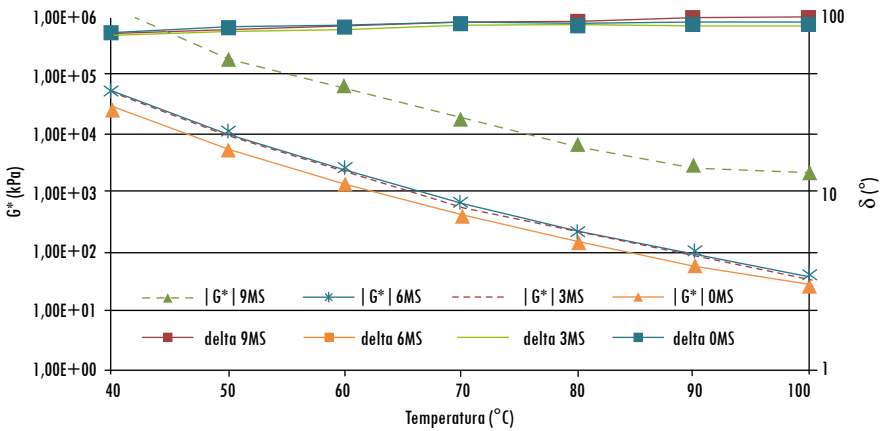
Fuente: presentación propia de los autores.

De modo comparativo, se evaluó la evolución del ángulo de fase y módulo complejo para el asfalto 60/70 en las mismas temperaturas empleadas para el asfalto 80/100. En la evaluación de los ángulos de fase para los dos tipos de asfalto, en la misma temperatura, se puede observar que el ángulo reportado inicialmente para el asfalto 80/100 presenta mayor valor que el reportado para el 60/70. Esto implica un comportamiento más elástico del primero y más rígido del segundo. Lo anterior se traduce en la resistencia a las fallas más frecuentes, es decir, el material más blando (cuyo ángulo de fase es mayor) resistirá más a las fallas por fatiga, y el más duro resistirá mejor a las fallas por ahuellamiento, de acuerdo con Hardin (1995) (figura 7).

A bajas temperaturas o altas frecuencias, los asfaltos tienden a aproximarse al valor límite de G* de aproximadamente 1 GPa y un valor límite del ángulo

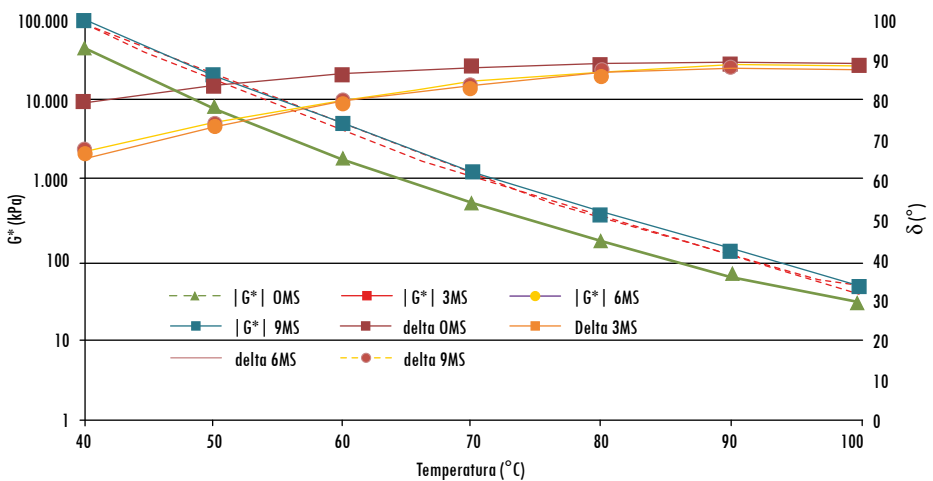
δ de 0 grados. El valor de 1 GPa refleja la rigidez del enlace carbono-hidrógeno de los asfaltos cuando estos alcanzan un mínimo equilibrio termodinámico. El valor de 0 grados representa la naturaleza completamente elástica de los asfaltos a estas temperaturas, consecuente con lo reportado con Hardin (1995) y Rajan *et al.* (2010). Este comportamiento se observa en la figura 7.

Figura 7. Variación del módulo complejo (G^*) y ángulo de fase (δ) para los diferentes tiempos de inmersión del asfalto 80/100



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 8. Variación del módulo complejo (G^*) y ángulo de fase (δ) para los diferentes tiempos de inmersión del asfalto 60/70



Fuente: presentación propia de los autores.

Se observa en la figura 8 que cuando la temperatura aumenta, G^* decrece, en tanto que δ se incrementa. Esto indica que existe mayor susceptibilidad a la deformación plástica. Esta variación es dependiente de la composición de los asfaltos. Algunos mostrarán un rápido decremento con la temperatura o frecuencia; otros mostrarán un cambio gradual. Aunque es posible que distintos asfaltos muestren significantes diferencias en las combinaciones de G^* y δ , esto corrobora lo conseguido con Hardin (1995) y Rajan *et al.* (2010).

Adicionalmente, se observa que a altas temperaturas, los valores de δ se aproximan a 90°C para todos los asfaltos que reflejan un comportamiento completamente viscoso, o completa disipación de la energía en un fluido viscoso. El valor de G^* varía significativamente, reflejando las diferentes propiedades de consistencia de los asfaltos (principalmente viscosidad y penetración). Lo obtenido coincide con lo afirmado por Hardin (1995) y Rajan *et al.* (2010).

5. Caracterización química

El cambio en el comportamiento de las características físicas y reológicas de los asfaltos en estudio, bajo exposición de los diferentes tiempos de inmersión en agua, obedece a las alteraciones internas producidas por reacciones oxidantes entre el agua y el bitumen. Por ello, fue necesario efectuar la caracterización química de los asfaltos en cada tiempo de prueba, de forma que permitiera determinar la variación en la composición química de las muestras estudiadas.

Luego de la separación de las fracciones pesadas de ambos tipos de asfalto en diferentes tiempos de exposición al agua se realizó espectroscopía IR por vía líquida, con el objeto de determinar la aparición de grupos funcionales que reflejasen un grado de oxidación. Mediante la implementación de este ensayo se obtuvieron los espectros mostrados a continuación.

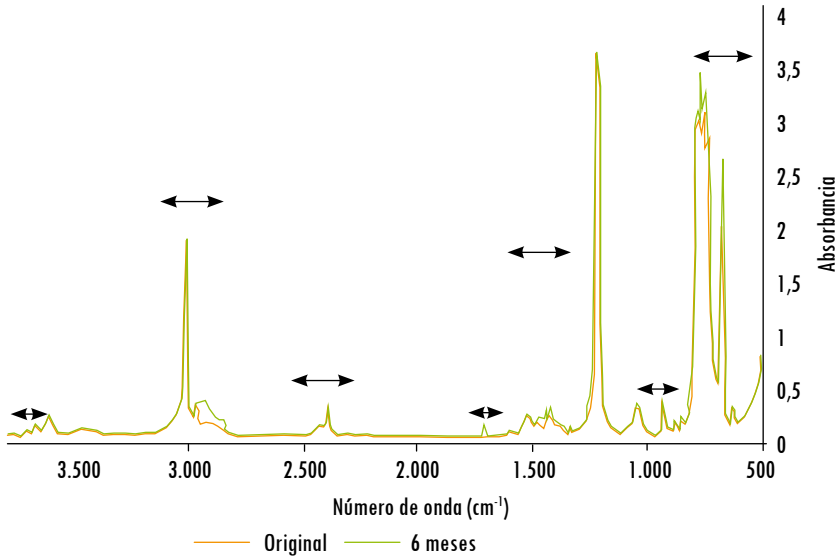
5.1. Caracterización por espectroscopia infrarroja (FT-IR)

Espectros infrarrojos del asfalto 60/70

Para determinar los cambios producidos al asfalto 60/70 (figura 9) se tomaron espectros para cada fracción, así como también de los asfaltos completos, tanto en condición original como a distintos periodos de inmersión. Con lo anterior, se pudo establecer un punto de partida que permitiese un seguimiento a los grupos carbonilo y/o carboxilo que se presentasen en los espectros de estas muestras los primeros seis meses de inmersión, debido a que mediante este análisis se puede revelar información acerca de los grupos funcionales y de los consti-

tuyentes hidrocarbonados que conforman los asfaltos evaluados. Del mismo modo, se realizó la mencionada comparación para el asfalto 80/100 (figura 9).

Figura 9. Espectro IR del 80/100 en condición original y 6 MS



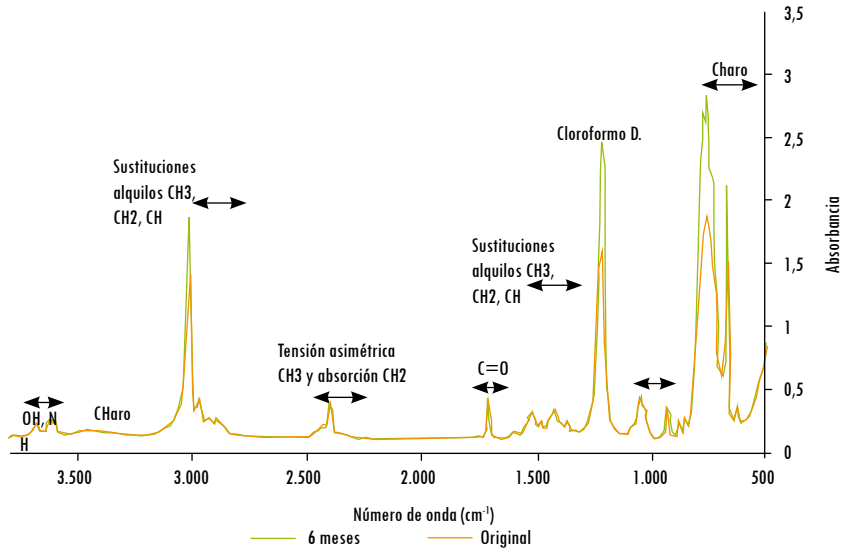
Fuente: presentación propia de los autores.

Para mostrar los grupos funcionales de interés, los resultados se muestran en una región comprendida entre 3.500 y 500 cm^{-1} . En esta región se comparan las muestras originales sin fraccionamiento (asfalto completo original) y al sexto mes de inmersión (asfalto completo a seis meses). En las figuras se identifican las regiones típicas de aparición de los grupos funcionales presentes en los asfaltos.

Estos son, en términos generales, los resultados de las bandas comunes arrojadas por la espectroscopía infrarroja. Sin embargo, el seguimiento y verificación al que debe efectuarse un mayor énfasis es al pico correspondiente a la región de 1.710 cm^{-1} , que expresa tensiones $\text{C}=\text{O}$; consecuentemente, la magnitud de la señal representa qué tan fuerte es la absorción de energía de estos grupos funcionales al ser caracterizados y, por ende, determinan el grado de oxidación experimentado por una muestra de asfalto en los tiempos de inmersión propuestos (Yoon S. *et al.*, 2008).

La variación de la cantidad de asfaltenos respecto al punto de ablandamiento siguió una tendencia incremental. Como se observa en las figuras 8 y 9 para los asfaltos 80/100 y 60/70, respectivamente (Anderson, D. A *et al.*, 1994; Oyekunle L. O., 2007 y Lesueur Didier, 2009).

Figura 10. Espectro IR del asfalto 60/70 en condición original y 6 MS



Fuente: presentación propia de los autores.

6. Conclusiones

Se pudo establecer que existió una variación notable en las propiedades físicas (mecánicas) de los asfaltos en estudio a través del tiempo, desde 0 hasta 9 meses de inmersión, la cual muestra una marcada incidencia del agua en el envejecimiento oxidativo del asfalto. Son más notables los cambios en el asfalto 60/70 que en el 80/100.

Así también, en los ensayos reológicos se observó que al pasar el tiempo hubo una rigidización del ligante, evidenciado en el incremento del módulo complejo y disminución del ángulo de fase, volviéndose más viscoso al incrementarse el periodo de inmersión en agua. Eso indica la existencia de una relación estrecha entre la viscosidad y la penetración de los asfaltos, ya que la variación de la viscosidad Brookfield a 135 °C y la absoluta a 60 °C, en los diferentes tiempos de inmersión, fueron indicios importantes del endurecimiento en ambos tipos de asfalto. Luego, al incrementarse la rigidez de los asfaltos estudiados, a través de los parámetros de viscoelásticos (G^* , $\text{Sen}(\delta)$, $G^*/\text{Sen}(\delta)$ y $G^*/\text{Sen}(\delta)$) evaluados en el reómetro de corte dinámico, DSR.

En cuanto a los análisis químicos, se pudo obtener de los espectros FTIR que los grupos funcionales esperados en un proceso de oxidación como O-H, C = O y S = O, localizados en las posiciones 3250, 1700 y 1030 cm^{-1} (Qi y Wang, 2004), solo se presentaron indicios de C = O, localizados alrededor de 1700. Así también, la energía de activación de flujo a los nueve meses de inmersión

(calculada a partir de los resultados de viscosidad Brookfield) fue mayor que su respectivo original, lo cual es una señal de que en periodos superiores a los nueve meses de inmersión se debe esperar incremento en la viscosidad y debe necesitarse mayor energía para que pueda fluir dicho asfalto.

Es decir, los asfaltos sumergidos en agua están expuestos a envejecimiento oxidativo y su consecuencia se traduce en una rigidización (Petersen, 2009). Por ello, es acertado inferir que la acción aislada del agua produce oxidación en los asfaltos colombianos 60/70 y 80/100, causada por transformaciones en su composición química, mostrando una variación en los ensayos empírico-mecánicos: de ductilidad, penetración, punto de ablandamiento y punto de ignición, principalmente. Por lo tanto, el agua como agente externo deteriora física y químicamente las cualidades específicas del ligante asfáltico, lo cual conduce a la disminución de la durabilidad de los asfaltos colombianos.

Referencias

- AFANASIEVA, N.; ÁLVAREZ CIFUENTES, M.; PUELLO, J. Envejecimiento de los Asfaltos Colombiano baja la Influencia de los Diferentes Factores Climáticos. *10° Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*. 1999, Sevilla.
- ANDERSON, D. A et al. *Binder Characterization and Evaluation. Volume 3: Physical Characterization*. Strategic Highway Research Program National Research Council, 1994.
- ASTM D4124. Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions. *Annual Book of ASTM, American Society for Testing and Materials*, 2009.
- BAHÍA, H., y ANDERSON, D. A. *The Pressure Aging Vessel (PAV): A Test to Simulate Rheological Changes Due to Field Aging*. Physical Properties of Asphalt Cement Binders, John C. Hardin. 1995.
- ECOPETROL. *Carta Petrolera*. 2003. Edición 108 abril - mayo. Bogotá D.C.
- HARDIN, J. C. *Physical properties of asphalt cement binders*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1995. index.html. (consulta 31/01/12).
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma E-702-07. Ductilidad de los materiales asfálticos. *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías, 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma E-706-07. Penetración de los materiales asfálticos. *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías, 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma E-707-07. Gravedad específica de materiales asfálticos sólidos y semisólidos. Método del picnómetro. *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías, 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma E-709-07. Puntos de ignición y llama mediante la copa abierta de Cleveland. *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías, 2007.

- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma E-712-07. Punto de ablandamiento de materiales Bituminosos (Aparato de Anillo y Bola). *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías, 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma E-717-07. Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro Rotacional. *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías, 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma E-721-07. Ensayo al horno de lámina asfáltica delgada en movimiento. *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías, 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Norma E-724-07. Índice de penetración de cementos asfálticos. *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías, 2007.
- LESUEUR, D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009, vol. 145, núm. 1-2, pp. 42-82.
- MARTÍNEZ, G. y CAICEDO, B. *Efecto de la radiación ultravioleta en el envejecimiento de ligantes y mezclas asfálticas*. Bogotá: Universidad de los Andes, 2005.
- NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY (NCAT). Welcome to NCAT (documento en línea). 1999. <http://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/about/>
- OYEKUNLE, L. O. Influence of Chemical Composition on the Physical Characteristics of Paving Asphalts. *Petroleum Science and Technology*. 2007, vol. 25, núm. 11, pp. 1401-1414.
- PETERSEN, J. C. *A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation: Chemical, Physicochemical, Physical Property, and Durability Relationships*. Transportation Research Board. 2009.
- PETERSEN, J. C. Chapter 14 Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability. *Asphaltenes and Asphalts*. 2000, vol. 2. pp. 363-399.
- QI, Y. y FENGXIU, W. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. II. Chemical group composition and structure changes. *Petroleum Science and Technology*. 2004, vol. 22, núm. 3-4, pp. 263-274.
- RAJAN, N. K.; SELVAVATI, V.; SAIRAM, B., et al. Influence of Asphaltenes on the Rheological Properties of Blended Paving Asphalts. *Petroleum Science and Technology*. 2010, vol. 28, núm. 4, pp. 331-350.
- RONDÓN, H. y MORENO, L. Influencia del Agua en el Fenómeno de Stripping: Estudio sobre el Ligante. *Ingeniería y Universidad*. 2010, vol. 14, núm. 2, pp. 297-312.
- RUAN, Y.; DAVISON R. R. y GLOVER C. J. An Investigation of Asphalt Durability: Relationships Between Ductility and Rheological Properties for Unmodified Asphalts. *Petroleum Science and Technology*. 2003, vol. 21, núm. 1-2, pp. 231-254.
- WAHHAB, A.; AL-DUBABE, A.; ASI, M., et al. Performance-based characterization of Arab asphalt. *Building and Environment*. 1998, vol. 33, núm. 6, pp. 375-383.
- YOON, S.; DURGASHANKER, S.; LEE, W., et al. Separation and characterization of bitumen from Athabasca oil sand. *Korean Journal Of Chemical Engineering*. 2008, vol. 1, núm. 26, pp. 64-71.