

ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO DE ASFALTOS MODIFICADOS EN FUNCIÓN DEL CAMBIO EN SUS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y SU DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS SEGÚN LA MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA

Rafael Ernesto Villegas Villegas
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
rafael.villegas@ucr.ac.cr

José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
jose.aguiar@ucr.ac.cr

Jorge Salazar Delgado
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
jorge.salazardelgado@ucr.ac.cr

Ellen Rodríguez Castro
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
ellen.rodriguez@ucr.ac.cr

Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D.
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Alejandro Navas Carro, M.Sc.
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
alejandro.navas@ucr.ac.cr

Resumen

Es importante tanto para el fabricante como para el proceso constructivo, conocer que tan estable es su asfalto modificado al almacenamiento y cuál es el tiempo máximo de utilización del mismo, ya sea en tanque o su eventual traslado al proyecto de interés.

Para una buena estabilidad en un asfalto modificado es importante tener en cuenta el tipo de polímero utilizado, la naturaleza del asfalto, la interacción polímero-asfalto y el proceso de modificación. Es relevante recalcar que este último aspecto es primordial en este estudio, pues en la inmensa mayoría de plantas asfálticas en Latinoamérica los tanques donde se guardan los asfaltos (tanto originales como modificados) no disponen de mecanismos de homogenización continuos, en contraposición a los métodos de modificación asfáltica, donde la agitación mecánica del sistema es fundamental.

En este estudio el primer paso realizado fue diseñar y construir un tanque de almacenamiento a escala con tres válvulas a diferentes alturas. Esta configuración permite observar la consistencia del asfalto debido a la altura y la cinética de almacenamiento, que puede ser en horas o días.

Los resultados de las mediciones predicen el tiempo de almacenaje de los asfaltos modificados, respaldados por las mediciones en las variaciones de las propiedades reológicas del material, medido con el reómetro dinámico de cortante (DSR) y por la observación directa de la distribución del polímero en la matriz asfáltica realizada con Microscopia de Fuerza Atómica (AFM). De esta manera es posible observar el tamaño, forma, cantidad y distribución de partícula de forma tridimensional y realizar comparaciones en el tiempo, tanto en el cambio de desempeño como en la visualización del polímero efectivo en el asfalto modificado.

Resumo

É importante para o fabricante e para o processo construtivo, conhecer que tão estável é seu asfalto modificado quando é armazenado e qual é o tempo máximo para sua utilização, já seja no tanque ou seu eventual traslado ao projeto de interesse.

Para obter uma boa estabilidade num asfalto modificado é importante considerar o tipo de polímero utilizado, a natureza do ligante asfáltico, a interação polímero-asfalto e o processo de modificação. É importante ressaltar que este último aspecto é fundamental neste estudo, porque a maioria das plantas asfálticas na América Latina, os tanques onde mantêm-se os asfaltos (originais ou modificados) não possuem mecanismos de homogeneização contínuas, ao contrário aos métodos de modificação asfáltica, nos quais o sistema de agitação mecânica é essencial.

Neste estudo, o primeiro passo realizado foi projetar e construir, a pequena escala, um tanque de armazenamento com três válvulas em alturas diferentes. Esta configuração permite observar a consistência do ligante devido à altura e a cinética de armazenamento, que pode ser em horas ou dias.

Os resultados das medições podem prever o tempo de armazenamento dos asfaltos modificados, lastreados pelas medições nas variações das propriedades reológicas do material, com medições feitas com o reómetro dinâmico de cisalhamento (DSR) e pela observação direta da distribuição do polímero na matriz asfáltica realizada com Microscopia de Força Atômica (AFM). Assim, é possível observar o tamanho, a forma, a quantidade e distribuição de partículas em três dimensões e fazer comparações no tempo, tanto na mudança do desempenho como na visualização do polímero efetivo no asfalto modificado.

INTRODUCCIÓN

La utilización de asfaltos modificados es cada vez más común en la industria de las carreteras, siendo el asfalto en sí mismo un material difícil de trabajar y controlar, los modificados son a su vez más complejos que el asfalto original. El primer paso en el proceso de modificación asfáltica es tener claro a modo general, cuales son las etapas necesarias para obtener un producto bien incorporado y con las características de desempeño optimas según el diseño. Es importante mencionar que la metodología de modificación de asfaltos utilizada en LanammeUCR consta de tres etapas:

1. Caracterización físico-química de los materiales involucrados en la modificación y diseño del proceso.
2. Estudio y control de la cinética del proceso de incorporación del polímero en el asfalto.
3. Control de calidad del asfalto modificado basado en la caracterización físico-química del material y la evaluación de desempeño a las condiciones para las cuales fue diseñado.

Una vez diseñado el asfalto modificado es importante conocer cuál es el tiempo máximo de estabilidad del mismo, determinando en el tiempo la cinética en la cual el material deja de ser homogéneo y se da el cambio en las propiedades del mismo, identificando la repercusión que esto tiene en la calidad del producto ofrecido (Lu et al. 2010; Fu et al., 2006).

Para este trabajo el polímero utilizado es SBS, pues es un modificando altamente utilizado y estudiado, con el cual la mayoría de los lectores se identifican. Por otro lado el equipo utilizado en el condicionamiento del material es de fácil construcción y los ensayos de laboratorio van desde ensayos comunes en los diferentes laboratorios, hasta equipos de alta tecnología que brindan información importante para el usuario.

Método de modificación y equipo de para análisis de estabilidad

Lo primero que se define para la elaboración del dispositivo de almacenamiento es tratar de definir un modelo de comportamiento del polímero en la matriz asfáltica. Se asume que el

comportamiento del asfalto modificado es una suspensión, donde el polímero es semi-lifóbico (semi compatible con el asfalto) y la forma en que se separan es por floculación o flotación. De esta manera y asumiendo lo anteriormente expuesto el volumen de separación del polímero viene dado por la Ley de Stokes: $V_s = g/18 \cdot (\rho_s - \rho)/\rho \cdot d^2 / \eta$, donde g es constante de la gravedad, ρ_s densidad del polímero, ρ densidad del asfalto, d^2 diámetro de partícula al cuadrado y η viscosidad cinemática.

La utilización directa de esta ecuación en el cálculo de la velocidad de separación es de difícil aplicación directa, pues la temperatura de almacenamiento ronda los 165 °C, lo que dificulta la medición de las densidades del asfalto y el polímero, además la separación del polímero del asfalto para determinar el tamaño de partícula dentro del modificado después del proceso de modificación, resulta extremadamente difícil de realizar.

Si lo que se necesita en planta es tener la certeza del tiempo máximo de almacenamiento del modificado, es imprescindible dotar al material de las condiciones más extremas de almacenamiento al que será expuesto. Es por esto que basado en el modelo anteriormente descrito, la visión que se tiene del tanque, para obtener la máxima severidad en el almacenado, cambia de un tanque de almacenamiento a un tanque de sedimentación.

De la ecuación anterior se observa la importancia que tiene el tamaño de partícula y la temperatura en la velocidad de separación, a mayor tamaño de partícula, mayor velocidad de separación y a mayor temperatura, menor viscosidad, lo que beneficia la separación del polímero en el asfalto. Por otro lado el diferencial de densidades entre ambos hace que el polímero se sedimente o flote.

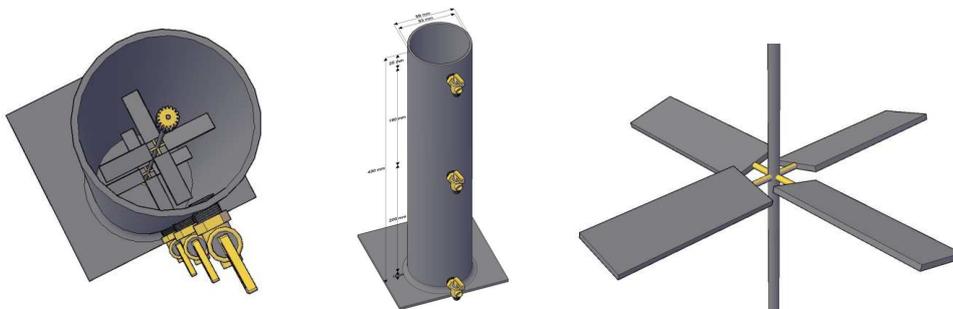
La importancia de lo anteriormente expuesto tiene que ver con las dimensiones del dispositivo. Para este proyecto en específico se escogió un tanque de almacenamiento vertical por los siguientes motivos: 1) son muy utilizados en la industria y 2) de un estudio de mercado de tanques existentes (30 a 114 m³) se tiene que la relación largo/ancho varía entre 1,5 y 2,9.

Se conoce que la magnitud de esa relación debe producir las condiciones hidráulicas para minimizar la separación. Esto normalmente ocurre entre cuando la relación anterior oscila entre los una relación 3/1 y 5/1, siendo la posterior la que más aumenta la velocidad de separación (Kenimer et al, 2005).

Por tanto, el dispositivo construido tiene de ancho 83 mm y de largo 430 mm, con una relación largo/ancho de aproximadamente 5/1, lo que permite evaluar la estabilidad al almacenamiento del asfalto modificado a las condiciones más críticas.

El dispositivo utilizado para el almacenamiento del asfalto modificado utilizado en este estudio se muestra en la Figura 1. Aunque se puede incorporar un sistema de agitación, el mismo no se utilizó para cuantificar la tasa de separación del asfalto y el aditivo más crítica.

Figura 1: Equipo desarrollado para análisis de estabilidad



El asfalto modificado fue preparado en un equipo de corte a partir de un asfalto base AC-30. El tamaño de partícula utilizado es el nominal del fabricante y el proceso de mezclado se realizó a 180°C durante 5 horas. Dicho asfalto modificado fue vertido en el dispositivo de almacenamiento y dejado en reposo a una temperatura de 165 °C dentro de un horno de convección forzada durante 192 horas y se tomaron muestras durante todo el periodo de tiempo.

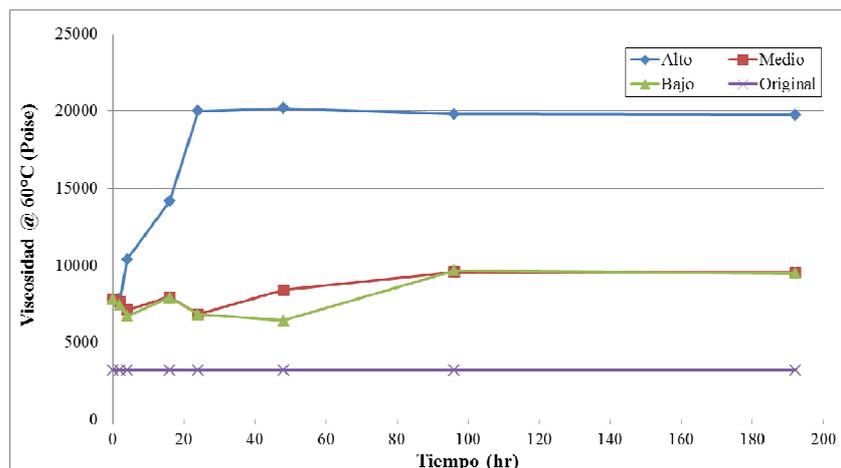
Evaluación de la Estabilidad del Asfalto Modificado

Viscosidad Absoluta DSR (η^* a 60°C)

La viscosidad es la capacidad de fluir que posee el material, esta propiedad está lejos de un verdadero control de desempeño del asfalto, pues solo es capaz de describir el comportamiento de la componente viscosa, pero no brinda información de la componente elástica. Este método es quizás el más utilizado por la posibilidad de contar con un equipo que realice estas mediciones, pero por otro lado es el que más identificado está gran parte de gremio del asfalto.

Se realizaron mediciones de viscosidad en distintos momentos (desde $t = 0$ h hasta $t = 196$ h), tanto en los niveles alto, medio y bajo del dispositivo y se compararon con la viscosidad del asfalto original. Los resultados se muestran en la Figura 2.

Figura 2: Comparación de viscosidad a distintas alturas del dispositivo de almacenamiento



De la figura se evidencia un incremento de la viscosidad en la zona superior debido a la separación y migración del polímero (alta concentración del polímero). También se puede visualizar que a aproximadamente las 24 horas, ya todo el polímero se ha separado. Adicionalmente, se observa que la viscosidad se estabiliza en las zona media y baja en aproximadamente 9600 P, manteniendo esa tendencia desde las 96h.

Esta variación es importante pues cada una de las fases sufre una cinética en la cual la viscosidad en cada una de las alturas del dispositivo cambia con el tiempo, tendiendo al equilibrio.

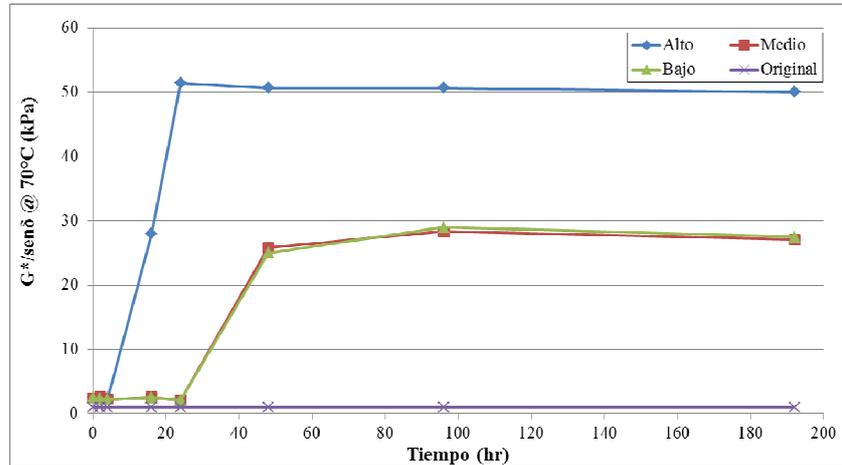
Grado de desempeño en DSR

A diferencia de la viscosidad, este análisis mide la componente elástica y la componente viscosa del material. Este método se basa en la medición del módulo a cortante del material (G^*) y el ángulo de fase (δ), el cual está entre $0 \leq \delta \leq 90$. Un asfalto con ángulos cercanos a cero presentan un comportamiento de un sólido puro y cercanos a noventa se comportan como un fluido puro.

Las mediciones se realizaron a una temperatura de 70°C, en función de que el objetivo de la modificación fue obtener un asfalto con grado de desempeño PG70 (requerimiento Superpave de

$G^*/\text{sen}\delta \geq 1$). En ese sentido las mediciones se realizaron de forma similar a las viscosidades pero utilizando un parámetro más completo en la evaluación. Los resultados se presentan en la Figura 3.

Figura 3: Comparación de PG a distintas alturas del dispositivo de almacenamiento



Por tanto, se puede concluir que el PG de cada una de las fracciones varía según el tiempo de almacenamiento y en algunas de ellas es muy evidente y significativo el fenómeno. Esta variación se amplifica además por las acumulaciones de polímero y por el envejecimiento al que se somete el asfalto durante el proceso de almacenamiento.

Relación de separación (R_s) y Relación de degradación (R_d)

La relación de separación se calcula utilizando los parámetros G^* y δ , o una combinación de ambos en relación a la parte superior e inferior del dispositivo de la siguiente manera:

$$R_s(G^*) = \frac{G^*_{\text{arriba}}}{G^*_{\text{abajo}}} \tag{1}$$

$$R_s(\delta) = \frac{\delta_{\text{arriba}}}{\delta_{\text{abajo}}} \tag{2}$$

En donde los valores $R_s(G^*)$ y $R_s(\delta)$ para un asfalto con una buena estabilidad deben estar entre 0,8 - 1,2 (Youtcheff et al., 2005). Para el caso de estudio, las relaciones $R_s(G^*)$ y $R_s(\delta)$ se presentan en la Tabla 1 y Tabla 2 respectivamente.

Tabla 1: $R_s(G^*)$ para asfalto evaluado

Tiempo (hr)	G* Alto	G* Medio	G* Bajo	G*Alto/G*Bajo	G*Alto/G*Med	G*Med/G*Bajo
2	2494.6	2457.2	2267.7	1.10	1.02	1.08
4	2413.8	2168.2	2160.6	1.12	1.11	1.00
16	10547.0	2463.6	2504.3	4.21	4.28	0.98
24	16193.0	2095.7	2055.0	7.88	7.73	1.02
48	16196.6	2460.4	2585.7	6.26	6.58	0.95
96	16302.4	2769.8	2819.3	5.78	5.89	0.98
192	16471.0	2746.6	2683.7	6.14	6.00	1.02

Tabla 2: $R_s(\delta)$ para asfalto evaluado

Tiempo (hr)	δ Alto	δ Medio	δ Bajo	δ Alto/ δ Bajo	δ Alto/ δ Med	δ Med/ δ Bajo
2	77.7	79.3	81.0	0.96	0.98	0.98
4	80.4	81.4	81.5	0.99	0.99	1.00
16	22.2	80.0	80.1	0.28	0.28	1.00
24	18.4	81.8	81.9	0.22	0.23	1.00
48	18.4	80.9	80.7	0.23	0.23	1.00
96	18.3	80.7	80.7	0.23	0.23	1.00
192	19.9	80.9	80.7	0.25	0.25	1.00

De la misma forma, la relación de degradación utiliza los mismos parámetros G^* , δ o una combinación de ambos. Sin embargo, en este caso se toma en cuenta la respuesta inicial del asfalto recién modificado en el instante $t = 0$ hr, de la siguiente manera:

$$R_d(G^*) = \frac{1}{2} \cdot \frac{(G^*_{arriba} + G^*_{abajo})}{G^*_{inicial}} \quad (3)$$

$$R_d(\delta) = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\delta_{arriba} + \delta_{abajo})}{\delta_{inicial}} \quad (4)$$

En donde los valores $R_d(G^*)$ y $R_s(\delta)$ para un asfalto con poca degradación deben estar entre 0,8 - 1,2 para $t = 0$ hr (Youtcheff et al., 2005). Para el caso de estudio, el promedio de G^* fue de 880,2 Pa y el de δ de 85,343°. Con base en lo anterior, se presentan las relaciones $R_d(G^*)$ y $R_d(\delta)$ la Tabla 3 y Tabla 4 respectivamente.

Tabla 3: $R_d(G^*)$ para asfalto evaluado

Tiempo (hr)	$ G^* $ Alto	$ G^* $ Medio	$ G^* $ Bajo	$0,5(G^*_{Alto}+G^*_{Bajo})/G^*_{inic}$	$0,5(G^*_{Alto}+G^*_{Med})/G^*_{inic}$	$0,5(G^*_{Med}+G^*_{Bajo})/G^*_{inic}$
2	2494.6	2457.2	2267.7	1.00	1.04	0.99
4	2413.8	2168.2	2160.6	0.96	0.96	0.91
16	10547.0	2463.6	2504.3	2.73	2.72	1.04
24	16193.0	2095.7	2055.0	3.82	3.82	0.87
48	16196.6	2460.4	2585.7	3.93	3.90	1.06
96	16302.4	2769.8	2819.3	4.00	3.99	1.17
192	16471.0	2746.6	2683.7	4.01	4.02	1.14

Tabla 4: $R_d(\delta)$ para asfalto evaluado

Tiempo (hr)	δ Alto	δ Medio	δ Bajo	$0,5(\delta_{Alto}+\delta_{Bajo})/\delta_{inic}$	$0,5(\delta_{Alto}+\delta_{Med})/\delta_{inic}$	$0,5(\delta_{Med}+\delta_{Bajo})/\delta_{inic}$
2	77.7	79.3	81.0	0.98	1.00	0.99
4	80.4	81.4	81.5	1.00	1.00	1.01
16	22.2	80.0	80.1	0.63	0.63	0.99
24	18.4	81.8	81.9	0.62	0.61	1.01
48	18.4	80.9	80.7	0.61	0.61	1.00
96	18.3	80.7	80.7	0.61	0.62	1.00
192	19.9	80.9	80.7	0.62	0.62	1.00

Análisis Químico Mediante FTIR

La técnica de espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) permite identificar químicamente grupos funcionales y cambios químicos en las estructuras orgánicas y organometálicas, teniendo pocas aplicaciones en estructuras metálicas (Kuptsov, 1994). Adicionalmente, pueden ser analizados los gases emanados por el TGA en toda una cinética termogravimétrica de un material (FTIR-TGA) (Elseifi et al., 2005; Daly et al., 2010). Esto permite al investigador

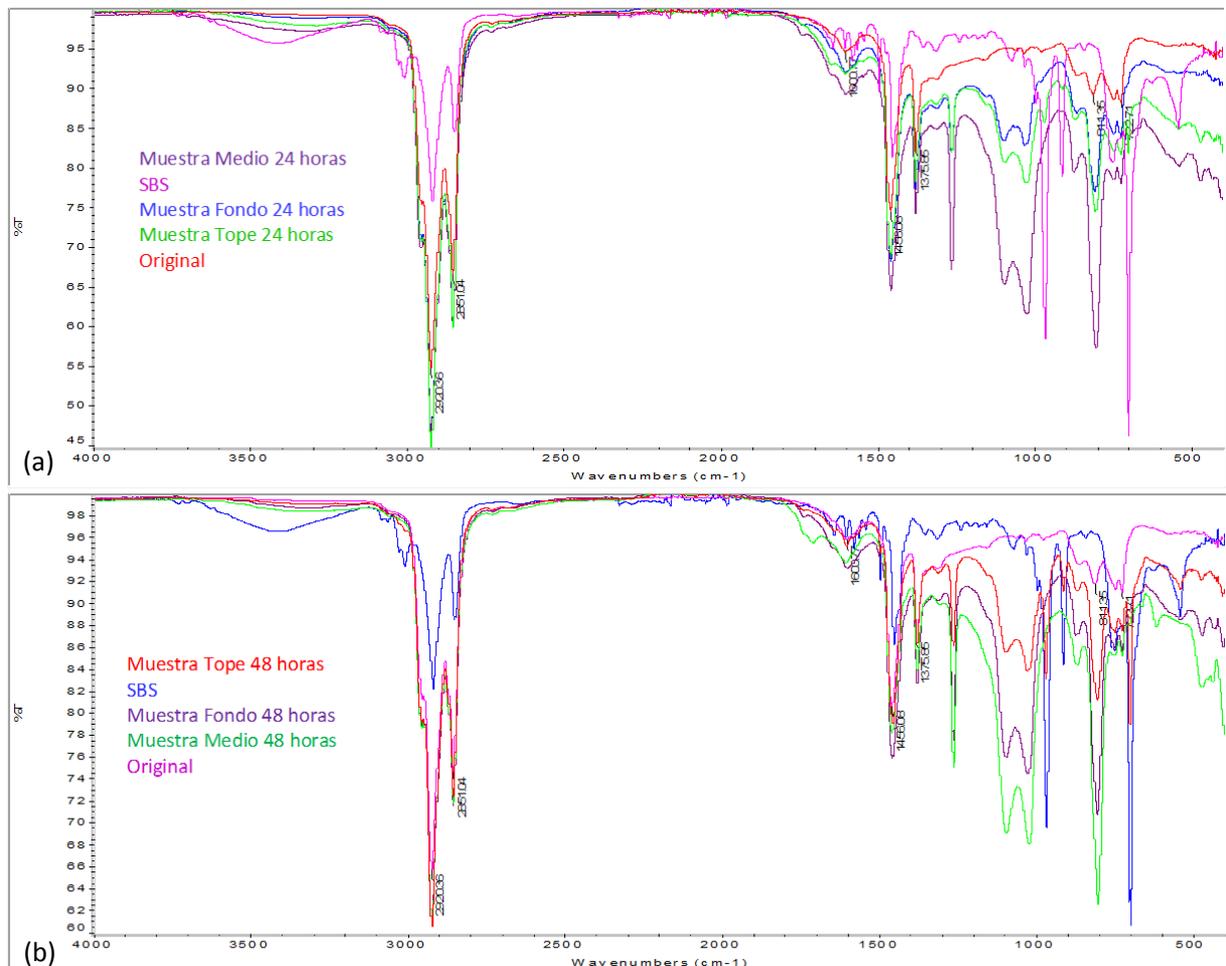
obtener información de los gases que se podrían emanar durante el proceso de modificación o de producción en planta.

La Figura 4 muestra los espectros FTIR de la muestra de asfalto modificada con 2,5 % m/m de polímero SBS después de 24h y 48h de mezclado, a) Fondo, b) medio, c) tope y d) espectros superpuestos.

En los espectros se muestra la diferencia de grupos funcionales estructuralmente activos en el asfalto modificado, donde se presentan de forma más intensa las bandas características del SBS en el asfalto modificado ubicado en la parte superior del dispositivo de almacenamiento: picos de baja intensidad entre 1600 cm^{-1} y 1700 cm^{-1} , el pico de intensidad media en 600 cm^{-1} y los picos de intensidad alta a 1000 cm^{-1} y a 700 cm^{-1} .

Para las otras dos zonas de dispositivo de almacenamiento (media y baja) también se presentan las bandas anteriores, pero combinadas con una matriz más asfáltica y no polimérica. Para modo de comparación, la figura adicionalmente presenta el espectro del asfalto sin modificar y el espectro del SBS.

Figura 4: Comparación de espectros FTIR a (a) 24 horas y (b) 48 horas



Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)

La importancia de estos ensayos es que realizan mediciones dinámicas del material, tratando de evidenciar el comportamiento del mismo en servicio bajo condiciones probables de desempeño

en carretera. El MSCR mide la deformación en un espécimen de mezcla asfáltica, tras ser sometido a una cantidad definida de ciclos de carga y descarga a dos niveles definidos de esfuerzo (AASHTO, 2011). Este método es capaz de predecir para que tipo de tránsito y temperatura de la carpeta asfáltica se puede utilizar adecuadamente el asfalto.

En la Tabla 5 se observa la clasificación del asfalto modificado, en las distintas ubicaciones del dispositivo de almacenamiento a lo largo del tiempo. Nótese que el asfalto original no es de aplicabilidad en carreteras de principales según la clasificación MSCR. La modificación del asfalto ($t = 0$ hr) resulta en una aproximación del asfalto para uso adecuado en proyectos de tráfico estándar. No obstante, después de únicamente 4 horas de almacenamiento, se da la separación del polímero incrementando considerablemente el J_{NR} (por la alta concentración del polímero). En los estratos medios y bajos, pareciera que el J_{NR} se mantiene. Sin embargo, es evidente que el contenido de polímero se reduce por lo que la rigidez se compensa con un proceso de envejecimiento del asfalto.

Tabla 5: Análisis MSCR de Asfalto durante Almacenamiento

Condición		$J_{NR@3.2kPa}$		
Tránsito estándar ($< 1 \times 10^7$ ESALs)		< 4		
Tránsito alto ($1 \times 10^7 - 3 \times 10^7$ ESALs)		< 2		
Tránsito muy alto ($> 3 \times 10^7$ ESALs)		< 1		
Creep Compliance ($J_{NR@3.2kPa}$)				
Tiempo (hr)	Alto	Medio	Fondo	
AC-30 (sin modificar)	7,344	7,344	7,344	
0	4,315	4,315	4,315	
2	3,971	4,154	4,492	
4	0,2925	4,681	4,727	
16	0,03132	4,077	4,114	
24	0,02803	4,783	4,230	
48	0,01860	4,041	3,879	
96	0,01305	3,957	3,857	
192	0,01911	4,072	3,906	

Microscopía de Fuerza Atómica (AFM)

El análisis se utiliza para obtener información sobre la topografía, la rugosidad, la dispersión y relacionarla con la adherencia de muestras de asfalto modificado. Se observa que el SBS se dispersa uniformemente sobre la matriz asfáltica (Figura 5).

Figura 5: Topografía AFM en asfalto modificado a 48 hr de almacenamiento en (a) fondo, (b) medio, (c) tope y (d) asfalto original

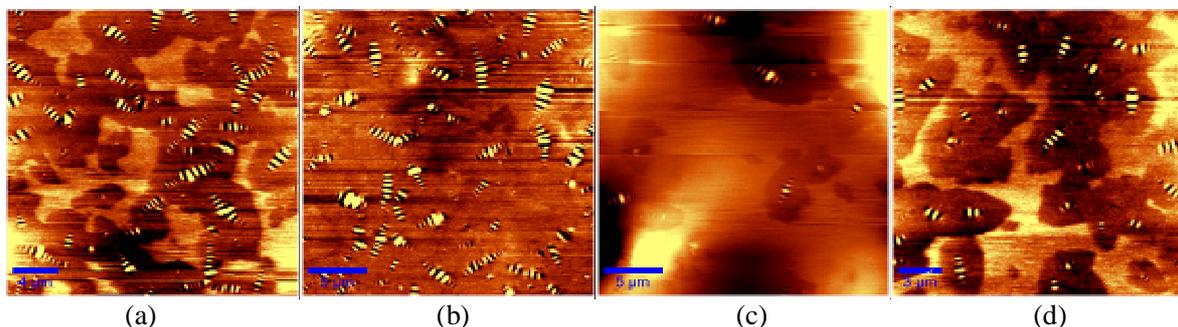
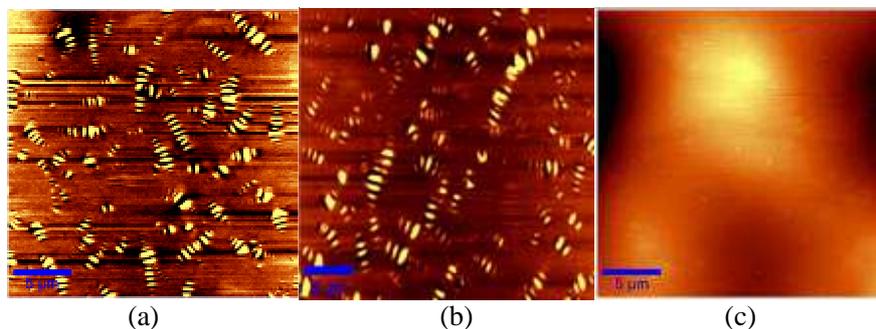


Figura 6: Topografía AFM en asfalto modificado a 168 hr de almacenamiento en (a) fondo, (b) medio y (c) tope.



Nótese también que en las imágenes de AFM se evidencia la presencia de las fases del asfalto llamadas catanafase (estructura tipo abeja); perifase (la fase que rodea a la estructura tipo abeja) y parafase (fase del asfalto posiblemente poco afin a la estructura tipo abeja) (Masson, Leblond, Margeson, 2006). En la Figura 5 se observa que para el fondo del dispositivo de almacenamiento se observa en topografía por la técnica de AFM son muy evidentes las tres fases. En la parte media, la diferenciación entre fases es menos evidentes y en la parte superior del dispositivo de almacenamiento se observa una fase dominante diferente a la catanafase debido a la presencia de altas concentraciones de polímero e inversión de fase asfalto polímero.

Por último, nótese que la separación de fases es aún más pronunciada conforme pasa el tiempo, hasta alcanzar un estado de equilibrio entre los dos materiales (Figura 6).

CONCLUSIONES

El asfalto modificado con SBS no es estable, esto significa que en períodos relativamente cortos de almacenamiento (ej. 24 horas), ya el polímero se ha separado completamente de la matriz del asfalto. Esto significa que de usarse un asfalto modificado con SBS que se ha almacenado por un período de aproximadamente un día o más, la variabilidad en el desempeño de la mezcla asfáltica producida con el asfalto modificado será significativamente alta. Esto se debe a que el polímero tiende a flotar hacia la superficie del tanque, donde se presentarán concentraciones muy altas del mismo, y el resto del tanque queda en un estado de equilibrio entre el asfalto y una pequeña porción del polímero que no se separa.

Todo lo anterior se da bajo la condición crítica en la cual no se aplica ningún esfuerzo o energía de cortante, para asegurar el movimiento continuo del asfalto modificado. No obstante, ya se ha demostrado también que si bien es cierto el tiempo requerido para que se dé una separación del polímero se prolonga, el fenómeno siempre se va a presentar.

Es de esperar que el comportamiento evidenciado por el SBS se extienda a otros polímeros como el SBR. Por tanto, es de suma importancia que el asfalto modificado se utilice lo antes posible, o de no ser el caso, que se realicen modificaciones al proceso de incorporación mecánico y químico, de manera que se pueda obtener un aditivo estable.

REFERENCIAS

AASHTO Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, 2011. Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of

- Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). AASHTO Designation: TP70-09. AASHTO, Washington, D.C., 31st edition.
- Daly, W. H., Negulescu, I. I., and Glover, I. A Comparative Analysis Of Modified Binders: Original Asphalts And Materials Extracted From Existing Pavements. Federal Highway Administration Report No. FHWA/LA.10/462. Baton Rouge, LA, 2010.
- Elseifi, M., Mohammad, L. N., Glover, I., Negulescu, I. I., Daly, W. H., and Abadie, C. Relationship between Molecular Compositions and Rheological Properties of Neat Asphalt Binder at Low and Intermediate Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22, No. 12, pp. 1288-1294, December 2010.
- Fu, H., Xie, L., Dou, D., Li, L., Yu, M., Yao, S. 2006. Storage stability and compatibility of asphalt binder modified by SBS graft copolymer. *Construction and Building Materials Journal*, Vol. 21, pp. 1528-1533.
- Kenimer, A.L., Villeneuve, J., Shelden, S. 2005. Fundamental Concepts: Sedimentation. National Decentralized Water Resources Capacity Development Project. University of Arkansas, Fayetteville, AR.
- Kuptsov, A.H. 1994. Applications of Fourier Transform Raman Spectroscopy in Forensic Science. *Journal of Forensic Sciences*, JFSCA, Vol. 39, No. 2, pp. 305-318.
- Lu, X., Soenen, H., Redelius, P. 2010. SBS Modified Bitumens: Does Their Morphology and Storage Stability Influence Asphalt Mix Performance. *Proceedings of the 11th ISAP International Conference on Asphalt Pavements*, pp. 1-6.
- Masson, J.F., Leblond, V., Margeson, J. 2006. Bitumen morphologies by phase-detection atomic force microscopy. *Journal of Microscopy*, pp 17-29.
- Youtcheff, J., Wijayatilleke, N., Shenoy, A. 2005. Evaluation of the laboratory asphalt stability test. Federal Highway Administration Report No. FHWA-HRT-04-111.