

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN SERVICIO A PARTIR DEL ANÁLISIS DEL MÁSTIC

CARLOS A. CUADRO¹, JORGE I. OSORIO¹, WILMAR D. FERNÁNDEZ² FREDY A. REYES^{1,3}

1: Grupo GECATA Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá - Colombia,
2: Grupo TOPOVIAL Universidad Distrital. Candidato a Doctor Universidad Javeriana Bogotá Colombia
3: Director Maestría en Ingeniería Civil Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá - Colombia

• carloscuadro@gmail.com,
jorgeioso@gmail.com,
wfernandez@udistrital.edu.co,
fredy.reyes@javeriana.edu.co

RESUMEN

Uno de los aspectos de mayor relevancia en el desempeño de los pavimentos asfálticos es la durabilidad. Las mezclas asfálticas experimentan deterioro debido a los procesos de fabricación en planta, durante la construcción de la obra y a lo largo de la vida de servicio. En cada etapa diferentes causas producen efectos de envejecimiento en las mezclas. El proyecto investiga indicadores de envejecimiento de mezclas asfálticas a partir del análisis reológico del Mástic y su objetivo es predecir el comportamiento del mismo en el tiempo. Los materiales utilizados en la elaboración del Mástic corresponden a los dos cementos asfálticos (CA) más usados en Colombia: CA 80-100 y CA 60-70, producidos por Ecopetrol, mezclados con un llenante mineral, material triturado con gradación tamiz pasa 200, en diferentes proporciones. El Mástic en laboratorio se sometió a diferentes tratamientos de envejecimiento acelerado a corto plazo mediante Horno rotatorio de película delgada (RTFO por sus siglas en inglés) y envejecimiento a largo plazo en cámara UV en diferentes periodos. Luego, se realizaron las mediciones del módulo complejo con reómetro dinámico de Cortante DSR, como también se construyeron las curvas maestras de envejecimiento a partir de los modelos reológicos CAM y WLF, para el módulo complejo. Los resultados muestran la evolución de la rigidez del mástic que es representativa de la mezcla asfáltica, en la cual se observa que el mástic CA 60-70 es más resistente al envejecimiento que el CA 80-100. Como resultado, se obtuvo una metodología rápida y económica para la estimación del envejecimiento de las mezclas asfálticas a partir de la evaluación del mástic.

PALABRAS CLAVE

Mástic, Envejecimiento, Curvas maestras

SESIÓN

Materiales

1. INTRODUCCIÓN

256

El cemento asfáltico, al igual que muchas otras sustancias orgánicas, se ve afectado por la presencia de oxígeno, por la radiación ultravioleta y por los cambios de temperatura. De acuerdo con lo anterior, existen dos tipos de factores que lo afectan, unos de tipo intrínseco y otros de tipo extrínseco. Los factores intrínsecos del envejecimiento de asfaltos son: la volatilización de fracciones livianas, la oxidación (absorción y difusión de oxígeno), la tixotropía y sinéresis y la degradación de estructura polimérica (en el caso de los asfaltos modificados) (Fernández-Gómez, Rondón & Reyes, 2013; Lesueur, 2009; Petersen, 2009; Lu & Isacson, 2000). Los factores extrínsecos del envejecimiento son: la influencia del tipo de áridos, la influencia del tipo y proporción de Filler (llenante mineral o material fino), el contenido de vacíos de la mezcla, el espesor de película de ligante y la fatiga, tanto la debida al tránsito como la térmica. De las consecuencias del envejecimiento se puede decir que es un fenómeno complejo con repercusiones en la durabilidad y en las propiedades fisicoquímicas del asfalto, también que es un proceso lento que involucra cambios en la composición química del asfalto (Bianchetto, Miró & Pérez, 2006).

El objetivo de este proyecto consiste en formular una metodología que permita identificar indicadores de envejecimiento a través del análisis del mástic. Para ello, en primer lugar hay que ensayar los materiales en el DSR usando el método de superposición tiempo temperatura; en segundo lugar, realizar las curvas maestras del módulo complejo del material envejecido según el modelo CAM-1999; y, finalmente, realizar el pronóstico del envejecimiento de acuerdo con el parámetro $a(T)$.

Mástic.

En general, las mezclas de concreto asfáltico en caliente (HMA) están compuestas de tres componentes: agregados minerales, asfalto y vacíos de aire. El asfalto y el llenante mineral (agregado mineral que pasa el tamiz No. 200 o inferior a 0,075 mm) constituyen el mástic. Los llenantes minerales

juegan un papel importante en las propiedades de los mástic y de las mezclas asfálticas en caliente. Una buena comprensión de los efectos de los llenantes en las propiedades de mástic y mezclas asfálticas en caliente (HMA) es crucial para un alto desempeño y buen diseño de este tipo de mezclas asfálticas (Anderson & Goetz, 1973; Cooley et al., 1998; Huang, Shu & Chen, 2007)

Curvas Maestras de Envejecimiento

En vista de la similitud de los efectos de envejecimiento y temperatura, se realizó un intento por construir las curvas maestras de envejecimiento similar a las curvas maestras de temperatura, por desplazamiento de los datos de ensayo en forma horizontal. Puesto que las propiedades reológicas incluyen el módulo complejo y el ángulo de fase, se requieren dos curvas maestras para una descripción completa del comportamiento de un material (Huang & Zeng, 2007). La construcción de las curvas maestras se realizó mediante el modelo viscoelástico lineal de Christensen, Anderson y Marasteanu denominado CAM- 1999, el cual fue modificado por Zeng et al. (2001) y se presenta en la ecuación 1:

$$|G^*| = G_e + \frac{G_g - G_e}{\left[1 + \left(\frac{f_c}{f'}\right)^k\right]^{\frac{m_e}{k}}}$$

Donde $G_e = |G^*|(f \rightarrow 0)$ con $G_e = 0$ para bitumen, $G_g = |G^*|(f \rightarrow \infty)$, f_c es un parámetro de localización con dimensiones de frecuencia y f' es la frecuencia reducida, función de la temperatura y deformación; k y m_e son parámetros de forma adimensionales.

Factor de Desplazamiento por Envejecimiento

De los datos recolectados en el SHRP, publicados en 1991, de ocho cementos asfálticos principales, todos los tratamientos indicaron una dependencia de la temperatura del comportamiento viscoelástico de los cementos asfálticos, que es indicado por el factor de desplazamiento deter-

minado por la construcción de la curva maestra y puede ser representado (Huang & Zeng, 2007). La ecuación de William-Landel-Ferry ha sido extensamente utilizada para caracterizar el factor de desplazamiento por temperatura de los cementos asfálticos. Se ha encontrado que esta ecuación puede describir exactamente el factor de desplazamiento de cementos asfálticos más allá de las características de temperatura, esto es llamado temperatura definida o de referencia.

$$\text{Log } a(T) = \frac{-C_1(T-T_d)}{C_2+T-T_d}$$

Dónde:

$a(T)$ = Factor de desplazamiento horizontal.

T = Temperatura, °C (Tiempo de envejecimiento).

T_d = Temperatura de referencia (Tiempo de referencia).

C_1, C_2 = Constantes empíricas.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para este proyecto, se evaluó mástic, fabricado en laboratorio. Este se fabricó con cementos asfálticos 60-70 y 80-100 de Barrancabermeja y un material fino proveniente del proceso de trituración del material pétreo y en proporciones de 2, 10 y 20% del total de la mezcla en peso. Las muestras se etiquetaron del número 1 al 6; entonces, las muestras 1, 2 y 3 corresponden al asfalto 60-70 mezclado con el filler de 2, 10 y 20%, respectivamente, y las restantes a las mismas proporciones

de filler mezcladas con el asfalto 80-100. La tabla 1 presenta los resultados de la caracterización física de los asfaltos estudiados.

El llenante mineral es agregado pétreo extraído del Río Coello (Tolima-Colombia) y mezclado en una relación 50%-50% de dos fuentes; el primero, tomado de la planta de trituración de agregados, y el segundo, de las tolvas en la planta de asfalto. Antes del proceso de mezclado, los dos materiales se pasaron por el Tamiz # 200 (75). En la fabricación del mástic de laboratorio, los materiales se calientan previamente por separado, a 140°C, en un horno sin ventilación. La mezcla se realiza con un homogeneizador (HDD) Ultra Turrax - T50 Basic, durante cinco minutos, a una temperatura constante de 140°C y a 6000 RPM; luego, las mezclas se almacenaron en recipientes metálicos herméticos para su posterior ensayo. Una vez obtenida la mezcla asfalto agregado fino (mástic) se sometió a tratamientos de envejecimiento a corto y largo plazo.

En el caso del tratamiento de corto plazo, se usó un Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO por sus siglas en inglés), James Cox & Sons Inc. Modelo CS 325-B, durante 85 minutos, a 163°C. El tratamiento a largo plazo se realizó mediante la exposición del mástic en una cámara de envejecimiento Ultra Violeta ATL-360 que se construyó para este proyecto siguiendo la norma ASTM D4799-08. Cada periodo de exposición consta de un ciclo de radiación seguido por uno de condensación de 2h cada uno; así, cada mástic se sometió a un tratamiento continuo en periodos de exposición de 20, 100 y 500 horas.

Tabla 1
Características generales de los CA 80-100 y CA 60-70

Experimento	Norma	Unidad	CA 80-100	CA 60-70
Asfalto original				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0.1 mm	83.2	63.4
Peso específico	INV. E-707	-	1.007	1.012
Índice de penetración	NLT 181/88	-	0.3	0
Viscosidad con DSR (60°C)	ASTM D-4402	Pa-s	136	145.6

Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	>105	>105
Punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	°C	50.5	52.4
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%	>99	>99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	<0.2	<0.2
Punto de inflamación	ASTM D-92	°C	358	323
Asfalto Residuo RTFOT				
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	0.5	0.3
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	%(de la penetración original)	61	62

La evaluación reológica se realizó con un reómetro dinámico de cortante DSR TA Instruments 2000ex. La geometría utilizada fue de 25 mm de platos paralelos y se realizaron pruebas de grado de desempeño PG y de las curvas maestras utilizando el principio de superposición tiempo temperatura. Las temperaturas se evaluaron entre 25 y 65 grados centígrados en pasos de 10 grados, un rango de frecuencias de 1 a 100 Hz y con un porcentaje de deformación de 0.2%. El porcentaje de deformación escogido se tomó sobre la base que el mástic es más rígido que el asfalto por el contenido de material fino. En el caso de la clasificación PG para asfaltos originales, residuo del horno RTFO y de vaso de envejecimiento a presión PAV (por sus siglas en inglés), las deformaciones corresponden a 12%, 10% y 1%, respectivamente. Inicialmente, se realizaron pruebas a estas deformaciones, pero el equipo no logro medir adecuadamente los parámetros por la rigidez del material y, por lo tanto, se optó por ensayar el material a la deformación mencionada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la evaluación reológica se obtuvo el grado de desempeño PG 58(16), para los dos asfaltos evaluados. Las temperaturas mencionadas corresponden a la temperatura máxima y media del PG, ya que no se evaluó la temperatura inferior (menor

de cero grados centígrados), pues en Colombia en muy pocos lugares se presentan estas temperaturas (Fernández-Gómez et al, 2014).

La figura 1 presenta las curvas maestras de envejecimiento del mástic. Para construirlas se utilizó el modelo CAM, para encontrar el comportamiento del módulo complejo a las diferentes frecuencias y de allí, se encontró el factor de desplazamiento para cada uno de los mástic, mediante el modelo WLF. El factor de desplazamiento indica el grado de envejecimiento o el grado de incremento del módulo complejo con respecto al mástic sin envejecimiento de largo plazo. Se considera de largo plazo debido a que el corto plazo esta implícito en el proceso de mezclado, similares resultados fueron reportados por Huang & Zeng (2007).

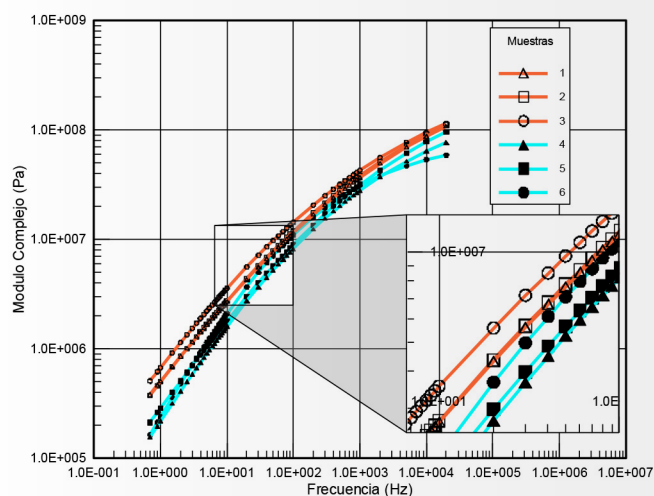


Figura 1.
Curvas maestras CAM mástic de laboratorio

Como resultado de la elaboración de las curvas maestras de envejecimiento se obtienen, en primer lugar, los parámetros del modelo CAM y, en segundo lugar, los factores de desplazamiento por envejecimiento. A partir de estos últimos se calculan las constantes empíricas c_1 y c_2 del modelo WLF, el error para el cálculo de las constantes empíricas fue menor al 3%. La tendencia de los factores de desplazamiento por envejecimiento $a(T)$ se observan en la figura 2.

Las curvas presentan puntos de inflexión importantes a las 100 horas del proceso de envejecimiento a largo plazo en cámara de radiación UV. Este periodo corresponde a 3 meses de exposición en condiciones ambientales de Bogotá. Este fenómeno ocurre debido a que en este periodo existe una recomposición de las fracciones SARA y el cemento asfáltico experimenta una recuperación, posiblemente porque al igual que la fracción de asfaltenos se incrementa, la fracción de resinas también lo hace. Evidencia de lo anterior se puede encontrar para cementos asfálticos en Fernández-Gómez et al (2013) y para mezclas asfálticas en Rondón y Reyes (2012).

Como se puede observar en las figuras 1, 2 y 3, el asfalto 60-70 presentó menor dispersión en los factores de desplazamiento que el 80-100. Esto significa que el asfalto 60-70 aunque puede llegar a presentar rigideces levemente mayores que el 80-100 tiene en general un comportamiento estable con cualquiera de las adiciones de llenante mineral.

Con el pronóstico apoyado en los factores de envejecimiento y los parámetros hallados en el modelo CAM para cada uno de los periodos de envejecimiento, se realizó un análisis de los módulos complejos proyectados. Para efectos de la validación del modelo viscoelástico utilizado, en la figura 4 se presentan las gráficas del módulo complejo medido contra el modulo complejo predicho, en todas ellas se observa una fuerte correlación con la línea de igualdad dibujada dentro de las gráficas.

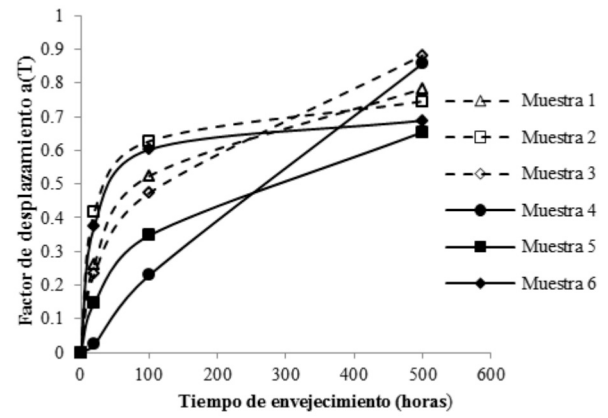


Figura 2. Factores de desplazamiento por envejecimiento $a(T)$

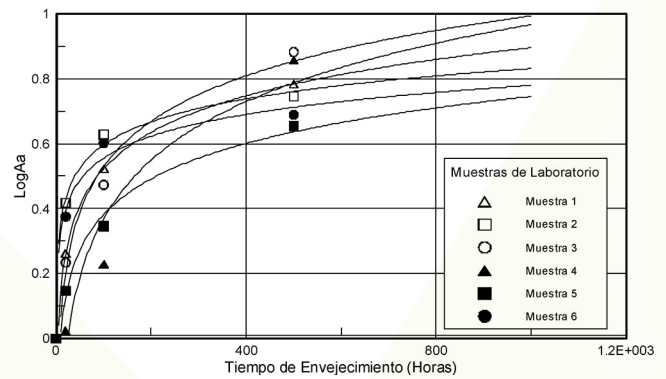


Figura 3. Pronóstico de $a(T)$ a 1000h

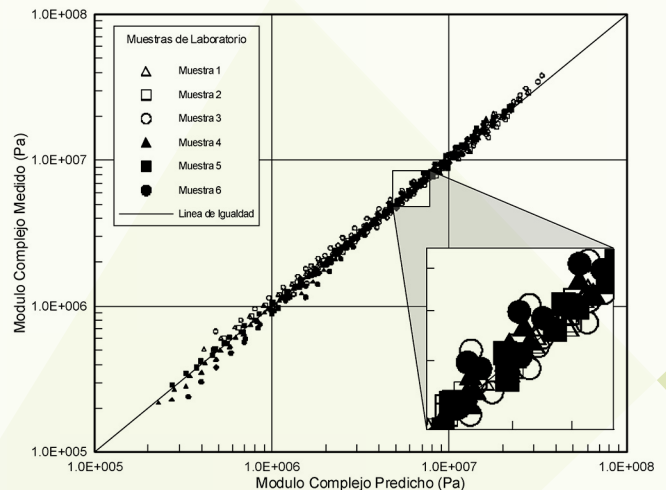


Figura 4. Pronóstico del módulo complejo a 1000h

4 CONCLUSIONES

El análisis reológico del mástic permite predecir el envejecimiento de las mezclas asfálticas, la ecuación de dependencia de temperatura de WLF a partir del módulo complejo permite modelar adecuadamente el nivel de envejecimiento del mástic elaborado con asfaltos Colombianos (60-70 y 80-100) y para las proporciones de filler utilizadas en esta investigación.

Dentro del modelo WLF, el comportamiento de la temperatura y el nivel de envejecimiento son análogos, pero se comportan de manera inversamente proporcional; un decrecimiento en la temperatura simula un incremento en el nivel de envejecimiento.

El factor de desplazamiento por envejecimiento es un parámetro que permite comparar el estado del envejecimiento de diferentes asfaltos o mastics. En el análisis arroja que este fenómeno no se comporta de manera lineal y que existe un fenómeno interesante en el periodo de 100 horas (3 meses),

que posiblemente corresponde a una recuperación (ablandamiento) en el módulo complejo por efecto de la recomposición de las fracciones SARA

5. RECOMENDACIONES

En estos ensayos, el asfalto 60-70 presenta un mejor comportamiento al envejecimiento que el 80-100. Sin embargo, es necesario establecer que efectos sobre el envejecimiento tiene la gran dispersión en la viscosidad que existe en los asfaltos colombianos que presentan la misma penetración.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud al personal del laboratorio de pruebas y ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana. Así mismo, a Concescol S.A. por el suministro de los materiales para realizar los experimentos.

7 REFERENCIAS

- Anderson, D. A & Goetz, W. H. (1973). Mechanical Behavior and Reinforcement of Mineral Filler-Asphalt Mixtures: Technical Paper. Recuperado a partir de <http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2193&context=jtrp>
- Bianchetto, H., Miró, R., & Pérez, F. (2006). Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de filleres comerciales. Primera parte: estudios en base al método UCL.
- Cooley, L. A., Stroup-Gardinder, M., Brown, E. R., Hanson, D. I., & Fletcher, M. O. (1998). Characterization of asphalt-filler mortars with superpave binder tests. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 67. Recuperado a partir de <http://trid.trb.org/view.aspx?id=542928>
- Fernández-Gómez, Rondón Quintana, Daza, & Reyes Lizcano. (2014). The effects of environmental aging on Colombian asphalts. *Fuel*, 115, 321-328. doi:10.1016/j.fuel.2013.07.009
- Fernández-Gómez, W. D., Rondón Quintana, H. A., Daza Velásquez, C. E., & Reyes Lizcano, F. A. (2013). The effects of environmental aging on Colombian asphalts. *Fuel*. Recuperado a partir de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623611300608X>
- Fernández-Gómez, W., Rondón, H., & Reyes, F. (2013). A review of asphalt and asphalt mixture aging. *INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, 33(1), 5-12.
- Huang, B., Shu, X., & Chen, X. (2007). Effects of mineral fillers on hot-mix asphalt laboratory-measured properties. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(1), 1-9.
- Huang, S.-C., & Zeng, M. (2007). Characterization of aging effect on rheological properties of asphalt-filler systems. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(3), 213-223. doi:10.1080/10298430601135477
- Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in colloid and interface science*, 145(1-2), 42-82.
- Lu, X., & Isacson, U. (2000). Artificial aging of polymer modified bitumens. *Journal of applied polymer science*, 76(12), 1811-1824.
- Petersen, J. C. (2009). *A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation: Chemical, Physicochemical, Physical Property, and Durability Relationships* (Vol. 1). Transportation Research Board.
- Rondón, H., & Reyes, F. (2012). *Envejecimiento de mezcla asfáltica en condiciones ambientales reales*. Editorial Académica Española.
- Zeng, M., Bahia, H., Zhai, H., & Turner, P. (2001). Rheological modeling of modified asphalt binders and mixtures. *Asphalt Paving Technology*, 70, 403-441.