

IAG301-01-2013
EVALUACIÓN DE MODELOS REOLÓGICOS PARA EL MÓDULO
COMPLEJO DE ASFALTOS
EVALUAÇÃO DE MODELOS REOLÓGICOS PARA O MÓDULO
COMPLEXO DE ASFALTOS

Juliana Puello Méndez, Ph.D.
Universidad de San Buenaventura, Programa de Ingeniería Química
Cartagena de Indias, Colombia
jpuello@usbctg.edu.co; julianapuello@hotmail.com

Karen Johana Silgado Correa
Universidad de San Buenaventura, Programa de Ingeniería Química
Cartagena de Indias, Colombia
silgado.karen@gmail.com

Natalia Afanasjeva, Ph.D.
Universidad del Valle, Departamento de Química
Cali, Colombia
natalia.afanasjeva@correounivalle.edu.co

Mario Alvarez Cifuentes, Ph.D.
Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga, Colombia
malvarez@uis.edu.co

Resumen

En el presente trabajo se describe la metodología para el ajuste de las curvas maestras del módulo complejo (G^*) a 25°C, de tres asfaltos convencionales (Apiay, Barrancabermeja y Boscán), en su estado inicial, envejecido en RTFOT y envejecido en PAV, según los modelos reológicos propuestos por Christensen-Anderson, Christensen-Anderson-Marasteanu, así como los modelos Sigmoidal y Sigmoidal Generalizado. Mediante análisis de regresión no lineal se determinaron los parámetros de cada modelo. La capacidad predictiva de cada modelo se evaluó con base en el error cuadrático medio. A partir de este estudio, se observó que para los asfaltos analizados, el Modelo Sigmoidal Generalizado mostró la mejor capacidad predictiva, seguido por los modelos Christensen-Anderson-Marasteanu y Sigmoidal, los cuales mostraron similar capacidad predictiva, y por último el modelo propuesto por Christensen y Anderson. Los resultados indican que los modelos evaluados permiten describir el comportamiento viscoelástico lineal de los asfaltos Apiay, Barrancabermeja y Boscán.

Resumo

Este artículo describe la metodología para definir las curvas maestras del módulo complejo a 25°C para tres asfaltos convencionales (Apiay, Barrancabermeja y Boscán), en su estado inicial, envejecidos en RTFOT y envejecidos en PAV, basado en modelos reológicos propuestos por Christensen-Anderson, Christensen-Anderson-Marasteanu, y modelos reológicos sigmoidal y sigmoidal generalizado. El análisis de regresión no-lineal fue usado para determinar los parámetros de cada modelo. La capacidad predictiva fue evaluada para cada modelo. El modelo con mejor capacidad predictiva fue el modelo Sigmoidal Generalizado, seguido por el modelo propuesto por Christensen-Anderson-Marasteanu y el modelo Sigmoidal, cuyas capacidades predictivas fueron similares. El modelo propuesto por Christensen-Anderson tuvo la peor capacidad predictiva. Estos resultados indican que los modelos estudiados describen correctamente el comportamiento viscoelástico de asfaltos Apiay, Barrancabermeja y Boscán.

INTRODUCCIÓN

Los asfaltos son materiales viscoelásticos, por lo tanto sus propiedades mecánicas pueden ser evaluadas de forma apropiada mediante análisis reológico; de esta manera es posible obtener la curva maestra de un material asfáltico determinado, la cual describe qué tan elástico o viscoso es un asfalto, dependiendo de la magnitud y tiempo de aplicación de un esfuerzo, así como de la temperatura (Bahia, 2008). El principio de superposición tiempo-temperatura (Time-temperature superposition principle, TTSP) relaciona la equivalencia entre estas magnitudes para un material viscoelástico. La construcción de una curva maestra para cualquier material (incluidos los asfaltos) se basa en la obtención de curvas del módulo complejo versus la frecuencia a varias temperaturas de interés. Se fija entonces una temperatura de referencia (T_0) y las demás curvas se desplazan respecto de la frecuencia reducida, de manera que se superpongan sus extremos y se obtenga una curva continua para un amplio intervalo de frecuencias, la cual es conocida como curva maestra. De acuerdo con lo discutido por Christensen y Anderson (1992), el comportamiento viscoelástico lineal de un asfalto no modificado manifiesta esencialmente dos regiones: A frecuencias muy altas (lo que equivale a bajas temperaturas), el módulo complejo tiende hacia un valor, conocido como el módulo vítreo. A bajas frecuencias (que equivalen a altas temperaturas) el material se comporta como un fluido newtoniano.

Según Bonaquist y Christensen (2005), la representación del comportamiento viscoelástico de un material es adecuada cuando no existen rearrreglos estructurales de macromoléculas ni transformaciones de fase, y cuando las mediciones se hacen en la región viscoelástica lineal. La conveniencia de las mediciones del comportamiento viscoelástico lineal radica en que es posible relacionar las propiedades mecánicas con cambios que tienen lugar en el asfalto a nivel molecular, como son los cambios debido al envejecimiento termooxidativo o fotooxidativo (Puello *et al.*, 2011). Varios autores han desarrollado modelos reológicos para asfaltos no modificados (Christensen y Anderson, 1992; Marasteanu y Anderson, 1999; Pellinen *et al.*, 2002; Rowe *et al.*, 2008), con el fin de relacionar los parámetros reológicos con las propiedades a nivel molecular. Sin embargo, el interés principal reside en el desarrollo de modelos que permitan describir adecuadamente el comportamiento de asfaltos modificados (Bahia, 2008). En este trabajo se presenta la comparación de la capacidad de predicción de varios modelos propuestos para el módulo complejo (G^*) de tres asfaltos no modificados en sus estados inicial, envejecido en RTFOT y envejecido en RTFOT+PAV. La metodología usada es la misma que se describe en el trabajo de Yussof *et al.*, (2010).

Modelos reológicos

Modelo Sigmoidal

La ecuación del modelo Sigmoidal, propuesto por Pellinen y Witczak (2002), es la siguiente:

$$\log |G^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log(\omega))}} \quad (1)$$

Donde $|G^*|$ es la magnitud del módulo complejo, $\log(\omega)$ es el logaritmo de la frecuencia reducida, δ es el valor de la asíntota inferior, α es la diferencia entre los valores de la asíntota superior e inferior, y β y γ son los que definen la forma entre asíntotas.

Modelo Sigmoidal Generalizado

Esta generalización del Modelo Sigmoidal fue presentada por Rowe *et al.* (2008):

$$\log |G^*| = \delta + \frac{\alpha}{[1 + \lambda e^{\beta + \gamma \log(\omega)}]^{1/\lambda}} \quad (2)$$

Donde λ es un parámetro asociado a la asimetría de la curva del módulo complejo. Las cantidades $\log(\omega)$, δ , α , β y γ son las mismas que para el modelo anterior.

Modelo de Christensen y Anderson

El modelo propuesto por Christensen y Anderson (1992) define la siguiente expresión para el módulo complejo:

$$|G^*| = G_g \left[1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^{\frac{\log 2}{R}} \right]^{\frac{R}{\log 2}} \quad (3)$$

Donde G_g es el módulo vítreo, el cual se define como el valor hacia el cual tienden el módulo complejo, el módulo de almacenamiento y el módulo de relajación a bajas temperaturas y altas frecuencias (o tiempos cortos de carga). El parámetro ω_c es la frecuencia de transición, que se define como la frecuencia a una temperatura dada, para la cual la tangente de pérdidas ($\tan \delta$) es 1. En la frecuencia de transición, el módulo de almacenamiento y el módulo de pérdidas son iguales. Para la mayoría de los asfaltos, la frecuencia de transición está muy cerca del punto en el cual la asíntota viscosa intercepta el módulo vítreo. La frecuencia de transición se puede considerar como un parámetro de dureza, indicando la consistencia general de un asfalto dado, a una temperatura seleccionada. A medida que un asfalto envejece, la frecuencia de transición es menor, lo cual indica que se requiere de mayor temperatura para que el asfalto pase de un comportamiento predominantemente elástico a un comportamiento predominantemente viscoso. Por último, el parámetro R es el índice reológico (Christensen y Anderson, 1992); este parámetro se define como la diferencia entre el módulo vítreo, G_g y el módulo complejo dinámico para la frecuencia de transición, ω_c . Los estudios muestran que a mayor grado de envejecimiento,

aumenta el valor del índice reológico R ; a su vez, este parámetro se ha relacionado con la extensión del espectro de relajación, y por lo tanto, con una distribución de pesos moleculares más compleja debido al envejecimiento.

Modelo de Christensen-Anderson-Marasteanu

El modelo propuesto por Christensen-Anderson-Marasteanu (Marasteanu y Anderson, 1999) fue desarrollado para mejorar la descripción de asfaltos modificados y no modificados.

$$|G^*| = G_g \left[1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^v \right]^{\frac{w}{v}} \quad (4)$$

Donde $v = \log 2/R$. El parámetro w fue incluido en este modelo para mejorar la convergencia de los datos de $|G^*|$ entre las asíntotas superior e inferior.

METODOLOGÍA

Las muestras estudiadas fueron los asfaltos Apiay, Barrancabermeja y Boscán, cada uno en estado inicial, envejecido en RTFOT y envejecido en RTFOT+PAV, para un total de nueve muestras. Las temperaturas establecidas para las mediciones reométricas fueron -5, 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65 y 75°C; esto con el fin de evaluar el comportamiento viscoelástico lineal de los asfaltos en el intervalo de temperaturas que es posible encontrar en Colombia. Se usó un reómetro de corte dinámico de deformación controlada para llevar a cabo las mediciones. Inicialmente se hicieron barridos de deformación a cada temperatura, para determinar el límite de la región viscoelástica lineal. Posteriormente se hicieron barridos de frecuencia ($\log|G^*|$ vs $\log \omega$) a cada temperatura y deformación establecidas, de manera que los datos obtenidos correspondieran al comportamiento viscoelástico lineal. Se construyeron las curvas maestras para cada muestra, fijando 25°C como temperatura de referencia. A partir de las curvas maestras obtenidas para los tres asfaltos, tanto en estado inicial como en estado envejecido en RTFOT y envejecido en RTFOT+PAV, se determinaron los parámetros para cada uno de los modelos descritos previamente, aplicando el método de mínimos cuadrados, como se describe en Yusoff *et al.*, (2010). Para este fin se utilizó un software comercial que ofrece la función de mínimos cuadrados para ajuste de datos.

RESULTADOS

Determinación de parámetros para el Modelo Sigmoidal

Este modelo cuenta con cuatro parámetros: α , δ , β y γ . Para la determinación de parámetros, los valores iniciales fueron $\alpha = 10$, $\delta = -1$, $\beta = -1$ y $\gamma = 1$, según lo reportado por Yusoff *et al.* (2010). La Tabla 1 muestra los valores de los parámetros para el Modelo Sigmoidal, en los tres asfaltos, cada uno en estado inicial, RTFOT y RTFOT+PAV. Los valores del error cuadrático medio indican que el Modelo Sigmoidal describe adecuadamente el comportamiento del módulo complejo de los asfaltos estudiados. Los valores de los parámetros γ y δ de la Tabla 1 son comparables con los reportados por Yusoff *et al.*, (2010).

Tabla 1: Parámetros del Modelo Sigmoidal para los asfaltos Apiay, Barrancabermeja y Boscán, en sus estados iniciales, RTFOT y PAV

Parámetros Modelo Sigmoidal	Asfalto Apiay			Asfalto Barrancabermeja			Asfalto Boscán		
	Inicial	RTFOT	RTFOT+PAV	Inicial	RTFOT	RTFOT+PAV	Inicial	RTFOT	RTFOT+PAV
α	17,06	13,24	19,57	31,71	12,95	12,62	13,17	15,70	16,89
β	-0,90	-0,75	-1,50	-1,53	-0,95	-1,12	-0,65	-0,98	-1,16
γ	-0,22	-0,24	-0,18	-0,22	-0,30	-0,27	-0,27	-0,24	-0,19
δ	-7,05	-3,60	-9,97	-21,53	-3,75	-3,51	-3,58	-5,98	-6,83
ECM*	0,04	0,30	0,09	0,28	0,01	0,01	0,03	0,02	0,13

*ECM = Error cuadrático medio.

En el trabajo de Yusoff, los valores reportados muestran que existe influencia del grado de envejecimiento y del tipo de asfalto. En el presente estudio, los valores encontrados para los asfaltos Apiay, Barrancabermeja y Boscán no muestran tendencias definidas con el grado de envejecimiento, y tampoco muestran relación con el tipo de asfalto. Adicionalmente, Yusoff *et al.* (2010, 2013) reportaron la capacidad predictiva del Modelo Sigmoidal Modificado, propuesto por García y Thompson (2007), en el que reemplazan el parámetro α por la diferencia del logaritmo del valor típico del módulo vítreo ($\log 1 \text{ GPa} = 9$, según Bonaquist y Christensen, 2005) menos el valor del parámetro δ . Sin embargo, se observa en la Tabla 1 que esta diferencia no es siempre de 9, lo cual sugiere que el Modelo Sigmoidal Modificado es una aproximación adecuada para casos específicos, mientras que el Modelo Sigmoidal considera variaciones en el valor del módulo vítreo. El significado físico de los parámetros de los modelos es necesario para poder relacionar el comportamiento reológico con los arreglos a nivel molecular.

Modelo Sigmoidal Generalizado

Para la determinación de los parámetros del Modelo Sigmoidal Generalizado, los valores iniciales fueron: $\delta = 0$, $\beta = 1$ y $\gamma = 1$; en la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos para los parámetros.

Tabla 2: Parámetros del Modelo Sigmoidal Generalizado para los asfaltos Apiay, Barrancabermeja y Boscán, en sus estados iniciales, RTFOT y PAV

Parámetros Modelo Sigmoidal Generalizado	Asfalto Apiay			Asfalto Barrancabermeja			Asfalto Boscán		
	Inicial	RTFOT	RTFOT+PAV	Inicial	RTFOT	RTFOT+PAV	Inicial	RTFOT	RTFOT+PAV
α	21,20	36,59	436,83	33146,00	10,35	10,23	11,93	16,66	17,13
β	-1,07	-1,94	-4,55	-8,40	-0,78	-0,95	-0,58	-1,02	-1,17
γ	-0,24	-0,13	-0,17	-0,25	-0,27	-0,26	-0,26	-0,24	-0,19
δ	-11,33	-26,03	-427,04	-33136,08	-1,06	-1,07	-2,32	-6,95	-7,11
λ	2,18	-0,61	46,10	3845,89	0,16	0,29	0,63	1,22	1,13
ECM*	0,03	0,04	0,06	0,26	0,01	0,01	0,03	0,01	0,13

*ECM = Error cuadrático medio.

El error cuadrático medio muestra que el modelo describe adecuadamente la relación entre el módulo complejo y la frecuencia reducida. En algunos parámetros (β , δ) se observa una leve dependencia con el grado de envejecimiento. Igual que para el Modelo Sigmoidal, no se aprecia dependencia entre los valores de los parámetros y el tipo de asfalto.

Modelo Christensen-Anderson

En este modelo el valor de G_g se tomó como variable y no como un valor constante de 1 GPa, con el fin de obtener un valor de error mínimo en la determinación de los parámetros para cada asfalto. En la Tabla 3 se muestran los resultados para el módulo vítreo (G_g), la frecuencia de transición (ω_c) y el índice reológico (R).

Tabla 3: Parámetros del Modelo Christensen-Anderson para los asfaltos Apiay, Barrancabermeja y Boscán, en sus estados iniciales, RTFOT y PAV

Parámetros Modelo Christensen Anderson	Asfalto Apiay			Asfalto Barrancabermeja			Asfalto Boscán		
	Inicial	RTFOT	RTFOT + PAV	Inicial	RTFOT	RTFOT + PAV	Inicial	RTFOT	RTFOT + PAV
G_g (Pa)	$2,6 \times 10^9$	$1,5 \times 10^9$	$1,5 \times 10^9$	$4,2 \times 10^8$	$6,5 \times 10^8$	$9,4 \times 10^8$	1×10^9	$1,2 \times 10^9$	$1,3 \times 10^9$
Log ω_c	3,51	2,66	0,59	4,40	2,76	1,66	3,44	2,95	1,88
R (Pa)	2,1	2,19	2,83	0,69	1,48	2,03	1,67	1,77	1,97
ECM*	0,02	0,37	0,18	3,69	0,12	0,03	0,10	0,16	8,19

*ECM = Error cuadrático medio. Las unidades de ω_c son rad/s.

Los resultados muestran que la frecuencia de transición (ω_c) disminuye con el grado de envejecimiento de los asfaltos. A su vez, la frecuencia de transición depende del tipo de asfalto. El índice reológico (R), de acuerdo con lo esperado, aumenta a medida que el asfalto se envejece. Estas tendencias son acordes con las reportadas por Christensen y Anderson (1992), mientras que en las tendencias reportadas por Yusoff *et al.* (2010, 2013), la frecuencia de transición (ω_c) y el índice reológico (R) tienen una evolución contraria a la esperada. Ahora, en cuanto a los resultados para el módulo vítreo (G_g), en la literatura se ha observado que éste es aproximadamente 1 GPa, y por lo tanto en varios estudios se ha fijado este valor como constante, para la determinación de los otros parámetros del modelo Christensen-Anderson. Sin embargo, en la Tabla 3 se observa que el módulo vítreo (G_g) no es constante, ni es igual a 1 GPa en todos los casos. Solamente el valor de G_g del asfalto Boscán en sus tres estados de envejecimiento es el que manifiesta correspondencia con la aproximación de G_g como constante. Esto se debe a que el asfalto Boscán fue estudiado junto con otros asfaltos, como asfalto de referencia en el desarrollo del programa SHRP y a su vez en el desarrollo del modelo propuesto por Christensen y Anderson. Las diferencias en los valores de los parámetros en los asfaltos Barrancabermeja y Apiay se pueden explicar si se considera el asfalto Boscán como referencia, como se describe a continuación: El valor del índice reológico R indica que el asfalto de Apiay tiene, entre los tres asfaltos estudiados, la distribución más amplia en sus pesos moleculares. El hecho de los valores de G_g del asfalto Apiay sean mayores que 1 GPa indica que los compuestos presentes en el asfalto Apiay tienen mayor peso molecular que los del asfalto Boscán y Barrancabermeja; finalmente, el asfalto Apiay tiene los menores valores de frecuencia de transición (ω_c), lo cual

indica que, debido a la presencia de compuestos de mayor peso molecular, se requiere de mayor temperatura para que el asfalto de Apiay pase de tener un comportamiento predominantemente elástico a predominantemente viscoso. Ahora, el asfalto de Barrancabermeja tiene el menor valor de G_g y de R en sus tres estados. Esto indica que en este asfalto es más uniforme la composición en cuanto a pesos moleculares, a la vez que dichos pesos moleculares son menores. La frecuencia de transición tiene el mayor valor entre los tres asfaltos estudiados, lo cual equivale a menores temperaturas asociadas a la transición del comportamiento predominantemente elástico a predominantemente viscoso. El análisis de estas diferencias muestra la ventaja de las mediciones reológicas, pues éstas permiten explicar de forma racional el comportamiento de asfaltos de diferente procedencia.

Modelo Christensen-Anderson-Marasteanu

En la Tabla 4 se presentan los valores de los parámetros para el modelo propuesto por Christensen-Anderson-Marasteanu. Los valores del error cuadrático medio son, en general, menores que los reportados para el modelo Christensen-Anderson, lo cual indica una mejor capacidad predictiva. La frecuencia de transición depende del tipo de asfalto y del grado de envejecimiento. De acuerdo con lo esperado, la frecuencia de transición disminuye con el grado de envejecimiento. En cuanto al módulo vítreo (G_g), los resultados muestran que el valor de este parámetro difiere de 1 GPa en el caso de los asfaltos Apiay y Barrancabermeja; el análisis de los resultados para el módulo vítreo y la frecuencia de transición difiere de lo mostrado para el modelo de Christensen-Anderson, especialmente en el caso del asfalto de Barrancabermeja. Esta diferencia se puede atribuir al uso de las variables ν y w en el modelo. Los valores de los parámetros ν y w son comparables con los reportados por Yusoff *et al.* (2010), pero no muestran una dependencia definida respecto del tipo de asfalto ni del grado de envejecimiento.

Tabla 4: Parámetros del Modelo Christensen-Anderson-Marasteanu para los asfaltos Apiay, Barrancabermeja y Boscán, en sus estados inicial, RTFOT y PAV

Parámetros Modelo Christensen- Anderson- Marasteanu	Asfalto Apiay			Asfalto Barrancabermeja			Asfalto Boscán		
	Inicial	RTFOT	RTFOT + PAV	Inicial	RTFOT	RTFOT + PAV	Inicial	RTFOT	RTFOT + PAV
G_g (Pa)	$2,1 \times 10^9$	$1,5 \times 10^9$	$1,5 \times 10^9$	$5,3 \times 10^9$	1×10^9	$9,3 \times 10^9$	$1,1 \times 10^9$	$1,1 \times 10^9$	$1,3 \times 10^9$
$\log \omega_c$	3,71	3,13	0,68	2,11	2,07	1,30	3,44	3,18	3,22
ν	0,15	0,14	0,11	0,12	0,16	0,14	0,18	0,18	0,16
w	0,97	0,94	0,99	1,96	1,12	1,05	1,00	0,97	0,79
ECM*	0,04	0,35	0,17	0,26	0,04	0,02	0,09	0,12	0,18

*ECM = Error cuadrático medio. Las unidades de ω_c son rad/s.

Comparación gráfica de los parámetros medidos y estimados

Las Figuras 1, 2, 3 y 4 muestran los valores del módulo complejo medido y estimado para el asfalto de Apiay, según los cuatro modelos analizados. En cada figura, los marcadores de la convención indican el valor medido para el módulo complejo, y la línea para cada conjunto de

marcadores representa la predicción según el modelo reológico. Se observa que para los asfaltos estudiados, los modelos ofrecen una buena capacidad predictiva.

Figura 1: Módulo complejo $|G^*|$ medido y estimado – Modelo Sigmoidal - Asfalto Apiay inicial, RTFOT y RTFOT+PAV

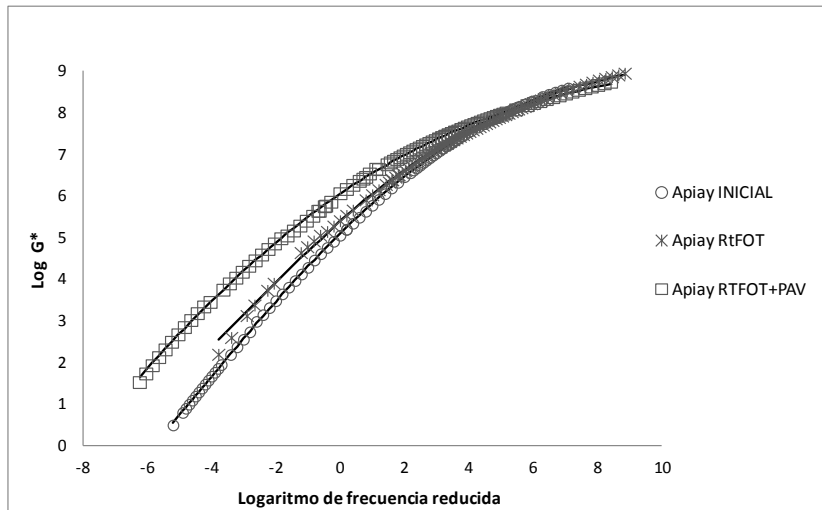


Figura 2: Módulo complejo $|G^*|$ medido y estimado - Modelo Sigmoidal Generalizado - Asfalto Apiay inicial, RTFOT y RTFOT+PAV

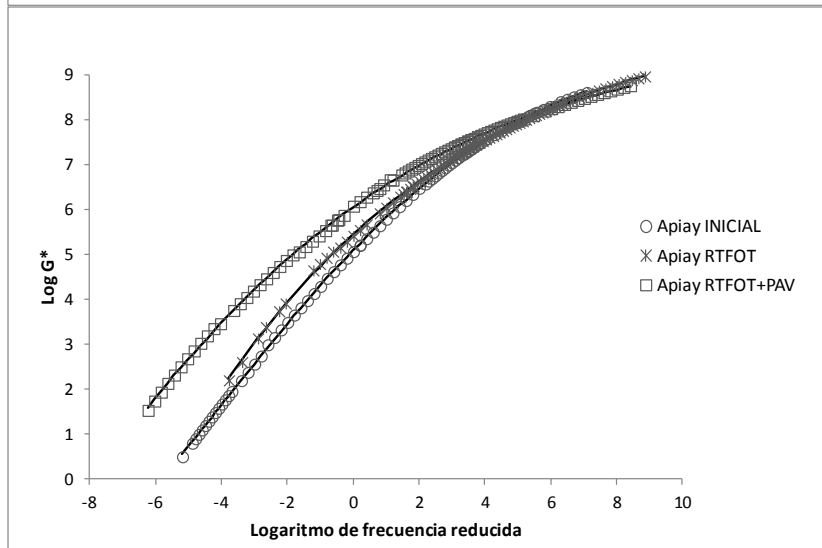


Figura 3: Módulo complejo $|G^*|$ medido y estimado – Modelo Christensen y Anderson – Asfalto Apiay inicial, RTFOT y PAV

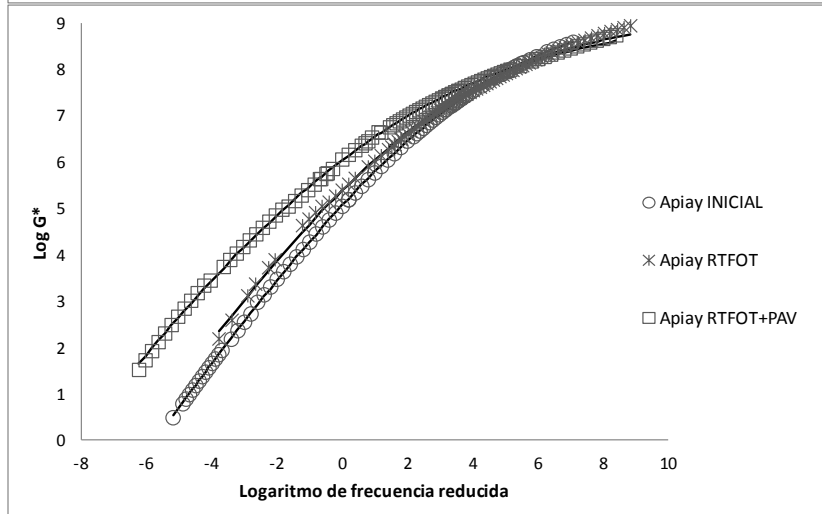
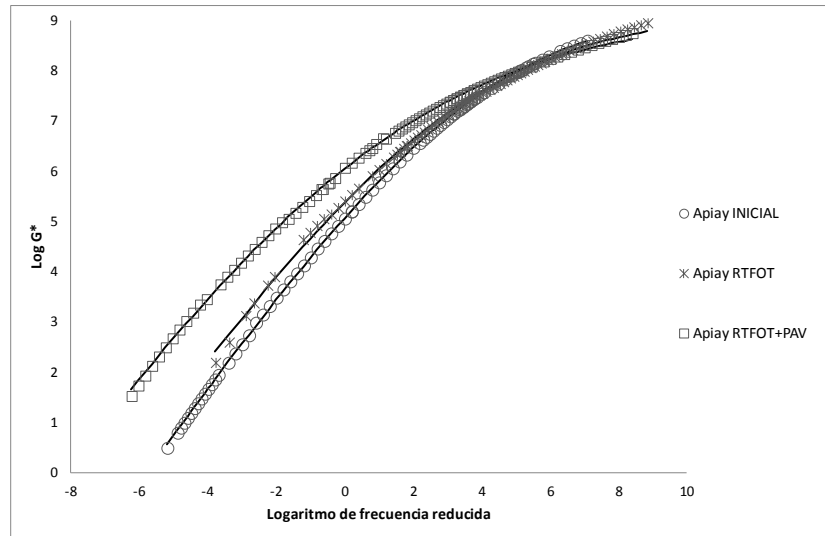


Figura 4: Módulo complejo $|G^*|$ medido y estimado – Modelo Christensen-Anderson-Marasteanu - Asfalto Apiay inicial, RTFOT y PAV



CONCLUSIONES

Se determinaron los parámetros de cuatro modelos reológicos para el módulo complejo de tres asfaltos en tres estados de envejecimiento, y se evaluó la capacidad predictiva de cada modelo mediante el error cuadrático medio obtenido con el método de mínimos cuadrados. Se observó que los cuatro modelos evaluados permiten describir apropiadamente el módulo complejo de los asfaltos Apiay, Barrancabermeja y Boscán a 25°C. La mejor capacidad predictiva, con base en el error cuadrático medio, correspondió al modelo Sigmoidal Generalizado, seguido por el modelo Christensen-Anderson-Marasteanu, Sigmoidal y Christensen-Anderson.

Los valores de los parámetros γ y δ obtenidos para los asfaltos Apiay, Barrancabermeja y Boscán según el Modelo Sigmoidal, son similares a los reportados por Yusoff *et al.* (2010). Los otros parámetros (α y β) difieren, debido a que en el presente estudio se consideró el módulo vítreo (G_g) como parámetro variable. Los valores de los parámetros del Modelo Sigmoidal y Sigmoidal Generalizado no muestran dependencia con el grado de envejecimiento de los asfaltos estudiados. La no linealidad de los modelos Sigmoidal y Sigmoidal Generalizado dificulta la racionalización del significado físico de los parámetros. Adicionalmente, la no linealidad de los modelos hace que los valores de los parámetros dependan de los valores iniciales para el método de mínimos cuadrados.

Se observaron diferencias en los resultados de los asfaltos colombianos para el modelo de Christensen-Anderson, al ser comparados con los resultados del asfalto Boscán. Estas diferencias pudieron ser explicadas con base en el significado físico atribuido a los parámetros del módulo vítreo, índice reológico y frecuencia de transición. El modelo de Christensen-Anderson-Marasteanu mejora la capacidad predictiva por la inclusión de la variable v , pero a su vez este es un parámetro matemático, lo cual dificulta la atribución de un significado físico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación Colciencias, y al Profesor Ludo Zanzotto, director del Centro de Investigación en Materiales Bituminosos de la Escuela de Ingenierías de la Universidad de Calgary en Canadá, por el apoyo brindado para llevar a cabo este y otros estudios.

REFERENCIAS

- Bahia, H. (2008). Modeling of asphalt binder rheology and its application to modified binders, En: Modeling of asphalt concrete, Richard Kim Ed., Mc Graw Hill Professional.
- Bonaquist, R., Christensen, D. (2005). A practical procedure for developing dynamic modulus master curves for pavement structural design, *Transportation Research Record*, Vol. 1929, p. 208-217.
- Christensen, D, Anderson, D. (1992). Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt Cements, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 61, p. 67-116.
- García, G., Thompson, M. (2007). HMA Dynamic modulus predictive models: A review, Research Report FHWA-ICT-07-2005. Illinois Centre for Transportation.
- Marasteanu, O., Anderson, D.A. (1999). Improved Model for Bitumen Rheological Characterization. *Eurobitume Workshop on Performance Related Properties for Bitumens Binder*, Luxembourg, paper no. 133.
- Pellinen, T.K., Witczak, M.W. (2002). Stress Dependent Master Curve Construction for Dynamic (Complex) Modulus. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 71, p. 281-309.
- Pellinen, T.K., Witczak, M.W., Bonaquist, R.F. (2002). Asphalt mix master curve construction using sigmoidal fitting function with non-linear least squares optimization technique. Proceedings of 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, June 2-5, Columbia University, New York, p. 83-101.
- Puello, J., Afanasjeva, N., Alvarez, M. (2011). Evolución de parámetros reológicos, químicos y térmicos de los asfaltos durante el envejecimiento termooxidativo acelerado. XVI Congreso Iberoamericano del Asfalto, Río de Janeiro, Brasil, Noviembre 20-25.
- Rowe, G.M., Baugmgardner, G., Sharrock, M.J. (2008). A generalized logistic function to describe the master curve stiffness properties of binder mastics and mixtures. 45th Petersen Asphalt Research Conference, Laramie, Wyoming, July 14-16. Disponible en: <http://www.abatech.com/documents/Master%Curve.pdf>.
- Yusoff, N.I.Md., Airey, G.D., Hainin, M.R. (2010). Predictability of complex modulus using rheological models, *Asian Journal of Scientific Research*, Vol. 3, No. 1, p. 18-30.
- Yusoff, N.I.Md., Jakarni, F.M., Nguyen, V.H., Hainin, M.R., Airey, G.D. (2013). Modelling the rheological properties of bituminous binders using mathematical equations, *Construction and Building Materials*, Vol. 40, p. 174-188.