

IAG298-01-2013
PARÁMETROS DE CURVAS MAESTRAS DE ASFALTOS
UTILIZADOS EN CHILE
PARÂMETROS DE CURVAS MESTRE DE ASFALTO UTILIZADO
NO CHILE

Felipe Araya
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
felipe.araya@postgrado.usm.cl

Eugenio García
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
eugenio.garcia@alumnos.usm.cl

Rodrigo Delgadillo
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
rodrigo.delgadillo@usm.cl

Gabriel García
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
gabriel.garcia@usm.cl

Carlos Wahr
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
carlos.wahr@usm.cl

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio cuyo objetivo es la obtención de los parámetros que definen la curva maestra de betunes asfálticos utilizados actualmente en Chile: módulo de corte vítreo (G^*_g), frecuencia crossover (W_c), índice reológico (R) y temperatura de definición (T_d) utilizando el reómetro de corte dinámico DSR y el reómetro de viga de flexión BBR. Los ensayos de laboratorio se realizaron en el laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María que cuenta con los equipos SUPERPAVE para caracterizar betunes asfálticos.

Los modelos desarrollados en el proyecto NCHRP 1-41 “Modelo de predicción de grietas en recapados asfálticos para mezclas en caliente” dirigido por Robert L. Lytton que pueden ser incorporado en la Guía de Diseño Empírico Mecanicista Interina AASHTO 2008 requieren que la curva maestra de los betunes asfálticos sea caracterizada por dichos parámetros. Las curvas maestras se confeccionan a partir de resultados de ensayos en los

equipos BBR y DSR. Como segundo paso se utiliza el modelo de Christensen-Anderson para modelar las curvas maestras de los betunes asfálticos ensayados.

Para obtener la temperatura de definición (T_d) se emplea los modelos WLF y Arrhenius que representan los factores de corrimiento (shift factors) de la curva maestra del asfalto.

Adicionalmente se presenta la variación de los parámetros de la curva maestra con envejecimiento del asfalto en RTFO y PAV.

Resumo

Neste artigo apresentamos os resultados de um estudo que visa a obtenção dos parâmetros que definem a curva mestre de betume usado atualmente no Chile: módulo de cisalhamento (G^*_g), de cruzamento da frequência (ω_c) índice reológico vítreo (R) e definida de temperatura (T_d), utilizando o reómetro dinâmico de cisalhamento de DSR e de flexão viga reómetro BBR. Os ensaios laboratoriais foram realizados no laboratório LEMCO Universidade Técnica Federico Santa Maria, que tem equipes Superpave para caracterizar betume.

Os modelos desenvolvidos no NCHRP projeto 1-41 "modelo recauchutados previsão rachaduras na massa asfáltica quente", dirigido por Robert L. Lytton, que pode ser incorporada no design mecanicista Empírica Guia Provisório AASHTO 2008 exige que a curva principal de betume é caracterizada por estes parâmetros. As curvas mestras são feitas a partir dos resultados de testes em equipes BBR e DSR. Como segundo passo utiliza o modelo de Christensen-Anderson para modelar as curvas mestras de betume testados. Para temperatura definição (T_d) é usado Arrhenius e WLF modelos que representam fatores de mudança (fatores de mudança) curva mestre de asfalto. Além disso, mostra a variação dos parâmetros da curva mestra com o envelhecimento do asfalto RTFO e PAV.

INTRODUCCIÓN

Los modelos desarrollados en el proyecto NCHRP 1-41 “Modelo de predicción de grietas en recapados asfálticos para mezclas en caliente” dirigido por Robert L. Lytton que pueden ser incorporado en la Guía de Diseño Empírico Mecanicista Interina AASHTO 2008 requieren que la curva maestra de los betunes asfálticos sea caracterizada por una serie de parámetros (Índice Reológico, frecuencia cross – over, temperatura de definición y Módulo Vítreo del Asfalto).

En esta investigación se desarrollan las curvas maestras para dos asfaltos utilizados en Chile, un asfalto tradicional y un asfalto modificado. Además a partir de las curvas maestras de estos se realiza un ajuste de los datos para el modelo de Christensen – Anderson a dichas curvas obteniendo los parámetros que la caracterizan para finalmente analizar la variación de estos parámetros, en particular con el efecto del envejecimiento de los asfaltos.

CURVAS MAESTRAS

El módulo complejo es una propiedad fundamental de los betunes asfálticos y de las mezclas asfálticas. Este último constituye uno de los datos de entrada más importantes en el diseño mecanicista de pavimentos flexibles mediante la utilización de modelos elásticos multicapas (Wahr et al., 2009). Las fórmulas más modernas de estimación del módulo dinámico (Christensen et al., 2003) utilizan el módulo complejo del betún para estimar el módulo de la mezcla. Se elaboraron las Curvas maestras para los dos betunes estudiados, a partir de ensayos de módulo complejo a diversas temperaturas y frecuencias.

Condiciones De Ensayos

Las curvas maestras fueron confeccionadas utilizando los equipos Superpave DSR y BBR, considerando cada asfalto en su estado original, con envejecimiento primario (RTFOT) y con envejecimiento secundario (PAV) . Los barridos de frecuencia fueron realizados para temperaturas desde los -24° en intervalos de 6° hasta los -6° para bajas temperaturas y desde los 10° en intervalos de 5° hasta los 70°, abarcando tanto altas como bajas temperaturas los barridos de frecuencia para el caso del DSR fue entre [0,3 – 100] [rad/seg] y para el caso del BBR fue entre [0,0042 – 0,125] [rad/seg].

El comportamiento del módulo complejo de corte (G^*) tiene mayores variaciones a frecuencias bajas y tiende a mantenerse a frecuencias altas, por esto cada barrido de frecuencias se realizó en una escala logarítmica, de manera de tomar una mayor cantidad de frecuencias bajas para las mediciones (Delgadillo et al, 2012).

Confección Curvas Maestras

Factores de Corrimiento para DSR

Los factores de corrimiento o (Shift – Factors) fueron determinados mediante la ecuación de Williams – Landel – Ferry para los datos obtenidos mediante el DSR (Rango de alta temperatura) (Williams et al, 1955), para cada temperatura se contó con una serie de quince puntos medidos en el equipo, buscando siempre encontrar un valor para el factor de corrimiento, suavizando las curvas de diferentes temperaturas mediante el ajuste de mínimos cuadrados. La ecuación se utiliza a una temperatura mayor a la de definición (T_d) y en la zona de viscoelasticidad. La temperatura de referencia utilizada fue de 20[°C], los valores de las constantes C_1 y C_2 del modelo para los dos asfaltos analizados y en sus tres estados se presentan en la siguiente tabla:

$$\text{Log } a_T = - \frac{C_1(T-T_R)}{C_2+(T-T_R)} \quad (1)$$

Donde:

a_T : Shift – Factor.

T : Temperatura [°C].

T_R : Temperatura de Referencia [°C].

Tabla 1: Constantes C_1 y C_2 modelo WLF asfalto tradicional

Asfalto Tradicional	Estado Envejecimiento		
	Original	RTFOT	PAV
C1	-11,0	-15,0	-17,5
C2	99,1	130,7	147,1

Tabla 2: Constantes C1 y C2 modelo WLF asfalto modificado

Asfalto Modificado	Estado Envejecimiento		
	Original	RTFOT	PAV
C1	-13,6	-13,4	-16,7
C2	119,3	112,3	130,5

Factores De Corrimiento Para BBR

Los factores de corrimiento o (Shift – Factors) fueron determinados mediante la ecuación de Arrhenius. Para cada temperatura se contó con una serie de seis puntos medidos en el equipo, buscando siempre encontrar un valor para el factor de corrimiento, suavizando las curvas de diferentes temperaturas mediante el ajuste de mínimos cuadrados, ecuación que se utiliza bajo la temperatura de definición (T_d), la energía de activación utilizada fue de 281 KJ/mol.

Una vez determinados los Shift – Factors tanto para altas como bajas temperaturas, se obtienen las curvas maestras para cada uno de los asfaltos estudiados, las que se muestran en la Figura 1

$$\text{Log } a(T) = a \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_d} \right) \quad (2)$$

Donde:

a : Constante.

a_T : Shift – Factor.

T : Temperatura [°K].

T_d : Temperatura de Definición [°K].

Temperatura De Definición

La temperatura de definición (T_d) se entiende como la temperatura hasta la que es válida la ecuación de WLF para temperaturas más bajas es válida la ecuación de Arrhenius (Anderson et al. [1994]), la cual fue determinada mediante la ecuación de William – Landel – Ferry modificada mediante el uso de mínimos cuadrados. Para los asfaltos estudiados la temperatura de definición para cada estado de envejecimiento se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3: Temperatura de definición en sus tres estados de envejecimiento

Tipo de Asfalto	Estado Envejecimiento		
	Original	RTFOT	PAV
	Temperatura de Definición [°C]		
Asfalto Tradicional	-13,3	-10,6	-6,5
Asfalto Modificado	-12,2	-9,9	-3,3

Curva Maestra Asfalto Tradicional y Modificado en Estado Original

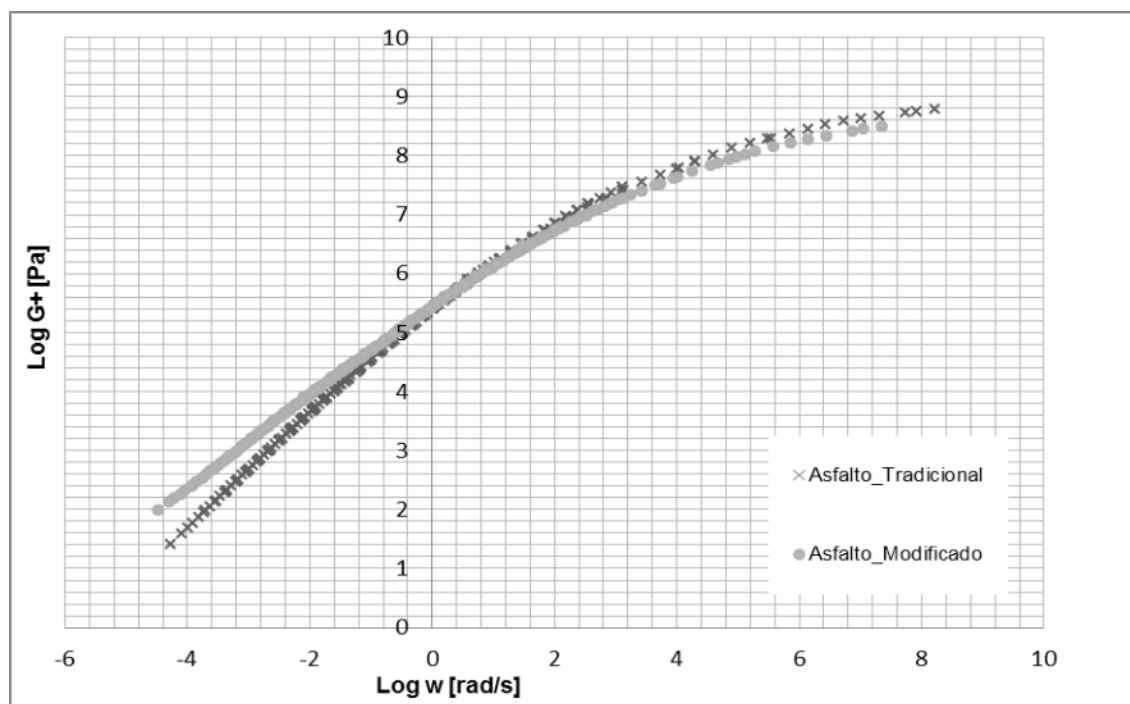


Figura 1: Curva maestra asfalto tradicional y modificado temperatura referencia 20 [°C]

Modelo De Christensen – Anderson

El modelo de Christensen – Anderson señala que cuatro parámetros son necesarios para caracterizar completamente las propiedades de cualquier asfalto (Christensen and Anderson, 1992; Anderson et al., 1994)

Módulo Vítreo (Gg): Es el valor que toma el módulo complejo o de rigidez a bajas temperaturas (altas frecuencias), Gg normalmente se encuentra muy cerca de 1×10^9 Pa, en esfuerzo de corte, para la mayoría de los asfaltos y puede ser utilizado para la mayoría de los propósitos.

Viscosidad en estado estacionario (η_0): Viscosidad en estado estacionario o newtoniana, en ensayos dinámicos se aproxima como el límite de la viscosidad compleja $|\eta^*|$, como el ángulo complejo se aproxima a 90° . La línea de 45° de la curva maestra se aproxima a bajas frecuencias es referida como la viscosidad asintótica. Es indicador de la viscosidad en estado estacionario y el valor de η_0 es específica del asfalto.

Frecuencia cross over (ω_c): Es la frecuencia a la temperatura en que $\tan \delta$ es 1, en este punto el módulo de almacenamiento y de pérdida son iguales, para la mayoría de los asfaltos la frecuencia cross over ω_c es cercana al punto en que la asíntota de la viscosidad intersecta el módulo vítreo. La frecuencia cross over se puede pensar como un parámetro que mide la rigidez, la consistencia general del asfalto a una temperatura determinada y es específica del asfalto.

Índice Reológico (R): Es la diferencia entre el módulo vítreo (G_g) y el módulo complejo dinámico de corte evaluado en la frecuencia cross over. El índice reológico es directamente proporcional al ancho del espectro de relajación e indica el tipo de reología. R no es una medida de la temperatura pero refleja el cambio en el módulo con la frecuencia o el tiempo, por lo tanto es una medida de la dependencia de la tasa de corte del asfalto. R es específico del asfalto.

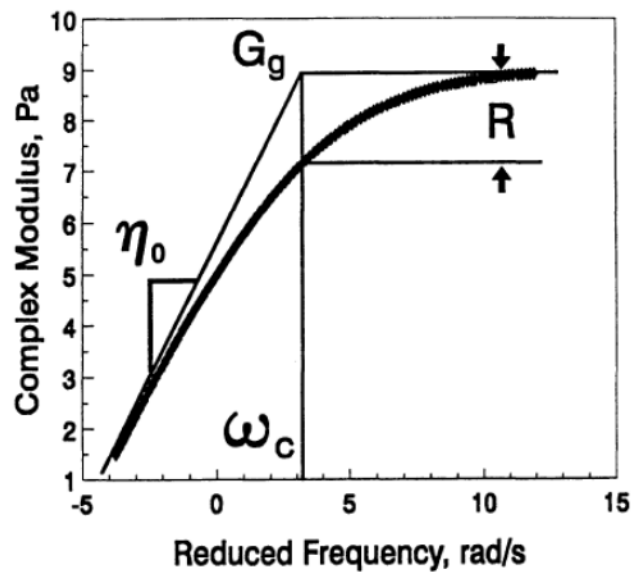


Figura 2: Parámetros fundamentales del modelo CA "SHRP-A-369"

El modelo de Christensen – Anderson está definido por la siguiente expresión:

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

Dónde:

G^* : Módulo complejo de corte

G_g : Módulo vítreo (aproximadamente igual a 1 GPa)

ω : Frecuencia reducida a la temperatura de referencia [rad/seg]

ω_c : Frecuencia cross over a la temperatura de referencia

R : Índice reológico

Modelo De Christensen – Anderson Asfalto Tradicional Estado Original

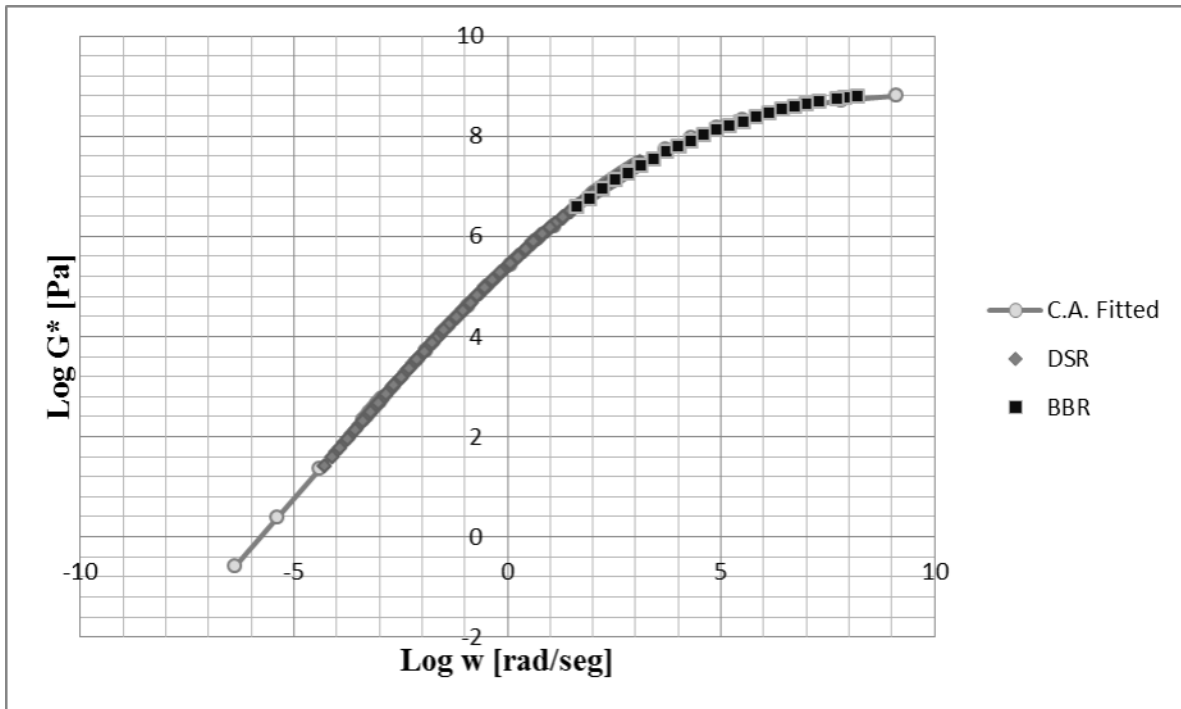


Figura 3: Curva maestra modelo CA asfalto tradicional temperatura referencia 20 [°C]

Modelo De Christensen – Anderson Asfalto Modificado Estado Original

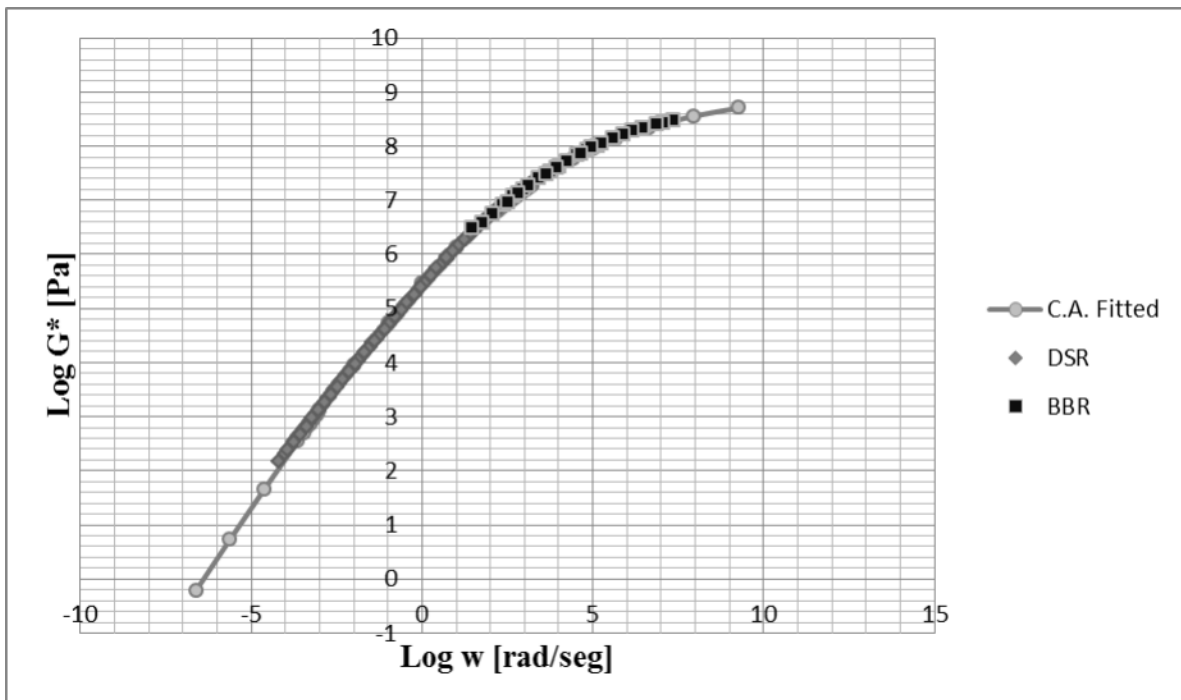


Figura 4: Curva maestra modelo CA asfalto modificado temperatura referencia 20 [°C]

Con el uso del modelo de Christensen – Anderson, es posible obtener los parámetros que caracterizan una curva maestra, éstos fueron obtenidos mediante un ajuste no lineal de minimos cuadrados de las ecuaciones (1), (2) y (3) mediante una planilla Excel, utilizando

los datos obtenidos en laboratorio. Para la confección de la curva maestra completa la rigidez en fluencia obtenida con el BBR es transformada a G^* utilizando la siguiente expresión:

$$G^*(\omega) \approx \frac{S(t)}{3}, \quad (\omega) = \frac{1}{t} \quad (4)$$

Donde:

$G^*(\omega)$:Módulo complejo de corte

$S(t)$:Rigidez en fluencia

ω : frecuencia angular [rad/seg]

t : tiempo [seg]

Para el caso de los asfaltos analizados los resultados son los presentados en las tablas 4 y 5.

Tabla 4: Valores parámetros modelo CA asfalto tradicional con envejecimientos

Asfalto Tradicional	Estado Envejecimiento		
	Original	RTFOT	PAV
Log (Gg [Pa])	8,87	8,93	8,97
Log (Wc [rad/seg])	3,07	2,42	1,42
Log (R[Pa])	1,43	1,59	1,87
Td [°C]	-13,3	-10,6	-6,5

Tabla 5: Valores parámetros modelo CA asfalto modificado con envejecimientos

Asfalto Modificado	Estado Envejecimiento		
	Original	RTFOT	PAV
Log (Gg [Pa])	9,00	9,04	9,11
Log (Wc [rad/seg])	2,45	2,02	0,22
Log (R [Pa])	2,08	2,43	2,77
Td [°C]	-12,2	-9,9	-3,3

En la figura 5 se ilustran las curvas maestras del asfalto modificado en sus tres estados de envejecimiento estudiados.

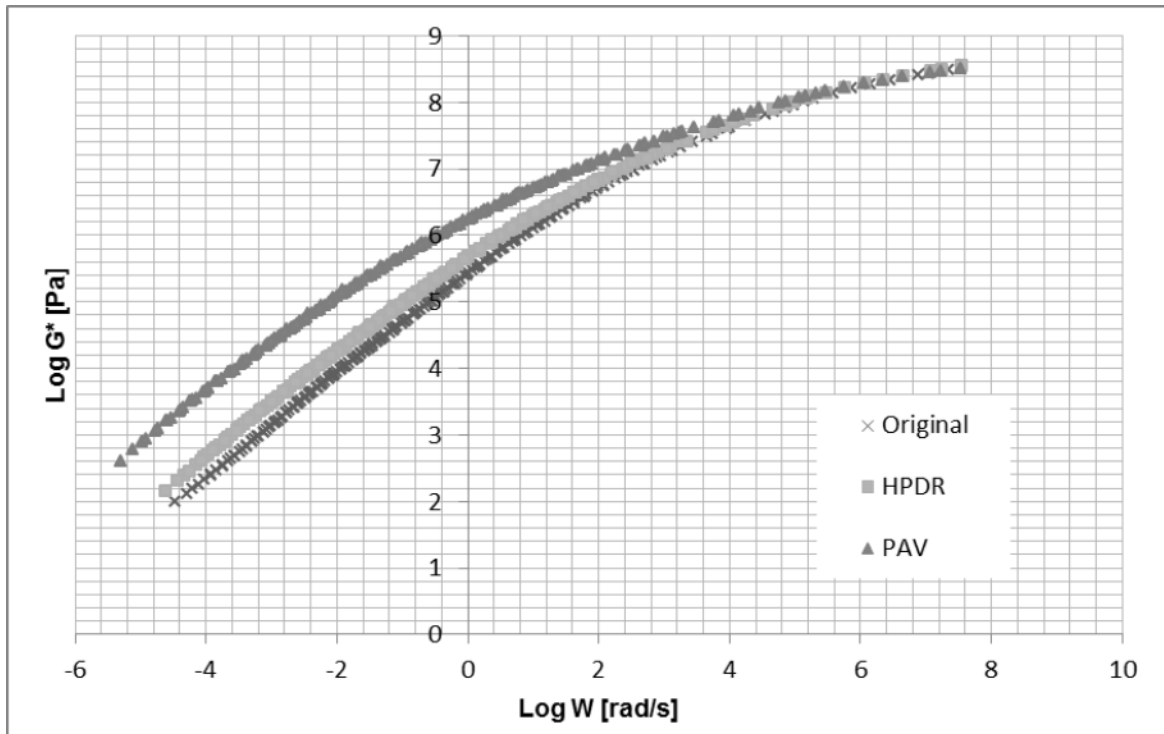


Figura 5: Curva maestra asfalto modificado en sus tres estados de envejecimiento

CONCLUSIONES

- Se observa una disminución del valor de la frecuencia cross over (ω_c) con el envejecimiento tanto para el asfalto tradicional como el modificado.
- El valor del índice reológico R aumenta con el envejecimiento del asfalto, siendo mayor en el asfalto modificado.
- Se observa que para ambos asfaltos el valor del logaritmo del módulo vítreo (G_g) tiende al valor de 9, el valor es levemente mayor para el asfalto modificado respecto al tradicional.
- La temperatura de definición (T_d) aumenta con el envejecimiento tanto para el asfalto tradicional como para el modificado, lo que se interpreta como un aumento en la temperatura límite para la validez de las ecuaciones de WLF (sobre temperatura de definición) y Arrhenius (bajo temperatura de definición).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por CONICYT, a través del proyecto FONDECYT número 11110255.

REFERENCIAS

Delgadillo, R., Wahr, C., García, G., Araya, F., González, A., Zúñiga, R. (2012), “Caracterización reológica avanzada de betunes tradicionales y modificados utilizados actualmente en Chile”. Revista Ingeniería en Construcción, Vol 27 2012.

Delgadillo, R., Wahr, C., Zúñiga, y Silva, J. (2009), “En Busca de una Especificación Moderna de Ligantes Bituminosos para Chile”. Anales XV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto CILA, 22 - 27 Nov 2009, Lisboa, Portugal.

NCHRP 1-41 Models for Predicting Reflection Cracking for Hot-Mix Asphalt Overlays Robert Lytton, Ph.D., P.E. Rong Luo, Ph.D. Zachry Department of Civil Engineering Texas A&M University, 2008, Chicago, Illinois, June 19.

Wahr, C., Cofré, J. “Estudio Reológico de Asfaltos Chilenos Naturales y Modificados con DSR”, Trigésima Tercera Reunión del Asfalto 2004, Argentina.

Christensen, D. W., Pellinen, T., and Bonaquist, R., “Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete,” *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 72, 2003.

Anderson D.A., Christensen D.W., Bahia H.U, Dongré, R., Sharma M.G, Antle C.E and Button, J. Binder Characterization and Evaluation. Volume 3: Physical Characterization. SHRP-A-369. National Research Council, Washington D.C., 1994.

Christensen, D. W. and Anderson, D. A., “Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt,” *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 61, 1992.

Williams, M.L., Landel, R.F. and Ferry, J.D. The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-Forming Liquids. *Journal American Chemical Society*, Vol. 77, pp. 3701–3707, 1955.