

Correlación entre parámetros reológicos del cemento asfáltico y su resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas en caliente

Leonardo Ochoa
lochoa@kao.com
Raymundo Benítez
rbenitez@kao.com

Álvaro Gutiérrez
agutierrez@kao.com

El agrietamiento es uno de los deterioros más importantes que se presentan en un pavimento flexible y el comportamiento viscoelástico del betún juega un papel determinante en la resistencia frente al agrietamiento y en la actualidad el parámetro " $G^*sen\delta$ " implícito en la clasificación por desempeño (PG) ha sido reportado por numerosas investigaciones como inadecuado y poco eficaz para valorar el desempeño del ligante asfáltico, sobre todo cuando se emplean betunes fuertemente modificados. Debido a lo anterior, en el presente estudio se realizaron barridos de frecuencia, deformación y temperatura empleando un Reómetro de Corte Dinámico (DSR) así como ensayos de rigidez a la fluencia empleando el Reómetro de Viga en Flexión (BBR) sobre distintos betunes con el propósito de identificar un indicador reológico que permita discernir de forma más acertada el potencial de agrietamiento de betunes modificados con elastómeros, plastómeros, ceras, aditivos rejuvenecedores, endurecidos con ácido polifosfórico o combinación de los anteriores. Para ello, se abordaron a nivel betún diferentes metodologías de análisis en donde para cada ligante evaluado los índices reológicos determinados fueron comparados contra sus respectivos Índices de Flexibilidad (FI) obtenidos en la prueba de energía de fractura en viga Semi-Circular (AASHTO TP124-18) ejecutado en mezclas bituminosas en caliente fabricando las probetas de laboratorio con el mismo tipo de agregado, distribución granulométrica, volumetría, envejecimiento y contenido de asfalto. Los resultados más sobresalientes posicionan al método Glover-Rowe modificado como la técnica de análisis reológico que mejor distingue la propensión al agrietamiento del betún con un coeficiente de correlación lineal muy fuerte de 0.914 con respecto al índice de Flexibilidad medido en la mezcla bituminosa. Asimismo, se encontró que la temperatura de transición viscoelástica (TVET), el parámetro ΔT_c , y el Barrido de Amplitud Lineal (LAS) sostienen una menor correlación de 0.851, 0.804 y 0.787 con el Índice de Flexibilidad, respectivamente.

Palabras Clave: Betún, parámetros reológicos, agrietamiento, desempeño.

Cracking is one of the most important distresses that can occur in a flexible pavement and the viscoelastic behavior of asphalt binder has great influence in this phenomenon. However, $G^*sen\delta$ cracking control parameter from Performance Grade (PG) methodology has been reported by several investigations as an inadequate and ineffective parameter to assess asphalt performance, especially when heavily modified asphalt binders are used. Therefore, in the present study frequency, deformation and temperature sweeps were carried out using a Dynamic Shear Rheometer (DSR) as well as stiffness and flow tests using the Bending Beam Rheometer (BBR) on different binders with the aim of finding a suitable rheological indicator that allows discriminating more accurately the cracking potential of asphalt binders modified with elastomers, plastomers, waxes, rejuvenating additives, polyphosphoric acid or a combination of the above mentioned. For this, different analysis techniques were addressed at asphalt

Correlación entre parámetros reológicos del cemento asfáltico y su resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas en caliente

binder level where for each evaluated asphalt the calculated rheological index were compared against their respective Flexibility Index (FI) obtained in the Semi-Circular beam fracture energy test (AASHTO TP124- 18) performed in hot mix asphalt fabricated with the same type of aggregate, granulometric distribution, air void, aging and asphalt content. The most outstanding results position the modified Glover-Rowe method as the rheological analysis technique that best distinguishes cracking propensity of asphalt binders with a very strong linear correlation coefficient of 0.914 with respect to the Flexibility index measured in the asphalt mix. Additionally, it was found that the viscoelastic transition temperature (TVET), the ΔT_c parameter, and the Linear Amplitude Sweep (LAS) hold a lower correlation of 0.851, 0.804 and 0.787 with the Flexibility Index, respectively.

Keywords: Asphalt binder, rheological parameter, cracking resistance, performance.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de su vida útil un pavimento flexible se ve sometido a la acción destructiva tanto de las repeticiones de carga de los vehículos pesados como de los ataques medioambientales, los cuales generan en la capa asfáltica agrietamiento y deformaciones permanentes. Para abordar estos deterioros los esfuerzos de la industria del asfalto se han centrado primordialmente en mejorar la calidad del agregado pétreo, emplear metodologías de diseño de mezcla bituminosa basadas en la estabilidad y rigidez o bien en la utilización de betunes modificados. Sin embargo, se ha demostrado que estas contramedidas están enfocadas en la eliminación de la rodera y no toman en consideración el agrietamiento [1]. El agrietamiento es un fenómeno bastante complejo que, si aislamos factores externos a la composición de la mezcla asfáltica tal como la intensidad del tránsito, la estructura del pavimento, las condiciones climáticas y los procesos constructivos, depende fundamentalmente de las características intrínsecas del betún. El betún es un material viscoelástico cuyo comportamiento está en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de carga, es decir; a alta temperatura o bajo carga sostenida el asfalto actúa como un líquido viscoso y fluye ocasionando deformación permanente, pero a bajas temperaturas o bajo cargas muy rápidas se comporta como un sólido elástico que si se aplica una carga excesiva puede romperse propiciando el agrietamiento o la propagación de fisuras. Adicionalmente, al tratarse de un compuesto orgánico las moléculas del betún reaccionan con el oxígeno del medio ambiente provocando envejecimiento, lo cual se traduce en una estructura más frágil [2]. Para

capturar todo este comportamiento inicialmente se utilizó la clasificación por penetración y, después, la clasificación por viscosidad. Sin embargo, estas propiedades físicas únicamente aportan una idea de la dureza y consistencia del betún a determinada temperatura y en una condición de oxidación estática, pero no ayudan a predecir el desempeño del ligante bituminoso a temperaturas en las que normalmente opera un pavimento en servicio.

Debido a estas deficiencias se implementó el sistema de clasificación por grado de desempeño (PG), el cual está basado en ensayos reológicos/mecánicos enfocados en medir el módulo complejo de corte (G^*), ángulo de fase (δ), rigidez (St) y velocidad de deformación (m -valor) en un amplio rango de temperaturas en muestras con y sin envejecer que, mediante principios de ingeniería, estas propiedades pueden ser correlacionadas con el desempeño en campo. No obstante, las especificaciones y reglas que rigen esta metodología datan de la década de los 90's y fueron originalmente implementadas para betunes sin modificar. Hoy en día, pese a la enorme cantidad de productos modificadores reológicos disponibles en el mercado, únicamente ha habido innovaciones en el parámetro de control de la deformación permanente en donde $G^*/\text{sen}\delta$ poco a poco ha sido sustituido por el Creep Compliance no recuperable (J_{nr}) dada su mayor habilidad para predecir el flujo plástico en el concreto bituminoso [3]. No así, para el parámetro de control del agrietamiento por fatiga $G^*\text{sen}\delta$, el cual ha sido reportado como inadecuado y poco eficaz en la predicción del agrietamiento [4]. La situación anterior, abre la puerta a investigar diferentes alternativas para categorizar la resistencia al agrietamiento de betunes con y sin modifi-

cadore, siendo la aportación de este trabajo una exploración a nuevas técnicas reológicas que permitan seleccionar betunes con características adecuadas a las condiciones de tránsito actuales. Si bien podemos encontrar una gran cantidad de ensayos para evaluar el agrietamiento en esta investigación fueron seleccionadas aquellas técnicas con mayor soporte en la literatura y que, además, permitieran encontrar los parámetros de resistencia en un periodo de tiempo razonable.

2. OBJETIVO

Evaluar la habilidad de diferentes parámetros reológicos medidos en el betún para diferenciar la resistencia al agrietamiento de mezclas bituminosas en caliente a través de su correlación lineal de Pearson con el índice de Flexibilidad

3. PLAN EXPERIMENTAL

Para lograr el objetivo del estudio, se llevó a cabo un plan experimental de tres fases. En primera instancia, un betún convencional proveniente de refinería fue utilizado como base para producir nueve asfaltos modificados con diferentes polímeros, ceras, aditivos y ácido polifosfórico. La cantidad y combinación de cada modificador reológico fue establecida con base en la siguiente premisa:

obtener el grado de desempeño a alta temperatura PG 76-XX o superior. La segunda etapa se centró en evaluar el comportamiento mecánico-reológico de los betunes considerados en el estudio. Para ello, primero fue necesario someter las muestras de ligante a un proceso de envejecimiento a largo plazo (Horno rotatorio de película delgada + Vasija de envejecimiento a presión). Posteriormente, el Reómetro de Corte Dinámico (DSR) fue utilizado para estudiar el fenómeno de agrietamiento dentro y fuera del rango viscoelástico lineal (VEL); por un lado, se efectuaron barridos de frecuencia desde 0.63 hasta 628.30 rad/seg y barridos de temperatura entre 5 y 60°C empleando una deformación constante de 1% y, por el otro lado, se realizaron barridos de amplitud lineal desde 0.1 hasta 30% (AASHTO TP101) a temperatura y frecuencia constante de 25°C y 10 Hz, respectivamente. Con los datos recopilados en el análisis VEL se construyeron las curvas maestras con el modelo matemático Christensen Anderson y Marasteanu (CAM), a partir de las cuales se determinaron los siguientes parámetros reológicos: Glover- Rowe, Glover-Rowe modificado y la temperatura de transición vítrea. Por su parte, del ensayo LAS fue posible calcular la ley de fatiga (Nf) de cada betún obtenida mediante el principio de daño continuo viscoelástico simplificado (S-VECD). Adicionalmente, el Reómetro de Viga en Flexión (BBR) se utilizó para determinar la diferencia entre las temperaturas críticas de ri-

Tabla 1. Características de los betunes en estudio.

AC ID	Original G* / Sen δ, kPa	RTFO G* /Sen δ, kPa	G* x Sen δ, kPa	PAV S(t), mPa	m-valor	PG
REF*	1.83@64°C	3.38@64°C	3264@25°C	105@-12°C	0.308@-12°C	64-22
A**	1.35@82°C	2.48@82°C	1217@34°C	111@-12°C	0.302@-12°C	82-22
B**	1.44@76°C	2.67@76°C	1029@28°C	114@-18°C	0.331@-18°C	76-22
C**	1.36@76°C	2.49@76°C	1485@34°C	77@-6°C	0.313@-6°C	76-22
D**	1.48@82°C	2.53@82°C	1173@34°C	98@-12°C	0.302@-12°C	82-22
E**	1.66@76°C	2.95@76°C	1147@37°C	35@0°C	0.323@0°C	76-22
F**	1.35@76°C	2.64@76°C	783@31°C	53@-12°C	0.326@-12°C	76-22
G**	1.43@76°C	2.87@76°C	1080@31°C	67@-12°C	0.321@-12°C	76-22
H**	1.42@76°C	3.01@76°C	1504@31°C	93@-12°C	0.309@-12°C	76-22
I***	1.12@82°C	2.27@82°C	975@34°C	85@-12°C	0.320@-12°C	82-22

Aplicación= *Mezcla bituminosa convencional, **Mezcla con betún modificado, ***Mezcla bituminosa tibia.

Correlación entre parámetros reológicos del cemento asfáltico y su resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas en caliente

gidez (St) y velocidad de fluencia (m-valor) del betún, lo cual permitió calcular el parámetro de agrietamiento ΔT_c . En la tercera etapa, se fabricaron las probetas de laboratorio que fueron sometidos al ensayo de Energía de Fractura Semi-Circular de Illinois (AASHTO TP124). Finalmente, con toda la información recopilada en la campaña de experimentos fue posible examinar la asociación entre los diferentes parámetros reológicos del ligante y el Índice de Flexibilidad (FI) obtenido en la mezcla bituminosa.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Betún

El betún base corresponde a un EKBÉ® clasificado por su grado de desempeño como PG 64-22. Sin embargo, diferentes modificadores reológicos fueron añadidos. La Tabla 1 recopila los grados de desempeño resultantes con base en la especificación AASHTO M320 más reciente.

4.2 Ensayos reológicos de agrietamiento

En este trabajo de investigación se distinguen ensayos reológicos de diferente naturaleza; por un lado, mediciones dentro del rango viscoelástico lineal (región VEL) donde la muestra de betún no es dañada y, por el otro lado, barridos de deformación en donde la microestructura del ligante es alterada debido a la acumulación del daño producto de los incrementos en la amplitud de deformación fuera de la zona VEL. A continuación, se explican de manera breve cada uno de los ensayos adoptados y el parámetro reológico de agrietamiento obtenido.

Barridos de frecuencia y temperatura (Curva Maestra)

La curva maestra de un betún proporciona la relación entre la rigidez y la frecuencia reducida en un amplio espectro de temperaturas y frecuencias de tal manera que es posible predecir propiedades viscoelásticas lineales (G^* , δ , G' , G'') a cualquier frecuencia y a cualquier temperatura. Para construir las curvas maestras fue necesario medir el módulo complejo de corte (G^*) utilizando 1%

de deformación y platos paralelos de 8 mm en las frecuencias y temperaturas de 0.63, 1.25, 2.50, 4.99, 10.00, 19.87, 39.64, 79.10, 157.80, 314.90, 638.30 rad/seg y 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60°C, respectivamente. El comportamiento mecánico global fue capturado utilizando la función de distribución Christensen-Anderson y Marasteanu[5] presentado en las ecuaciones (1) y (2), las cuales mediante el principio de superposición tiempo temperatura ajustaron los datos del barrido de frecuencia isotérmico a una curva única de referencia.

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

$$\delta = \frac{90}{\left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^{\frac{\log 2}{R}} \right]} \quad (2)$$

Donde: G^* = módulo de corte complejo, δ = ángulo de fase, G_g = módulo vítreo aproximadamente igual a 1 GPa, ω = frecuencia, ω_c = frecuencia de cruce (G' igual a G''), ω_r = frecuencia reducida y R = es la diferencia entre el módulo vítreo y el módulo de corte complejo en la frecuencia de cruce.

Por su parte, la frecuencia reducida (ω_r) se calculó utilizando las ecuaciones (3) y (4) mediante el factor de desplazamiento " αT " determinado a través de la formulación Williams-Landel-Ferry.

$$\omega_r = \alpha T \times \omega \quad (3)$$

$$\log_{\alpha T} = - \frac{C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)} \quad (4)$$

Donde: C_1 y C_2 = constantes de ajuste del modelo, T_r = temperatura de referencia y T = temperatura a la que se realiza el ajuste.

A partir de las curvas maestras, se calcularon los parámetros reológicos de agrietamiento Glover-Rowe ($G-R$), Glover-Rowe modificado ($G-R_m$) y la temperatura de transición viscoelástica (T_{VET}), los cuales se explican bre-

vemente en los siguientes apartados.

Parámetro Glover-Rowe y Glover-Rowe modificado (G-R_m)

El parámetro Glover-Rowe presentado en la ecuación (5) inicialmente fue utilizado para evaluar la durabilidad de betunes que forman parte de pavimentos aeroportuarios, debido a que las condiciones del ensayo original (15°C y 0.005 rad/seg) están más asociadas con el fallo por tensión/tracción en la región frágil (agrietamiento térmico/bloque) estableciendo un valor de alerta y máximo de 180 y 600 kPa, respectivamente. Sin embargo, el reporte de investigación 9-59 de la NCHRP sugiere modificar la temperatura de análisis y la velocidad de oscilación por lo cual recomienda utilizar la temperatura intermedia de trabajo efectiva esperada en el pavimento (25°C en esta investigación) y una frecuencia de 10 rad/seg, respectivamente. De esta manera se pretende obtener una condición representativa del estado viscoelástico del betún y de la velocidad de operación de los vehículos (10 rad/seg supone simular la propagación de una onda de corte a una velocidad de circulación de 80 km/h) y, por ende, las propiedades medidas en el ligante corresponden de forma más consistente con el fenómeno de agrietamiento por fatiga [6].

$$G - R = \frac{|G^*|(\cos \delta)^2}{\sin \delta} \quad (5)$$

Donde: G* = módulo complejo de corte, δ = ángulo de fase.

Finalmente, para ser congruente con las especificaciones actuales de SUPERPAVE el reporte NCHRP 9-59 propone un valor preliminar máximo de 5000 kPa para betunes después de RTFO+PAV.

Temperatura de transición Sol-Gel o Temperatura de transición viscoelástica (T_{VET})

La temperatura de transición Sol-Gel también conocida como temperatura de transición viscoelástica (T_{VET}) es otra propiedad relacionada con el agrietamiento y se

define como la temperatura a la cual el módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') poseen la misma magnitud, o bien δ es igual a 45° a determinada frecuencia (10 rad/seg en este estudio). Los pavimentos asfálticos operan en un amplio rango de temperaturas de servicio y cuando el pavimento se encuentra por arriba de la T_{VET} el asfalto responde o actúa deformándose ante los esfuerzos inducidos exhibiendo un comportamiento más parecido a un fluido viscoso en lugar de agrietarse debido a la influencia de la componente viscosa (G'') predominante [7]. Por lo tanto, cuanto más baja sea T_{VET}, menos propenso será el betún para agrietarse.

Barrido de amplitud lineal (Linear Amplitude Sweep Test)

El ensayo LAS es una prueba de corte cíclica relativamente nueva ejecutada en el DSR a temperatura intermedia (25°C para esta investigación) que utiliza amplitudes de carga linealmente crecientes para acelerar el daño, cuyo objetivo es evaluar la habilidad del betún para resistir agrietamiento por fatiga. La prueba consiste en dos procedimientos sobre la misma muestra. En primera instancia, se realiza un barrido de frecuencias (0.2, 0.4, 0.8, 1, 2, 4, 8, 10, 20 y 30 Hz) a un nivel de deformación constante de 0.1% con el propósito de capturar las propiedades reológicas del betún antes de dañarlo. Enseguida, se realiza un barrido de deformación destructivo a 10 Hz de frecuencia en donde la sollicitación de carga consiste en aplicar deformación constante durante intervalos de 10 segundos. Cada intervalo está conformado por 100 ciclos de carga y la amplitud de deformación en el primero intervalo es de 0.1%. Las amplitudes de deformación aumentan 1% en cada intervalo consecutivo hasta alcanzar 30%. Por último, los resultados de ambas pruebas se analizan utilizando la teoría de daño continuo viscoelástico simplificado (S-VECD) del cual se obtiene la ley de fatiga del betún señalado en el modelo potencial de la ecuación (6).

$$N_f = A(\gamma_{máx})^{-B} \quad (6)$$

Correlación entre parámetros reológicos del cemento asfáltico y su resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas en caliente

Donde: N_f = número de ciclos a la falla, $\gamma_{m\acute{a}x}$ = deformación máxima por tensión esperada en el betún bajo carga vehicular, A = coeficiente que representa la capacidad del betún para mantener su integridad durante los ciclos de carga y B = coeficiente que describe la sensibilidad del betún a los cambios en el nivel de deformación aplicado. Los coeficientes A y B del modelo S-VECD dependen de las características de cada ligante y los detalles sobre su formulación matemática se pueden encontrar en [8].

Parámetro ΔT_c .

Recientemente el "Asphalt Institute" planteó un parámetro llamado ΔT_c que intenta representar el equilibrio entre la rigidez del betún y su capacidad de relajarse o liberar tensiones cuando se presentan bajas temperaturas en el pavimento [9]. ΔT_c se determina utilizando los resultados del reómetro de viga en flexión a múltiples temperaturas de congelamiento, particularmente las temperaturas exactas a la cual la rigidez del betún es igual a 300 mPa y la velocidad de flujo mejor conocida como pendiente de deformación m -valor es igual a 0.300. Entonces, el cálculo de ΔT_c se plantea en la ecuación (7):

$$\Delta T_c = T_{c(SI)} - T_{c(m)} \quad (7)$$

En general, conforme el valor de ΔT_c es más negativo significa de manera directa menor capacidad del betún para soportar el agrietamiento en bloque y, de manera indirecta, baja resistencia a la fisuración por fatiga. Se recomienda un valor máximo de -5°C .

4.3 Diseño de la mezcla bituminosa y elaboración de las probetas de laboratorio.

El esqueleto mineral se definió mediante métodos gráficos con la finalidad de proyectar una estructura granular que se localizara dentro de los puntos de control para una mezcla SUPERPAVE (AASHTO M323) con tamaño nominal de 12.5 milímetros. Los agregados pétre-

os utilizados corresponden a roca basáltica 100% triturada. El contenido óptimo de betún que cubrió los requerimientos volumétricos fue de 5.8% y se determinó a partir de cuatro/cinco porcentajes de prueba empleando una energía de compactación de 100 giros. Una vez establecida la fórmula de trabajo se fabricaron las muestras de laboratorio con un objetivo de $7\pm 0.5\%$ de vacíos de aire con la misma granulometría y contenido de betún variando únicamente el tipo de ligante utilizado. Es importante mencionar que todas las mezclas bituminosas se sometieron a un envejecimiento a largo plazo en horno de 8 horas a 135°C antes de ser compactadas a 150°C .

4.4 Determinación del potencial de agrietamiento de mezclas bituminosas (I-FIT).

Para evaluar la resistencia a la fisuración a temperatura intermedia (25°C en esta investigación) de las mezclas bituminosas se utilizó el nuevo método de prueba Índice de Flexibilidad de Illinois (AASHTO TP-124). La prueba se efectuó sobre probetas semi-circulares con una ranura vertical en la parte inferior central sometidos a flexión en tres puntos para crear fractura en modo I. Durante el ensayo una prensa servo-neumática aplica monotónicamente carga por compresión diametral a una velocidad de 50 milímetros/minuto llevando la probeta hasta la ruptura, mientras que el desplazamiento a la falla es continuamente monitoreado por un sistema de sensores LVDT's. Con base en la información registrada, se logra crear un gráfico llamado curva "carga vs desplazamiento", la cual, a su vez, permite calcular la energía de fractura, el trabajo de fractura, y el índice de flexibilidad por medio de las ecuaciones (8), (9) y (10), respectivamente.

$$G_f = \frac{W_f}{B \times L} \quad (8)$$

Donde: G_f = energía de fractura en J/m^2 , B = espesor espécimen en mm, L = altura área de fractura en mm y W_f = es el trabajo realizado durante el proceso de fisuración en $\text{KN}\cdot\text{mm}$.

$$W_f = \int_0^{\Delta R} P \cdot du \quad (9)$$

Donde: P= carga máxima aplicada en KN, u= desplazamiento en mm y ΔR= es el desplazamiento en mm cuando la carga aplicada en la región post-pico es cercana a cero.

$$FI = \frac{G_f}{abs(m)} \times A \quad (10)$$

Donde: FI= índice de flexibilidad, m= es el valor de la pendiente formada en el punto de inflexión de la curva post-pico en KN/mm y A= es un factor de conversión y escalamiento fijado en 0.01. En general, altos valores de índice de flexibilidad indican una mayor resistencia del concreto asfáltico ante la fractura y, por ende, a la propagación de grietas.

5. RESULTADOS

Los resultados que se muestran en los próximos apartados corresponden al valor promedio obtenido después de realizar las pruebas por duplicado. Adicionalmente, es importante recalcar que el estudio se enfoca en la efectividad de cada método para evaluar el agrietamiento

en el asfalto a partir de su correlación con el índice de Flexibilidad y no en la comparación directa entre las ventajas y desventajas que ofrecen los diferentes modificadores reológicos utilizados, por ende, los resultados se centran en primera instancia en la factibilidad de cumplir o no con las especificaciones recomendadas en la literatura para cada parámetro reológico del betún.

5.1 Betún

5.2 Ensayos reológicos

Por un lado, la Figura 1 exhibe a través de la curva maestra el nivel de rigidez que presenta cada betún en función de la frecuencia reducida, así como la variación del ángulo de fase (variables utilizadas para el cálculo del parámetro G-R, G-Rm y TVET) y, por el otro lado, la Tabla 2 recopila los indicadores reológicos calculados con las metodologías expuestas en el apartado 4.2 a 25°C y después de envejecer los betunes en RTFO+PAV.

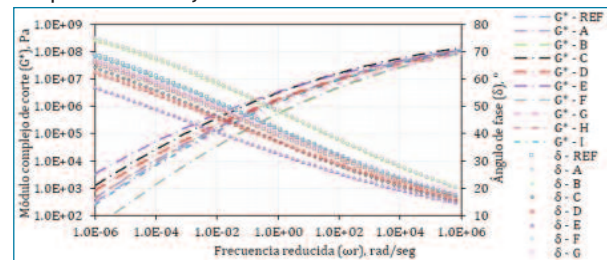


Figura 1. Curva maestra a una temperatura de 25°C en asfaltos envejecidos a largo plazo.

Tabla 2. Resultados de los índices reológicos y su desempeño frente al agrietamiento.

Apartado:	4.2 (Ensayos reológicos de agrietamiento)							
	G-R	G-Rm	TVET	Delta Tc	LAS,2.5%	LAS,5%	LAS,10%	LAS,15%
Asfalto								
REF	371	4008	40.5	-7.9	838,442	31,732	1,202	166
A	399	4372	44.5	-8.7	2,702,126	97,520	3,519	463
B	56	1051	28.5	-4.1	2,465,522	158,594	10,214	1,991
C	969	7516	50.0	-11.4	149,022	4,178	117	17
D	576	4744	54.0	-9.9	288,760	7,409	190	24
E	1568	9357	71.5	-15.0	295,919	4,178	58	5
F	62	1891	28.0	-7.2	2,222,729	131,563	7,787	1,435
G	256	2326	45.5	-10.1	7,048,200	265,056	9,968	1,357
H	449	3872	47.0	-7.5	2,563,313	74,287*	2,153	294
I	193	2346	41.0	-6.5	818,868	35,189	1,512	288

Correlación entre parámetros reológicos del cemento asfáltico y su resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas en caliente

La tabla superior permite observar que únicamente los betunes **B** y **F** son poco susceptibles o están fuera de peligro de presentar agrietamiento de acuerdo con la interpretación del parámetro Glover-Rowe@15°C/0.005 rad/seg, mientras que, los betunes **C** y **E** exhiben una elevada propensión al agrietamiento, ya que el balance entre la componente elástica y viscosa sobrepasa los 600 kPa. Por su parte, el resto de los asfaltos presentan un comportamiento aceptable y por debajo del límite máximo permisible (600 kPa) acercándose a esta frontera aquellos betunes identificados con la letra **D** y **H**. Bajo la óptica del parámetro Glover-Rowe modificado (25°C@10 rad/seg) todos los betunes presentan en general características adecuadas para resistir el agrietamiento por fatiga con la excepción nuevamente de los asfaltos **C** y **E**. De manera contraria, el parámetro ΔT_c castiga el desempeño de todos los asfaltos y advierte que únicamente el asfalto **B** cuenta con la habilidad suficiente para soportar los distintos modos de fisuración ya que presenta un valor superior a -5 siendo este el indicador reológico más riguroso de todo el estudio.

Por otro lado, para la temperatura de transición viscoelástica "T_{VET}" aún no cuenta con recomendaciones o especificaciones de desempeño bien definidas. Sin embargo, investigaciones recientes señalan un valor preliminar máximo de 45°C como señal de alarma para identificar asfaltos susceptibles al agrietamiento [10]. En este sentido, los asfaltos identificados con la etiqueta **B**, **F**, e **I** cumplen con la recomendación anterior. Para el caso del barrido de amplitud lineal (LAS) suele evaluarse el número de ciclos a la falla empleando amplitudes de deformación de 2.5 y 5.0% en la ley de fatiga cuando se trata de estructuras de pavimento flexible con espesor de carpeta asfáltica mayores a 4 pulgadas (500 μ s) y menores a 4 pulgadas (1000 μ s), respectivamente. En este contexto, el Modified Asphalt Research Center[11] propone soportar más de 15 mil ciclos para tránsito Estándar (S), mayor a 19 mil ciclos para tránsito alto (H) y superior a 31 mil ciclos para tránsitos muy altos (V) y extremos (E). En este escenario, todos betunes son capaces de soportar las condiciones de tránsito más severas en la condición de deformación a 2.5% (cuando se emplean espesores de carpeta robustos). No obstante, cuando la amplitud de deformación se duplica al 5.0%

(espesores de carpeta delgados) los betunes **C**, **D** y **E** dejan de ser aptos para utilizarse inclusive en tránsitos bajos. Sin embargo, en esta investigación se decidió evaluar deformaciones del orden hasta del 15% con el propósito de identificar diferentes niveles de correlación con el Índice de Flexibilidad.

5.3 Determinación del potencial de agrietamiento de mezclas bituminosas (I-FIT).

Posterior a la ejecución de la prueba de agrietamiento y al análisis de las curvas *carga-desplazamiento generadas*, se procedió al cálculo de los parámetros más importantes para el estudio del comportamiento mecánico relacionado con el agrietamiento de la serie de probetas fabricadas con los diferentes modificadores reológicos. En la Figura 2 se comparan los valores promedio obtenidos en este ensayo de energía de fractura, al mismo tiempo que se muestra el avance de la grieta en la longitud total de cada elemento analizado.

*Coeficiente de variación del Índice de Flexibilidad "FI" (4 réplicas evaluadas); REF=17.2%, A=12.1%, B=4.8%, C=8.1%, D=9.4%, E=11.9%, F=7.5%, G=23.4%, H=16.8% e I=18.8%.

A partir del gráfico superior, se puede apreciar que las mezclas bituminosas con los betunes marcados como **A**, **C**, **D**, **E** y **H** incrementaron notablemente su rigidez, ya que lograron las cargas pico y los módulos secantes más elevados. Sin embargo, las características anteriores estuvieron acompañadas de fuertes descensos de la curva carga versus desplazamiento en la región posterior a la falla, causando aumentos significativos en el valor de la pendiente y, por lo tanto, índices de flexibilidad (FI) hasta 65% más bajos con respecto a la mezcla bituminosa fabricada con el betún de control (REF). Este comportamiento frágil advierte sobre la preferencia de estos materiales por romperse súbitamente una vez alcanzada su resistencia máxima, lo cual de acuerdo con la técnica de análisis utilizada indica poca habilidad para soportar la fatiga y una mayor velocidad en la propagación de fisuras. Lo anterior, se traduce en el incumplimiento del requisito mínimo de calidad de 4.0 de Índice de Flexibilidad. Basados en el comportamiento de las mezclas bituminosas fabricadas con los asfaltos etique-

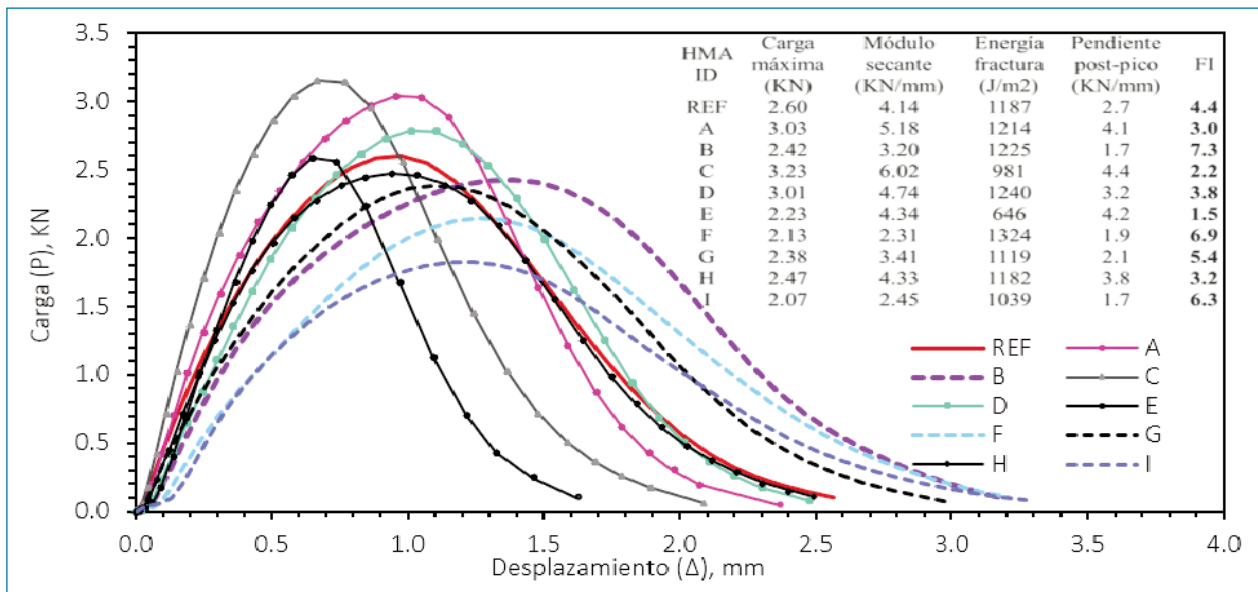


Figura 2. Curva carga versus desplazamiento de las mezclas asfálticas analizadas a 25°C.

tados como **B, F, G e I** resulta evidente la disminución en el potencial de agrietamiento, puesto que, estos materiales desarrollaron mayor capacidad para mantener unidos sus componentes incluso después de alcanzar su carga máxima. Lo anterior, se ve reflejado en el abatimiento de la pendiente en la región post-pico (descenso más suave de la curva carga versus desplazamiento) y, de manera general existe un aumento importante del índice de flexibilidad cumpliendo sobradamente con el requisito mínimo de calidad. Por otro lado, en las Figuras 3 y 4 se exhiben los resultados correspondientes a la correlación lineal de Pearson existente entre los parámetros reológicos estudiados a nivel betún y el índice de fle-

xibilidad obtenido en el concreto asfáltico envejecido a largo plazo. Además, se presentan las funciones de ajuste que, de la mejor manera posible, pasan cerca del conjunto de datos, así como su respectiva bondad de ajuste.

Los resultados del análisis de Pearson permiten identificar cuatro niveles de asociación entre las propiedades medidas en el ligante asfáltico y la mezcla bituminosa. En primera instancia, el método Glover-Rowe modificado exhibe una **correlación muy fuerte** con el índice de flexibilidad. En segundo lugar, los métodos Glover-Rowe la temperatura de transición viscoelástica TVET y el parámetro ΔT_c presentan una **correlación lineal fuerte** mientras que, en un tercer nivel, el barrido de amplitud li-

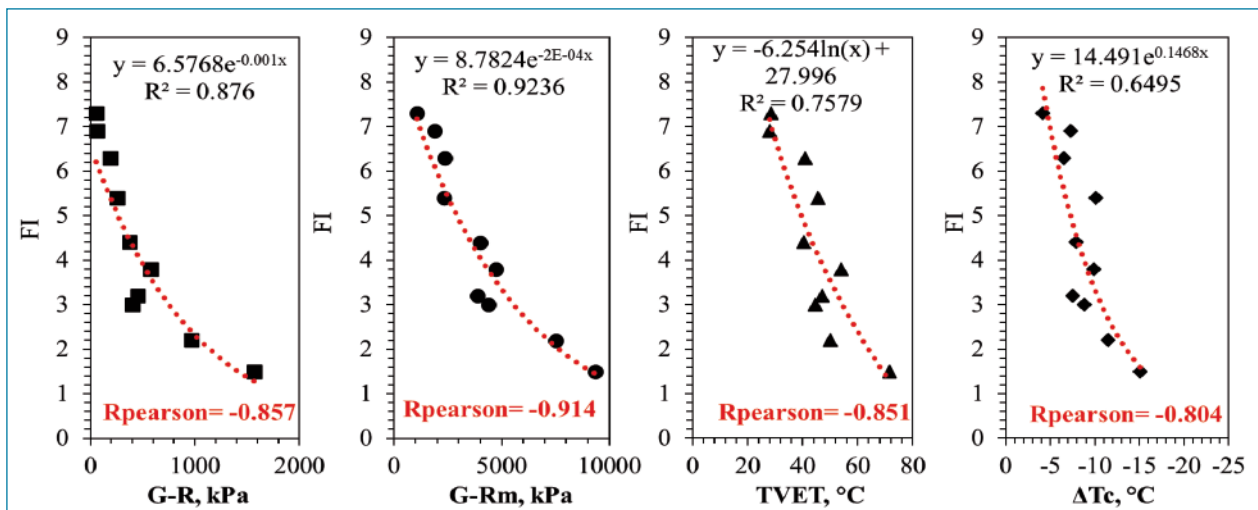


Figura 3. Correlación entre el Índice de Flexibilidad y los parámetros G-R, G-Rm, TVET y ΔT_c .

Correlación entre parámetros reológicos del cemento asfáltico y su resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas en caliente

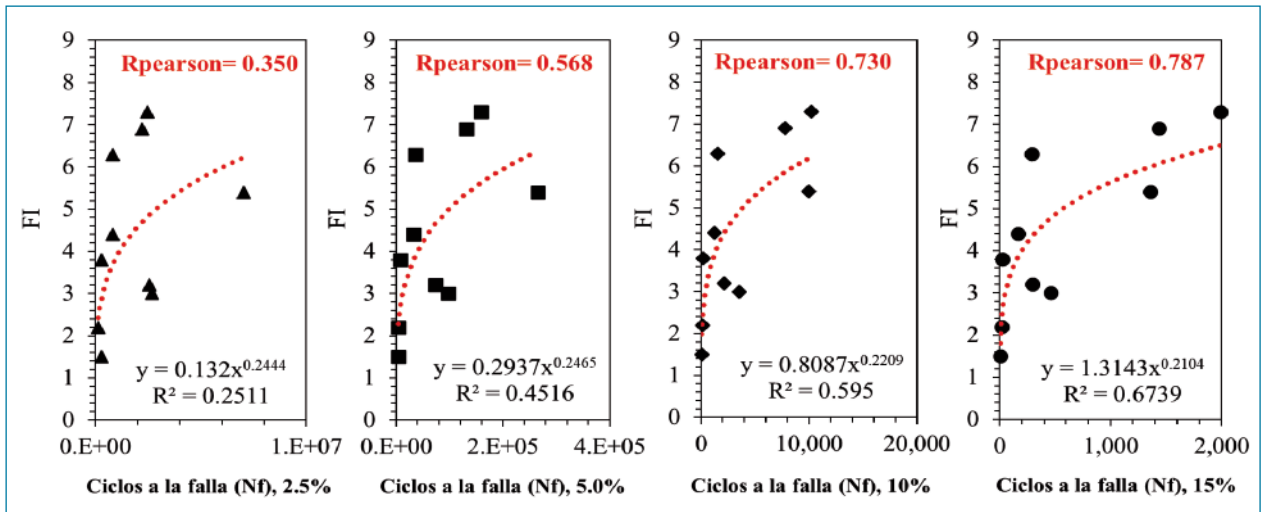


Figura 4. Correlación entre el Índice de Flexibilidad y el Barrido de Amplitud Lineal (LAS).

neal (utilizando 5, 10 y 15% deformación) presentan una **correlación moderada**. Finalmente, existe una **correlación lineal baja** cuando se asocia el Índice de Flexibilidad con los ciclos a la falla en el ensayo "LAS" considerando 2.5% de deformación en la ley de fatiga. También, es importante mencionar que durante el estudio se verificó la eficacia del parámetro $G^* \sin \delta$ (mostrado en la Tabla 1) para valorar la propensión al agrietamiento de acuerdo con la especificación AASHTO M320, proporcionando la correlación más débil de todo el estudio. (-0.231). Continuando con el análisis reológico, la Figura 5 reúne los resultados obtenidos en la

prueba de Creep Repetido Multi-Esfuerzo (MSCR) evaluado a 64°C en apego al estándar de prueba ASTM D7405.

De acuerdo con la actual clasificación de betunes implementada en México a través de la prueba MSCR todos los betunes modificados presentados en el gráfico superior se clasifican como aptos para soportar un nivel de tránsito extremo a excepción del betún I, es decir, a una temperatura de trabajo del pavimento de 64°C soportarían el daño acumulado de más de 30 millones de ejes equivalentes. No obstante, esta cantidad de repeticiones de carga no solo generará deformación plástica

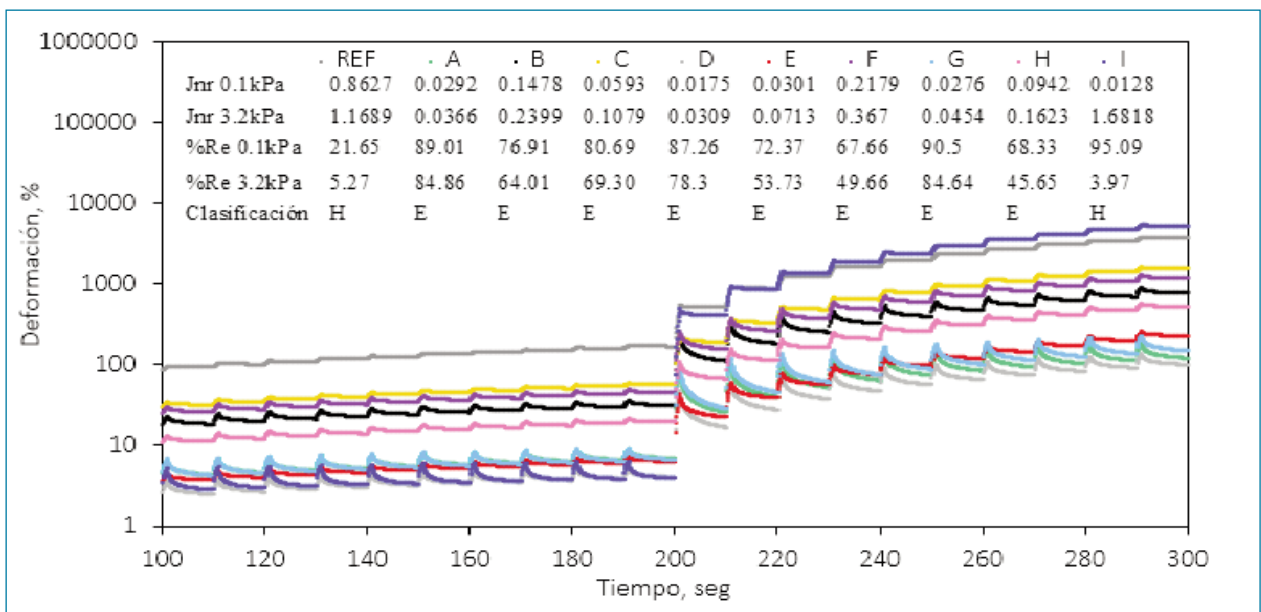


Figura 5. Resultados Creep Repetido Multi-Esfuerzo / Temperatura de 64°C betunes RTFO.

en la carpeta asfáltica sino también cierto nivel de agrietamiento y el parámetro J_{nr} por sí solo es ciego ante esta situación debido a que no existe una relación directa o tendencia clara entre el creep compliance no recuperable (J_{nr}) y el índice de flexibilidad ni tampoco correspondencia entre la respuesta elástica (%Re) y el índice de flexibilidad tal como se observa en la Figura 6.

función de la mezcla bituminosa dentro del paquete estructural.

De esta manera, cuando se utiliza el parámetro $G-R_m$ como complemento ahora si es posible identificar de mejor manera que betunes modificados presentan la habilidad suficiente para soportar ambos modos de deterioro. Tomando como base el valor de $G-R_m = 3950$ kPa

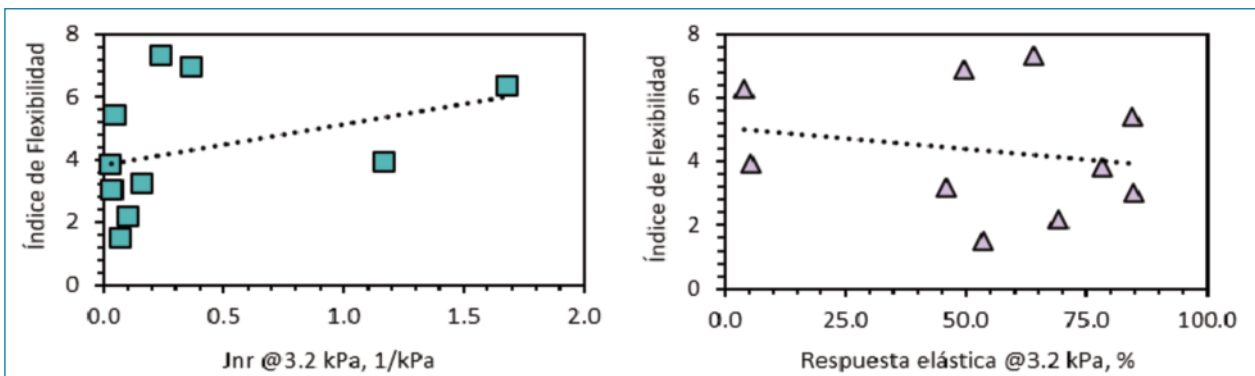


Figura 6. Correlación entre el Índice de Flexibilidad y los parámetros de la prueba MSCR.

Con base en estos resultados podría establecerse que la prueba MSCR no permite definir la aptitud de un betún en términos de resistencia al agrietamiento. Finalmente, en la Figura 7 se muestra el gráfico de dispersión entre el parámetro $G-R_m$ y el valor de J_{nr} de cada betún. Lo anterior, con el propósito de demostrar el beneficio y aportación técnica de implementar un indicador del agrietamiento más certero que, en conjunto con el indicador de deformación permanente, permita seleccionar betunes de manera más adecuada para cada proyecto de pavimentación de acuerdo con el clima, tránsito y

calculado a partir de igualar el índice de flexibilidad a 4.0 unidades en el modelo exponencial generado podemos subdividir en diferentes cuadrantes el diagrama de interacción mostrado. De esta manera el espacio sombreado en azul (Bloque 1) contiene los betunes **B, F, G** y **H** de mejor desempeño aptos para cualquier intensidad de tránsito, mientras que, los asfaltos **A, C, D** y **E** contenidos en el área gris (Bloque 2) son propensos a agrietarse, pero su desempeño podría mejorarse ya sea en el diseño de la mezcla bituminosa o durante el dimensionamiento del pavimento como, por ejemplo; aumentar

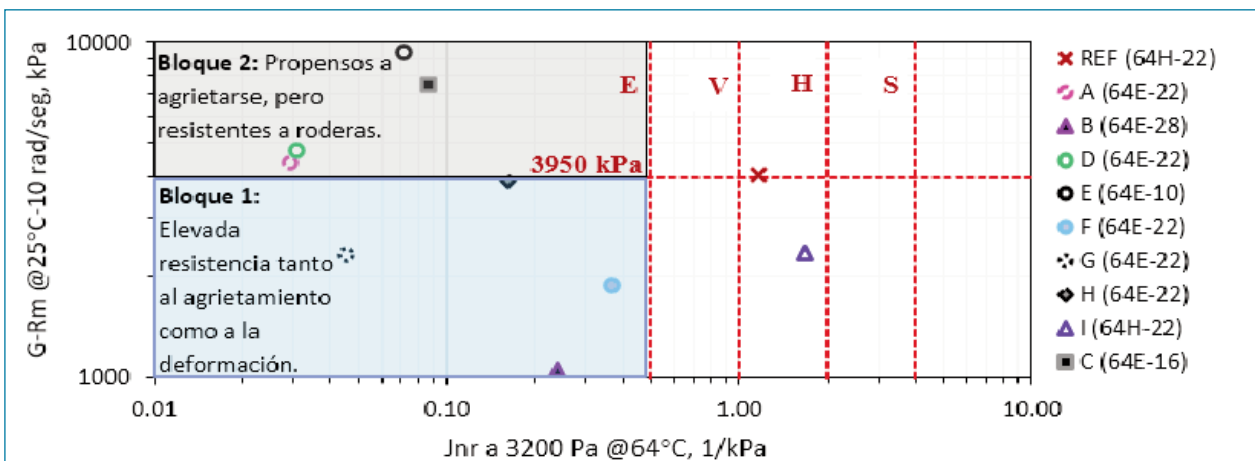


Figura 7. Creep Compliance no recuperable (J_{nr}) versus parámetro Glover-Rowe modificado.

Correlación entre parámetros reológicos del cemento asfáltico y su resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas en caliente

contenido de betún efectivo, incrementar espesores de carpeta, colocar capas subyacentes que se encarguen de absorber los esfuerzos de tensión, etc., o bien estos betunes del bloque 2 podrían utilizarse cuando se requieran concretos bituminosos de alto módulo donde la elevada rigidez y estabilidad sean la característica deseada. Lo anterior, representa un análisis reológico mucho más completo en comparación con el actual parámetro $G^*sen \delta$ o el valor de J_{nr} de manera individual.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta investigación se evaluó la efectividad que poseen diferentes parámetros reológicos para diferenciar el potencial de agrietamiento de betunes con y sin modificadores. A partir de los resultados obtenidos se realizaron numerosas observaciones y, con base en ellas, las siguientes conclusiones:

1.- Para los materiales empleados y bajo los escenarios considerados en esta investigación el parámetro Glover-Rowe modificado se posicionó como el método más eficaz y adecuado para valorar la resistencia al agrietamiento del ligante puesto que; la fuerza de asociación entre $G-R_m$ versus el índice de flexibilidad (FI) fue la más alta de todo el estudio. Sin embargo, la especificación provisional de 5000 kPa podría ser demasiado tolerante con aquellos betunes oxidados, endurecidos o modificados con productos que ofrezcan demasiada rigidez a cambio de sacrificar la posibilidad de deformarse elásticamente, tal como fue el caso de los betunes identificados como; **A**, **D** y **H** en donde el balance entre la componente elástica y viscosa se encuentran apenas por debajo del límite permisible, pero sus índices de flexibilidad en el concreto bituminoso exhibieron un comportamiento inferior al de la mezcla bituminosa de control sin modificar.

2.- La utilización de un parámetro más eficaz para caracterizar la resistencia al agrietamiento en conjunto con el valor de J_{nr} permite tener una visión más clara del desempeño esperado de la mezcla bituminosa fabricada con ligantes de igual grado PG sometida a las mismas condiciones de carga y temperatura y, al mismo tiempo, da la pauta para identificar las acciones necesarias para potenciar el desempeño de los betunes disponibles en

cada proyecto de pavimentación.

3.- Los resultados soportan claramente que no existe un ensayo reológico que permita abordar la deformación y el agrietamiento de manera simultánea, ya que cada deterioro es detonado por un mecanismo de sollicitación diferente en una condición de envejecimiento del betún también diferente, lo cual, hasta el momento, no ha sido tomado en cuenta en la clasificación PG.

4.- Normalizar la energía de fractura a través de la pendiente en la región post-pico resultó en el cálculo del Índice de Flexibilidad, el cual nos permitió discernir de forma más acertada la resistencia al agrietamiento de las mezclas bituminosas analizadas puesto que; dos mezclas asfálticas pueden exhibir energías de fractura muy similares, pero con cargas pico y velocidad de propagación de grietas opuestas, lo cual representa un proceso de disipación de energía totalmente diferente (rotura) y, por ende, diferente resistencia al agrietamiento, tal como fue el caso de las mezclas bituminosas **A** y **B** logrando energías de fractura de 1214 y 1225 Joules/m², pero con índices de flexibilidad de 3.0 y 7.3, respectivamente.

7. REFERENCIAS

- [1] D'angelo, J. (2019). Pavement Cracking: what binder properties control. Asphalt Magazine. Asphalt Institute.
- [2] Asphalt Institute. (1996). MS (2) - Background of SUPERPAVE asphalt binder test methods. Lexington, Kentucky. U.S.A.
- [3] Zhang, J., Walubita, L. F., Faruk, A. N. M., Karki, P., and Simate, G. S. (2015). Use of the MSCR test to characterize the asphalt binder properties relative to HMA rutting performance – A laboratory study. Construction and Building Materials, 94, 218–227.
- [4] Zhou, F., Mogawer, W., Li, H., Andriescu, A., & Copeland, A. (2013). Evaluation of Fatigue Tests for Characterizing Asphalt Binders. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(5), 610–617.
- [5] Booshehrian, A., Mogawer, W., and Bonaquist, R. (2013). How to Construct an Asphalt Binder Master Curve and Assess the Degree of Blending between RAP and Virgin Binders. Journal of Materials in Civil Engineering. 25(12):1813-1821.

- [6] Christensen, D. W., and N. Tran. (2021). Relationships Between the Fatigue Properties of Asphalt Binders and the Fatigue Performance of Asphalt Mixtures. Pre-publication draft of NCHRP Research Report 982. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [7] Lorena Garcia Cucalon, Fawaz Kaseer, Edith Arám-bula-Mercado, Amy Epps Martin, Nathan Morian, Sara Pournoman & Elie Hajj. (2018). The crossover temperature: significance and application towards engineering balanced recycled binder blends. *Road Materials and Pavement Design*, doi: 10.1080/14680629.2018.1447504.
- [8] Hintz, C., Velasquez, R., Johnson, C., and Bahia, H. (2011). Modification and Validation of Linear Amplitude Sweep Test for Binder Fatigue Specification. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2207(1), 99–106.
- [9] Asphalt Institute. (2019). State of the knowledge: Use of the delta tc parameter to characterize asphalt binder behavior. IS-240.
- [10] Kaseer, F., Martin, A. E., & Arám-bula-Mercado, E. (2021). Relationship between Rheological Indices and Cracking Performance of Virgin, Recycled, and Rejuvenated Asphalt Binders and Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 036119812110074. doi:10.1177/03611981211007479.
- [11] Teymourpour Pouya & Hussain Bahia. (2014). Linear Amplitude Sweep Test: Binder Grading Specification and Field Validation. Modified Asphalt Research Center (MARC) at Madison-Wisconsin University.