



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

# CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE ELABORADAS CON ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO SBS Y DIFERENTES TIPOS DE ADITIVOS QUÍMICOS

Leonardo Ochoa <sup>1</sup>, Daniela Bocanegra <sup>2</sup>, Raymundo Benítez <sup>3</sup>, Álvaro Gutiérrez <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Quimi-Kao S.A de C.V., El Salto, México, lochoa@kao.com

<sup>2</sup> Quimi-Kao S.A de C.V., El Salto, México, dbocanegra@kao.com

<sup>3</sup> Quimi-Kao S.A de C.V., El Salto, México, rbenitez@kao.com

<sup>4</sup> Quimi-Kao S.A de C.V., El Salto, México, agutierrez@kao.com

## RESUMEN.

Esta investigación se centra en evaluar las ventajas y desventajas que ofrece la incorporación de 2.5 y 5.0% de dos diferentes aditivos químicos con propiedades antioxidantes en los sistemas típicos de asfaltos modificados con polímero utilizados en México. En primera instancia, se llevaron a cabo evaluaciones fisicoquímicas enfocadas en la deformación permanente, agrietamiento por fatiga, fisuración térmica y propensión a la oxidación mediante los ensayos de Creep Repetido Multi-Esfuerzo, Glover-Rowe modificado, Delta Tc y FTIR, respectivamente. Posteriormente, para abordar la influencia de los aditivos en la respuesta mecánica frente al agrietamiento y el flujo plástico de las diferentes mezclas asfálticas evaluadas se realizaron, por un lado, el cálculo del índice de flexibilidad (IF) mediante ensayos de energía de fractura en vigas semicirculares (SCB) y, por el otro lado, ensayos de compresión axial cíclica (CAC). Adicionalmente, se determinó el valor de módulo dinámico  $|E^*|$  en un amplio rango de frecuencias y temperaturas. En general, los resultados a nivel asfalto demuestran que la presencia de aditivo aumenta la deformabilidad del material, pero mejora notablemente la capacidad de relajación y disipación de esfuerzos de tensión al mismo tiempo que se reduce el potencial de oxidación. Por su parte, la evaluación mecánica en las mezclas asfálticas arrojó incrementos entre 17 hasta 116% en la resistencia al agrietamiento versus las mezclas asfálticas evaluadas sin aditivo. También, los resultados en el ensayo de CAC sustentan que la incorporación de aditivos no produce cambios drásticos en la resistencia al ahuellamiento y, además, no se observó un comportamiento asociado con el flujo plástico. Finalmente, el análisis viscoelástico lineal permitió identificar sensibles reducciones en la rigidez de las mezclas asfálticas que contienen 5% de aditivo, las cuales sufrieron afectaciones cercanas al 30% en el valor de módulo dinámico  $|E^*|$  a las condiciones de prueba de 10 Hz y 20°C.

**PALABRAS CLAVE:** cemento asfáltico, aditivos, análisis fisicoquímico, evaluación mecánica.

## 1.- INTRODUCCIÓN.

En años recientes, la industria del asfalto ha centrado sus esfuerzos en el desarrollo de estrategias que permitan incrementar la resistencia de las mezclas asfálticas en caliente. Lo anterior, con el propósito de hacer frente a los incrementos en las cargas de tránsito y condiciones climáticas cada vez más adversas causantes de deterioros como el ahuellamiento, la desintegración del material por presencia de humedad, así como los distintos modos de agrietamiento y fisuración. En este sentido, el comportamiento de las mezclas asfálticas ha ido mejorando a partir de una selección más estricta en la calidad del agregado pétreo, por la utilización de metodologías de diseño de mezcla asfáltica fundamentadas en el desempeño o bien, con el empleo de sistemas de asfalto modificado con polímero (AMP) <sup>[1]</sup>. Hoy en día, el uso de polímeros es la técnica más utilizada para mejorar las propiedades de los ligantes asfálticos y podemos encontrar una gran variedad de productos, pero se destacan los elastómeros como el estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-butadieno-latex (SBR), el hule molido de neumáticos fuera de uso (NFU), así como los plastificantes Etil-Vinil-Acetato (EVA), terpolímero elastómero reactivo (TER) y, más recientemente, el uso de diversos plásticos reciclados tanto de alta como de baja densidad <sup>[2]</sup>. La incorporación de polímeros supone la transferencia de sus propiedades al



**Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.**

asfalto base, por lo tanto, la rigidez, fragilidad, relajación, ductilidad, elasticidad, resistencia al daño acumulado, durabilidad a largo plazo y adherencia, entre otras propiedades, serán influenciadas por el tipo y cantidad de modificador añadido<sup>[3]</sup>. En este contexto, en México la modificación de asfalto se realiza principalmente con SBS y generalmente persigue incrementar el rango de trabajo útil a alta temperatura y la resistencia tanto a la deformación (Jnr) como su capacidad de recuperarse elásticamente (%RE) evaluados mediante los ensayos de Grado de Desempeño (PG) y Creep Repetido Multi-Esfuerzo (MSCR), respectivamente. De esta manera, es como se categoriza las competencias de un asfalto modificado para ser utilizado en determinadas condiciones de tránsito y clima. Sin embargo, durante la vida útil de un pavimento asfáltico en servicio las sollicitaciones activas y pasivas no solamente causarán deformaciones plásticas en la mezcla asfáltica sino también diferentes modos de agrietamiento y otros deterioros causados por el envejecimiento volviendo al sistema PG+MSCR ciego ante el fenómeno anterior. En este sentido, la modificación de asfaltos no debería perseguir únicamente la incorporación de productos que mejoren las propiedades enfocadas en la rigidez a corto plazo sino más bien complementarse con otros aditivos que permitan extender en el tiempo la vida útil de la mezcla asfáltica. Debido a esto, este trabajo de investigación se centra, por un lado, en capturar la respuesta al agrietamiento y oxidación de diferentes asfaltos modificados con polímero (AMP) y aditivos a través de ensayos fisicoquímicos enfocados en valorar la durabilidad y, por el otro lado, establecer el impacto de la utilización de estos productos químicos con propiedades antioxidantes en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente fabricadas con asfalto modificado con polímero.

## **2.- OBJETIVO.**

Evaluar la influencia de añadir 2.5 y 5.0% respecto al peso del asfalto de dos aditivos químicos ricos en máltenos base amina en las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con dos sistemas diferentes de asfalto modificado con polímero SBS.

## **3.- PLAN EXPERIMENTAL.**

Para alcanzar los objetivos planteados en esta investigación se diseñó un plan experimental dividido en tres etapas. En primera instancia dos cementos asfálticos con polímero y diferente grado reológico típicamente utilizados en México fueron utilizados como base para su posterior modificación con dos aditivos químicos. Durante esta primera etapa la caracterización de los cementos asfálticos estuvo enfocada en analizar la influencia de añadir 2.5 y 5.0% de los aditivos A y B en el decremento o incremento de la resistencia a la deformación permanente, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico evaluados mediante los ensayos reológicos Creep Repetido Multi-esfuerzo (MSCR/DSR), Glover-Rowe modificado (G-Rm/DSR) y Delta Tc ( $\Delta Tc/BBR$ ), respectivamente. Adicionalmente, la propensión a la oxidación de los asfaltos fue estudiada a partir de cuantificar la presencia del grupo carbonilo empleando el Análisis Infrarrojo con Transformada de Fourier (FT-IR). Posteriormente ya en la segunda fase y con la fórmula de trabajo de la mezcla asfáltica de referencia definida, se procedió a fabricar las probetas de laboratorio destinadas a los ensayos de desempeño en donde el comportamiento mecánico referente a la deformación permanente, rigidez y resistencia al agrietamiento se analizó a partir de pruebas de compresión axial cíclica (CAC), módulo dinámico ( $|E^*|$ ) y energía de fractura en viga semicircular (SCB-IFIT), respectivamente. Finalmente, la tercera etapa consistió en el análisis y tratamiento de los datos recopilados durante la campaña de experimentos.

## **4.- MATERIALES Y MÉTODOS.**

### **4.1 Agregado pétreo**

La arena, grava 3/4" y sello 3/8" utilizados en este estudio corresponden a roca basáltica 100% producto de trituración y cumplen con todas las características físicas y de resistencia para mezclas asfálticas en caliente de alto desempeño.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

#### 4.2 Cemento asfáltico.

Los asfaltos base de control corresponden a: (AMP1) PG 64-16 + 2.2% polímero radial SBS y (AMP2) PG 64-16 + 2.2% polímero radial SBS+ 0.10% ácido polifosfórico clasificados por su grado de desempeño como PG 70-16 y PG 76-16, respectivamente. Los asfaltos anteriores son comúnmente utilizados en México en proyectos de pavimentación para tránsito pesado y alta temperatura.

#### 4.3 Aditivos.

Los aditivos químicos empleados en esta investigación identificados como A y B corresponden a dos formulaciones base amina cuyas características principales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.- Descripción de los aditivos químicos utilizados en el estudio.

Aditivo	Densidad a 25°C	Viscosidad absoluta a 25°C, cP	Color	Flash point	Estado físico a 25°C
A	0.812	16.3	Verde	> 180°C	Líquido
B	0.911	681	Café		

#### 4.4 Creep Repetido Multi-Esfuerzo (MSCR) asfaltos envejecidos a corto plazo en RTFO.

El ensayo de Creep Repetido Multi-Esfuerzo (MSCR por sus siglas en inglés) fue utilizado para estudiar las propiedades mecánicas a alta temperatura de los cementos asfálticos. Particularmente, se buscó evaluar la resistencia a la formación de roderas a partir de medir la deformación promedio acumulada en muestras de asfalto sometidas a una onda de corte haversiana con una magnitud de 3.2 kPa y duración de 1 segundo seguido de un periodo de recuperación libre de 9 segundos alternadamente durante 10 ciclos empleando un reómetro de corte dinámico (DSR). Con los datos capturados por el DSR fue posible calcular el creep compliance no recuperable (Jnr) y la recuperación elástica (RE) del material asfáltico. La Figura 1 muestran la sensibilidad térmica de los parámetros anteriores mientras que la Tabla 2 recopila las categorías de tránsito resultantes.

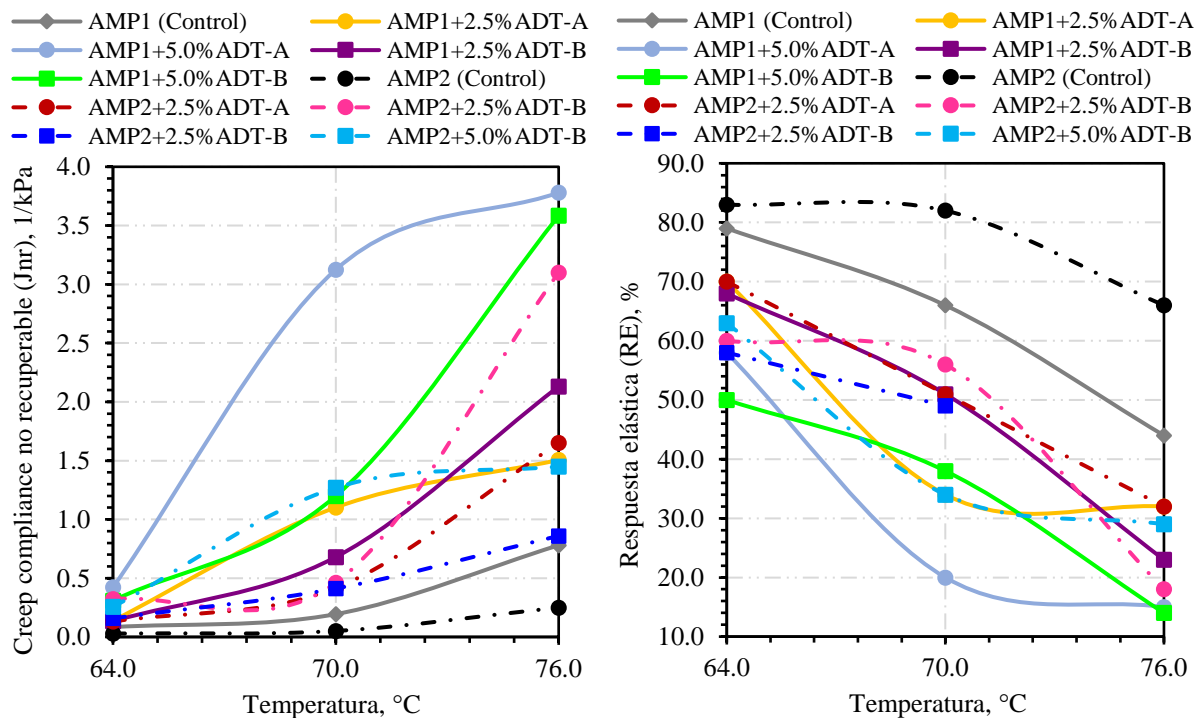


Figura 1.- Análisis de sensibilidad térmica en el valor de Jnr y %RE evaluado a 3.2 kPa.



Tabla 2.- Categoría de tránsito en función de la temperatura de evaluación.

Descripción:	Temperatura / Cat. Tránsito			Descripción:	Temperatura / Cat. Tránsito		
AMP1 (Control)	64°C / E	70°C / E	76°C / V	AMP2 (Control)	64°C / E	70°C / E	76°C / E
AMP1+2.5% ADT-A	64°C / E	70°C / H	76°C / H	AMP2+2.5% ADT-A	64°C / E	70°C / E	76°C / H
AMP1+5.0% ADT-A	64°C / E	70°C / Falla	76°C / Falla	AMP2+5.0% ADT-A	64°C / E	70°C / E	76°C / Falla
AMP1+2.5% ADT-B	64°C / E	70°C / V	76°C / Falla	AMP2+2.5% ADT-B	64°C / E	70°C / E	76°C / V
AMP1+5.0% ADT-B	64°C / E	70°C / H	76°C / Falla	AMP2+5.0% ADT-B	64°C / E	70°C / H	76°C / H

Normativa mexicana N-CMT-4-05-004/18 categoría de tránsito: **E-Extrema** (Jnr máx=0.5 1/kPa y RE mín=40%), **V-Muy alta** (Jnr máx=1.0 1/kPa y RE mín=30%), **H-Alta** (Jnr máx=2.0 1/kPa y RE mín=25%) y **S-Estandar** (Jnr máx=4.0 1/kPa y RE mín=25%).

Los datos sintetizados en la tabla superior muestran amplias variaciones en la categoría de tránsito que cada ligante asfáltico es capaz de soportar. Si los datos se analizan por temperatura; a 64°C todos los materiales estudiados son capaces de resistir condiciones extremas en cuanto a cargas de tránsito y bajas velocidades de circulación se refiere. Cuando la temperatura de evaluación incrementa a 70°C el asfalto AMP2 con y sin aditivos conserva la categoría de tránsito extremo. Sin embargo, en el sistema AMP1 con 2.5 y 5.0% de aditivo tiene mayor sensibilidad térmica ya que cae hasta dos categorías de tránsito llegando inclusive al fallo, es decir, la metodología de evaluación advierte que la rigidez del cemento asfáltico a esta condición de trabajo no es apta para emplearse en ningún proyecto de pavimentación. Por último, a la máxima temperatura de prueba el 50% de los asfaltos con aditivo falló, siendo el ligante AMP1 el caso donde la incorporación de aditivo resultó más desfavorable en la resistencia al ahuecamiento, lo cual podría explicarse debido al nivel de rigidez superior que posee el ligante AMP2 en cuya formulación además del polímero SBS contiene el endurecedor químico ácido polifosfórico.

#### 4.4 Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) asfaltos en condición PAV.

Para estimar los cambios en la composición molecular del asfalto provocado por la oxidación durante el proceso de envejecimiento a largo plazo se recurrió al análisis de espectroscopia infrarroja (FTIR). La herramienta anterior permitió identificar la huella química del material a partir de calcular el área bajo la curva en la longitud de onda de interés que para fines de esta investigación corresponde a 1700 cm. En la Figura 2 se muestra el espectro de absorción de cada muestra analizada resaltando los picos del grupo funcional carbonilo, así como el área bajo la curva correspondiente (adimensional).

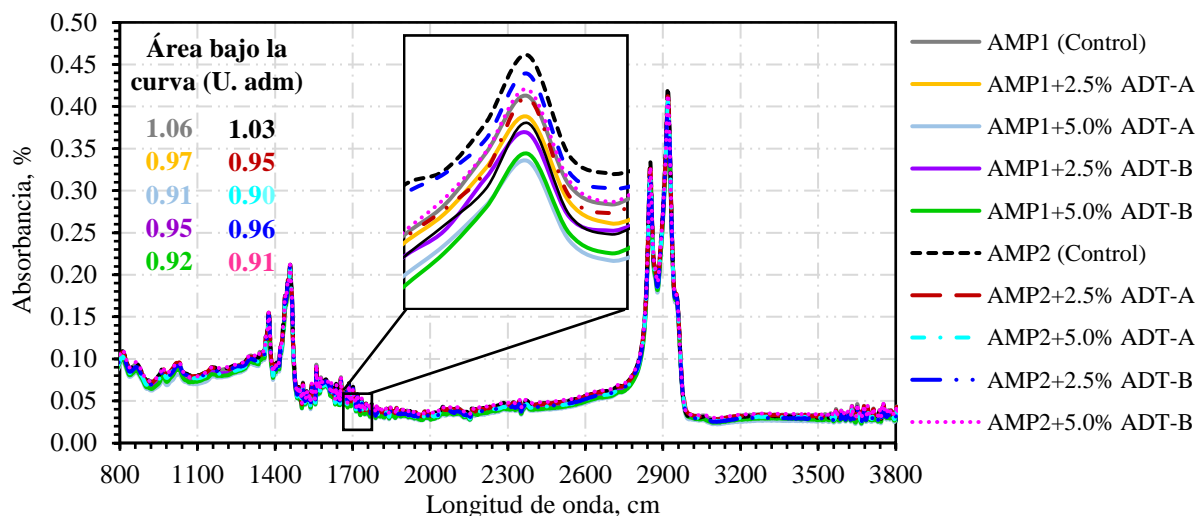


Figura 2.- Espectros FTIR del cemento asfáltico en condición de oxidación PAV.



De manera general, se observa que la presencia del grupo funcional carbonilo detonado por la oxidación es inferior en aquellos ligantes que contienen los aditivos químicos A y B ya que estos presentan picos y áreas bajo la curva menores en comparación con sus equivalentes de control. El comportamiento anterior, se traduce en una reducción en la interacción molecular, esto es, en estructuras menos frágiles y quebradizas. Este fenómeno es directamente proporcional a la cantidad de aditivo añadido, es decir, a mayor porcentaje de aditivo menores serán las degradaciones en ligante asfáltico.

#### 4.6 Delta TC asfaltos envejecidos a largo plazo en PAV.

Recientemente el “*Asphalt Institute*” planteó un parámetro llamado  $\Delta T_c$  que intenta representar el equilibrio entre la rigidez del asfalto y su capacidad de relajarse o liberar tensiones cuando se presentan bajas temperaturas en el pavimento [4]. El parámetro  $\Delta T_c$  se determina utilizando los resultados del reómetro de viga en flexión (BBR) a múltiples temperaturas de congelamiento, particularmente las temperaturas exactas a la cual la rigidez ( $T_c$ -St) del ligante asfáltico es igual a 300 MPa y la velocidad de flujo mejor conocida como pendiente de deformación ( $T_c$ -m) es igual a 0.300. En general, conforme el valor de  $\Delta T_c$  es más negativo significa de manera directa menor capacidad del asfalto para soportar el agrietamiento en bloque causado por diferencias térmicas. Se recomienda un valor máximo de  $-5^\circ\text{C}$  en materiales asfálticos envejecidos a largo plazo (RTFO+PAV). La Figura 3 compara los resultados más sobresalientes a diferentes temperaturas de interés.

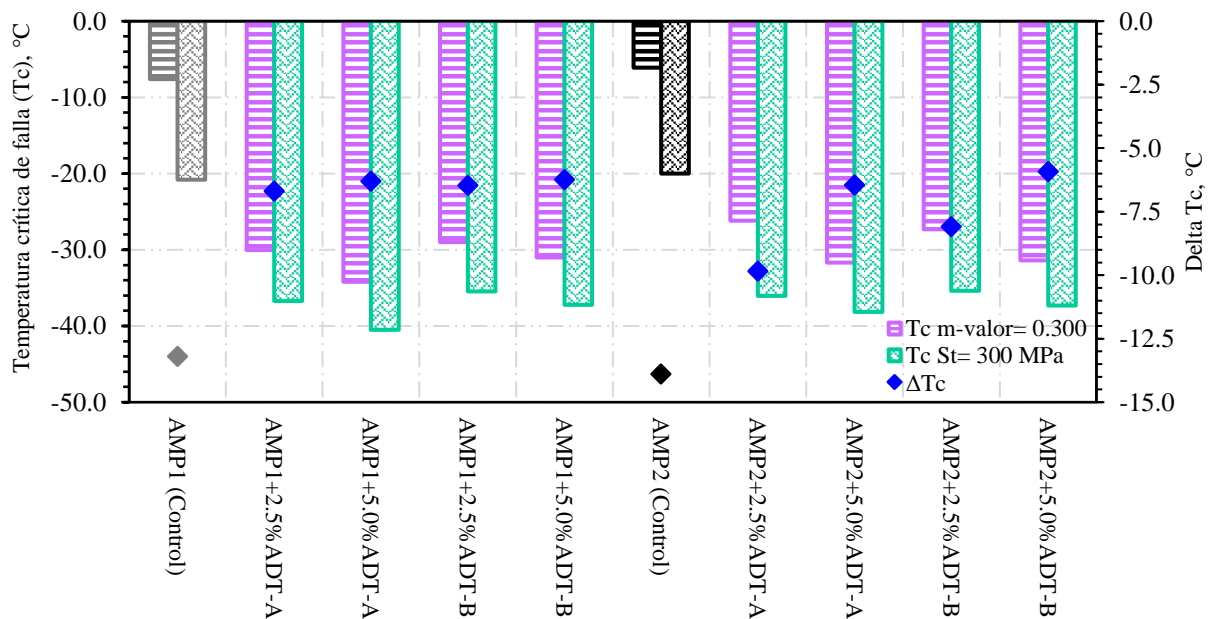


Figura 3.- Resistencia al agrietamiento térmico evaluado mediante parámetro Delta Tc.

Como se puede observar en el gráfico superior los asfaltos de control AMP1 y AMP2 representados por las barras de color gris y negro, respectivamente, exhiben los peores valores de Delta Tc, y, además, su mecanismo de falla está fuertemente controlado por la pendiente de flujo ( $T_c$  m-value) denotando mayor fragilidad. Los componentes viscosos presentes en los aditivos químicos permitieron desarrollar superiores capacidades de relajación y disipación de esfuerzos tensionales por contracción térmica. Si bien en todos los casos se incumple con la recomendación de  $\Delta T_c$  mayor o igual a  $-5^\circ\text{C}$ , la presencia de los aditivos mejoró esta propiedad desde 30 hasta 90% en comparación con los asfaltos de control. Estos hallazgos, indican mayor durabilidad y en general, mayor resistencia a los distintos modos de fisuración no asociados con la repetición de cargas vehiculares.



#### 4.7 Glover-Rowe modificado asfaltos envejecidos a largo plazo en PAV.

Para obtener los indicadores de resistencia al agrietamiento por fatiga se recurrió a la herramienta de análisis conocida como diagrama de espacio negro, la cual consistió en monitorear el módulo de corte complejo ( $|G^*|$ ) y ángulo de fase ( $\delta$ ) de los ligantes en estudio. La medición de estas propiedades reológicas se realizó empleando un reómetro de corte dinámico (DSR) a una temperatura de trabajo intermedia de 20°C y una velocidad de oscilación de 10 rad/s. El ensayo se configuró de tal manera que la deformación causada por la onda de corte se mantuviera dentro del rango viscoelástico lineal (1%). La Figura 5 muestra la dispersión de puntos entre  $|G^*|$  y  $\delta$  versus la función  $|G^*| \times (\cos\delta)^2 / \text{Sen}\delta = 5000$  que delimita la zona de degradación propuesta en el reporte NCHRP 9-59<sup>[5]</sup> para asfaltos envejecidos a largo plazo en RTFO+PAV.

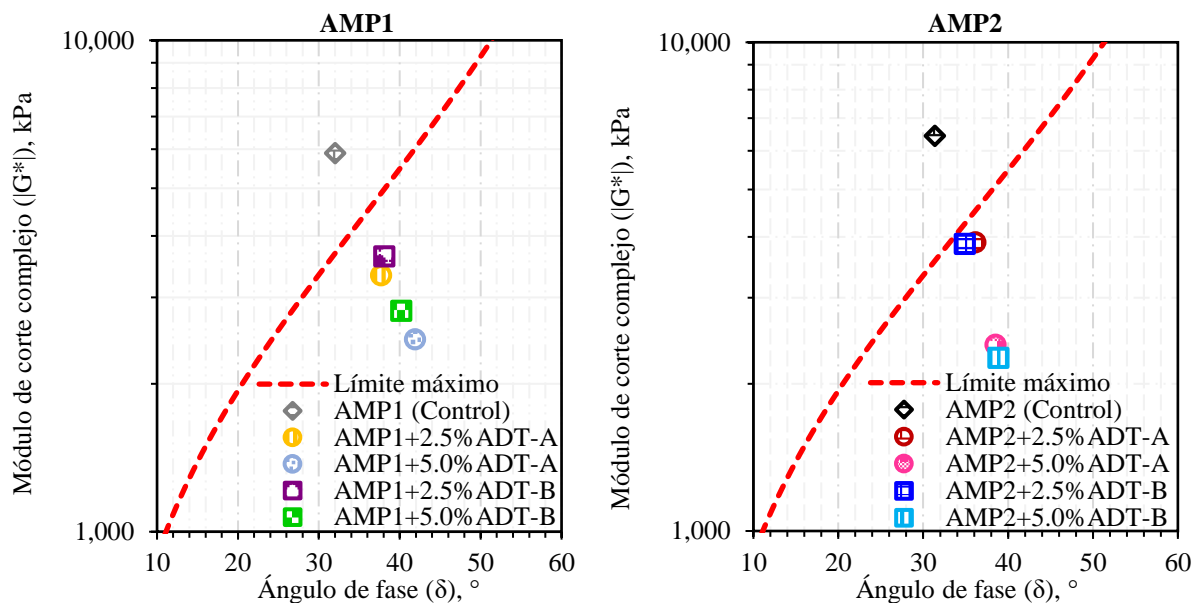


Figura 5.- Diagrama de interacción reológico “espacio negro”.

De la gráfica superior se desprende los siguientes hallazgos: por un lado, los asfaltos de control AMP1 y AMP2 presentan estructuras excesivamente rígidas y frágiles como resultado del proceso de envejecimiento a largo plazo dado que su dispersión de  $|G^*|$  vs  $\delta$  se encuentra por arriba del límite de agrietamiento recomendado y, por el otro lado, los aditivos químicos ayudaron enormemente a reducir el valor de módulo complejo de corte y, al mismo tiempo, incrementaron el valor del ángulo de fase tal como muestra la Tabla 4.

Tabla 4.- Indicador de resistencia al agrietamiento Glover-Rowe modificado.

Asfalto:	$\delta$ , °	$G^*$ , kPa	G-R, kPa	Asfalto:	$\delta$ , °	$G^*$ , kPa	G-R, kPa
AMP1 (Control)	32.0	5892	7985	AMP2 (Control)	31.4	6434	9020
AMP1+2.5%ADT-A	37.7	3321	3397	AMP2+2.5%ADT-A	36.2	3896	4304
AMP1+5.0%ADT-A	41.9	2460	2041	AMP2+5.0%ADT-A	38.5	2403	2364
AMP1+2.5%ADT-B	38.1	3631	3642	AMP2+2.5%ADT-B	34.9	3867	4546
AMP1+5.0%ADT-B	40.2	2815	2540	AMP2+5.0%ADT-B	38.9	2258	2182

El decremento en el parámetro G-R se traduce en un mejor balance entre la componente elástica y viscosa del cemento asfáltico y, por lo tanto, mayor durabilidad. El cambio favorable en la relación de rigidez y relajación es evidente desde la incorporación de 2.5% de aditivo ya que con esta dosis ambos



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

productos químicos lograron sacar de la zona de daño a los ligantes que lo incorporan. Los datos superiores denotan mayor influencia del Aditivo B en las propiedades del asfalto AMP1 mientras que, en el asfalto AMP2, no se observan diferencias significativas en la funcionalidad de ambos aditivos. No obstante, con ambos productos los beneficios obtenidos oscilan entre 55-75% en comparación con los valores de Glover-Rowe encontrados en los asfaltos de control.

#### 4.8 Diseño de la mezcla asfáltica de referencia.

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 asfáltica Superpave con tamaño nominal de 12.5 milímetros. El contenido óptimo de asfalto que cubrió los requerimientos volumétricos fue de 6.0% y se determinó a partir de cuatro/cinco porcentajes de prueba empleando una energía de compactación de 100 giros.

#### 4.9 Elaboración de los especímenes de prueba.

Una vez establecida la fórmula de trabajo se fabricaron las probetas de laboratorio con un objetivo de  $7\pm 0.5\%$  de vacíos de aire empleando la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico variando únicamente el tipo de ligante asfáltico utilizado. Las temperaturas de mezclado y compactación permanecieron constantes para todas las tecnologías evaluadas. Es importante resaltar que todas las mezclas asfálticas evaluadas en el ensayo de agrietamiento SCB fueron sometidas a un envejecimiento a largo plazo en horno durante 8 horas a  $135^{\circ}\text{C}$  previo a su compactación, tal como recomienda el Centro Nacional de Tecnología del Asfalto Estadounidense NCAT [6]. Por su parte, las mezclas asfálticas destinadas a los ensayos de compresión axial cíclica y módulo dinámico fueron envejecidas únicamente a corto plazo.

### 5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS.

#### 5.1 Resistencia al agrietamiento en viga semicircular Índice de Flexibilidad - AASHTO TP 124.

Posterior a la ejecución de las pruebas de agrietamiento en viga semicircular 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 proceso de fisuración de la serie de probetas fabricadas con y sin aditivos químicos. En la Figura 6 se muestra el avance de la grieta en la longitud total de cada elemento analizado, mientras que, en las Tablas 5 y 6 se comparan los valores promedios obtenidos en este ensayo de energía de fractura.

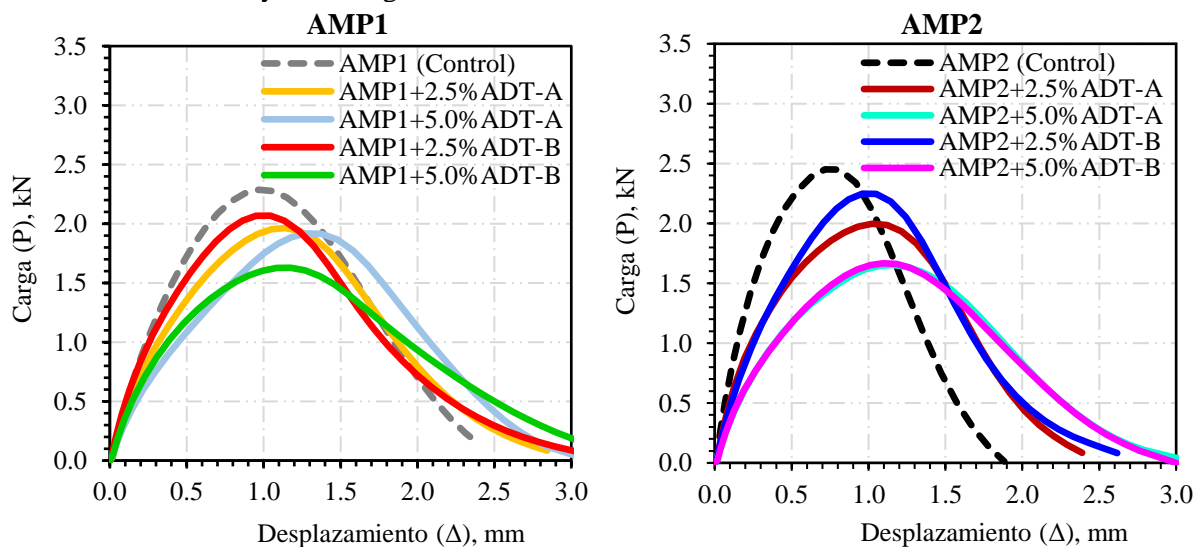


Figura 6.- Curva característica de carga versus desplazamiento ensayo SCB.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

Tabla 5. Indicadores de resistencia al agrietamiento (AMP1 y aditivos).

ID Mezcla	Energía de fractura, J/m <sup>2</sup>	Carga Pico, kN	Módulo secante, kN-mm	Desplazamiento crítico, mm	Pendiente post-pico, kN/mm	Índice de flexibilidad, U.adm
AMP1 (Control)	1060	2.39	3.51	2.26	2.35	4.5
AMP1+2.5%ADT-A	1109	2.02	3.02	2.51	2.06	5.4
AMP1+5.0%ADT-A	1037	1.88	2.39	2.62	1.82	5.7
AMP1+2.5%ADT-B	1103	2.13	3.41	2.36	1.67	6.6
AMP1+5.0%ADT-B	984	1.54	2.51	2.60	1.38	7.2

Al analizar la información desplegada tanto en la gráfica como en la tabla superior, es posible observar el efecto conferido por los aditivos en el sistema AMP1, los cuales se destacan por incrementar la tolerancia a la deformación y al mismo tiempo abaten la velocidad con la que se propagan las fisuras en la región posterior a la falla en donde se obtiene un descenso en la pendiente post-pico mucho más suave. Lo anterior, se potencializa a medida que la concentración de aditivo aumenta y se traduce en concretos asfálticos mucho más dúctiles con habilidades mejoradas para soportar los esfuerzos de tensión que causan el agrietamiento. El incremento de resistencia se refleja en los Índices de Flexibilidad siendo el Aditivo “B” el que tuvo mayor impacto en esta propiedad. En todos los casos se superó el umbral recomendado de Índice de Flexibilidad (4.0 unidades) para mezclas asfálticas envejecidas a largo plazo. Sin embargo, la forma de las curvas carga versus desplazamiento (proceso de rotura) de las mezclas asfálticas que contienen aditivo indican un decremento en la degradación de las propiedades mecánicas asociado con el proceso de oxidación impuesto, lo cual es bastante consistente con los resultados encontrados en el análisis Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) y en el diagrama reológico de espacio negro ( $G^*$  vs  $\delta$ ).

Tabla 6. Indicadores de resistencia al agrietamiento (AMP2 y aditivos).

ID Mezcla	Energía de fractura, J/m <sup>2</sup>	Carga Pico, kN	Módulo secante, kN-mm	Desplazamiento crítico, mm	Pendiente post-pico, kN/mm	Índice de flexibilidad, U.adm
AMP2 (Control)	831	2.45	5.94	1.65	3.04	2.77
AMP2-2.5%ADT-A	769	1.86	4.13	1.98	2.10	3.50
AMP2-5.0%ADT-A	860	1.68	2.73	2.52	1.54	5.89
AMP2-2.5%ADT-B	819	2.23	4.02	2.03	2.45	3.34
AMP2-5.0%ADT-B	882	1.73	2.51	2.52	1.53	6.09

De manera análoga, los resultados correspondientes a las probetas fabricadas con el segundo sistema de asfalto modificado con polímero (AMP2) nuevamente sustentan un claro patrón asociado al incremento de ductilidad conforme aumenta la presencia de aditivo en el ligante asfáltico alcanzando de manera general Índices de Flexibilidad entre 25 y 115% superiores en comparación con la mezcla asfáltica de control. Adicionalmente, se detectaron dos tendencias; por un lado, la incorporación de ácido polifosfórico en la mezcla asfáltica de control fabricada con AMP2 significó la pérdida de 50% de la resistencia al agrietamiento versus la mezcla asfáltica de control fabricada con AMP1. El fenómeno anterior podría encontrar explicación en la influencia que ejerce el ácido polifosfórico en el cambio de las propiedades fisicoquímicas que sufre el asfalto durante el proceso de envejecimiento a largo plazo, el ácido podría ser detonante en la formación de arreglos cristalinos que conviertan la microestructura del asfalto en un material más frágil y, por ende, menos tolerante a los esfuerzos de tensión. Por otro lado, tanto el “Aditivo A” como el “Aditivo B” dosificado al 2.5% respecto al peso del asfalto no fue suficiente para proveer la resistencia recomendada (4.0 unidades de Índice de Flexibilidad) mientras que, con 5.0% de aditivo, con ambos productos químicos se superó el umbral anterior.





## 5.2.-Deformación permanente por compresión axial cíclica (CAC)- EN12697 25 (modificado).

Para establecer el potencial de ahuellamiento de las mezclas asfálticas analizadas se utilizó un ensayo de compresión axial cíclica (CAC) empleando una prensa dinámica, en donde las condiciones de evaluación fijadas corresponden a un pulso de carga vertical repetido (600 kPa esfuerzo de contacto) en forma haversiana con 0.1 segundos de duración (10 Hz) seguido de 0.9 segundos de recuperación/relajación del material. El ensayo se configuró de tal manera que se aplicaran 10 000 ciclos de carga o hasta que se alcanzara 10% de deformación axial acumulada en la probeta evaluada. Lo anterior, dentro de una cámara de temperatura controlada a 50°C. De esta manera se simuló la respuesta de la mezcla asfáltica ante el paso repetido de un eje sencillo equivalente de 8,2 toneladas con neumáticos inflados a una presión de 87 psi y velocidad de circulación aproximada a 60-70 km/h del camión de carga. La Figura 7 proporciona una visión general de la deformación axial acumulada en función del número de ciclos impuesto.

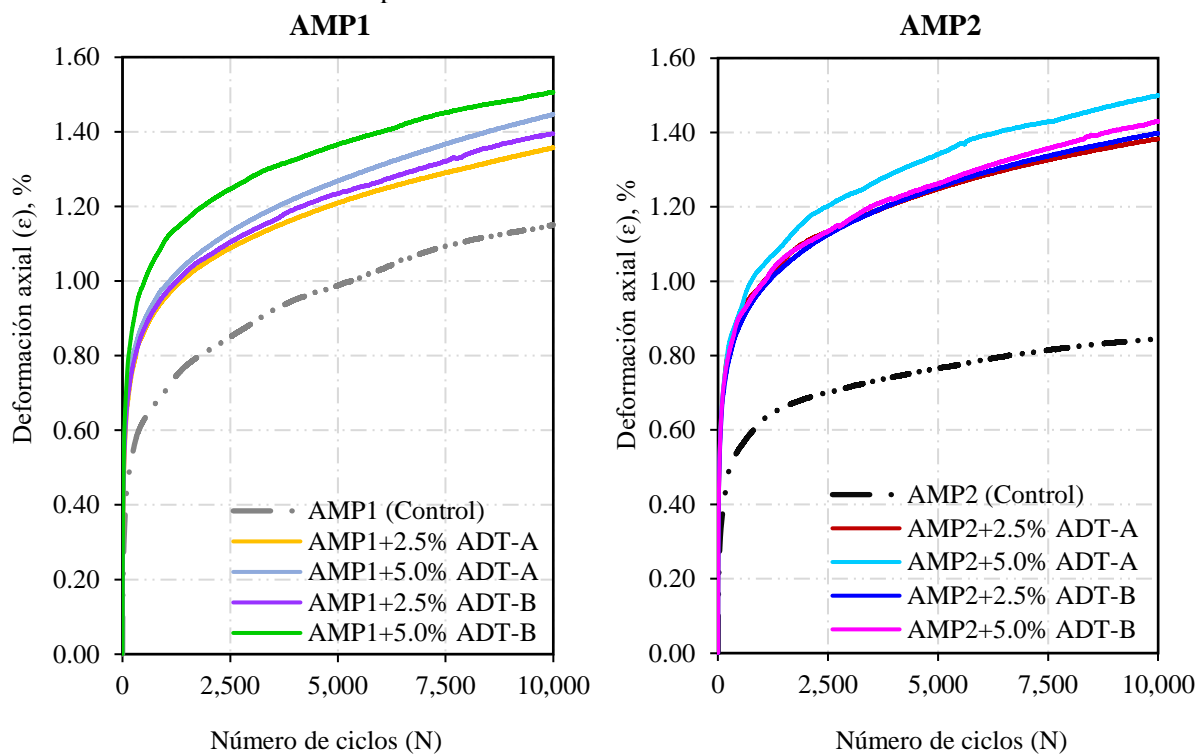


Figura 7.- Evolución de la deformación permanente empleando compresión axial cíclica.

A partir de la gráfica superior se desprende una serie de tendencias generales, entre las que se destacan; en primera instancia todas las mezclas asfálticas con y sin aditivo presentaron el fenómeno de post-compactación debido al calentamiento interno del material, reordenamiento de partículas, consolidación, etc., que se traduce en acumulación repentina de deformaciones irreversibles y que ocurre durante los primeros 1000 pulsos de carga. Enseguida, tuvo lugar la fase de resistencia real en donde los agregados y el cemento asfáltico trabajan en conjunto para soportar las solicitaciones impuestas de manera que la acumulación de deformación sigue una tendencia asintótica o cuasi lineal durante los ciclos de carga restantes. Tal como se esperaba, las mezclas asfálticas con aditivo manifestaron mayores deformaciones al final del ensayo en comparación con las mezclas asfálticas de control, no obstante, no es visible un punto de inflexión en la segunda fase de la curva de deformación, por lo tanto, se podría establecer que en ningún escenario la incorporación de aditivos químicos provocó flujo plástico, siendo este último habitual en las mezclas asfálticas con alta propensión al ahuellamiento. Por su parte, las Tablas 7 y 8, recopilan información relevante referente al comportamiento de las mezclas asfálticas AMP1 y AMP2, respectivamente.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

Tabla 7.- Indicadores de resistencia obtenidos en la prueba de compresión axial cíclica AMP1.

ID Mezcla asfáltica	Tasa de deformación en fase 2 x Millón de ciclos, %	% Deformación total axial acumulada @10 000 ciclos	Número de ciclo donde ocurre el flujo plástico
AMP1 (Control)	71.52	1.15	No presentó
AMP1+2.5% ADT-A	61.56	1.36	No presentó
AMP1+5.0% ADT-A	68.64	1.45	No presentó
AMP1+2.5% ADT-B	62.64	1.40	No presentó
AMP1+5.0% ADT-B	63.12	1.51	No presentó

Tabla 8.- Indicadores de resistencia obtenidos en la prueba de compresión axial cíclica AMP2.

ID Mezcla asfáltica	Tasa de deformación en fase 2 x Millón de ciclos, %	% Deformación total axial acumulada @10 000 ciclos	Número de ciclo donde ocurre el flujo plástico
AMP2 (Control)	31.64	0.85	No presentó
AMP2+2.5% ADT-A	53.53	1.38	No presentó
AMP2+5.0% ADT-A	70.20	1.50	No presentó
AMP2+2.5% ADT-B	66.37	1.40	No presentó
AMP2+5.0% ADT-B	66.78	1.43	No presentó

De acuerdo con la información anterior, la tasa de deformación de las mezclas asfálticas fabricadas con AMP1 contra sus versiones con 2.0 y 5.0% de aditivo presentaron variaciones de apenas 12% y, además, fue posible observar desempeños equivalentes entre las mezclas asfálticas fabricadas con el Aditivo “A” y el aditivo “B” comparándolos a las mismas dosis. En este sentido, los resultados anteriores podrían ser atribuibles a dos factores; por un lado, los aditivos químicos añadidos no afectaron drásticamente la fuerza de la red polimérica contraponiéndose a los hallazgos de la prueba MSCR y, por el otro lado, la estructura granular seleccionada contribuyó al desarrollo de alta resistencia a los esfuerzos cortantes. Continuando con el análisis de los datos obtenidos no es sorprendente que la mezcla asfáltica AMP2 posea la menor deformación axial acumulada y la pendiente en fase 2 más estable de todo el estudio, ya que se trata de un ligante asfáltico mucho más rígido. Sin embargo, se detectó que la presencia de los aditivos químicos compromete la capacidad de respuesta del sistema de asfalto modificado con polímero SBS y endurecido con ácido polifosfórico, dado que este último estaría neutralizado por la naturaleza básica de los aditivos. Lo anterior, podría explicar el 70% más de deformación axial acumulada en las mezclas asfálticas con aditivos, aunque en general, continúan siendo deformaciones totales muy pequeñas.

### 5.3 Módulo dinámico - AASHTO T 342.

El comportamiento viscoelástico de las mezclas asfálticas fue evaluado por medio de la obtención de su módulo complejo dinámico ( $E^*$ ) en probetas de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura bajo carga cíclica sinusoidal en un amplio rango de temperaturas (0, 10, 20, 30 y 40°C) y frecuencias (0.1, 0.5, 1.0, 5.0 y 10 Hertz). El esfuerzo de compresión aplicado y la deformación axial recuperable (75-150  $\mu$ s) del espécimen fue monitoreado por medio de una celda de carga y sistemas de medición LVDT's, respectivamente. Posteriormente, el principio de superposición tiempo-temperatura (P-sTT) fue aplicado a los datos experimentales provenientes del barrido de temperaturas y frecuencias para transformar las isotermas individuales en una curva única de rigidez ajustada mediante un modelo sigmoidal clásico a una temperatura de referencia de 20°C (curva maestra), tal como se observa en las Figuras 8 y 9.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

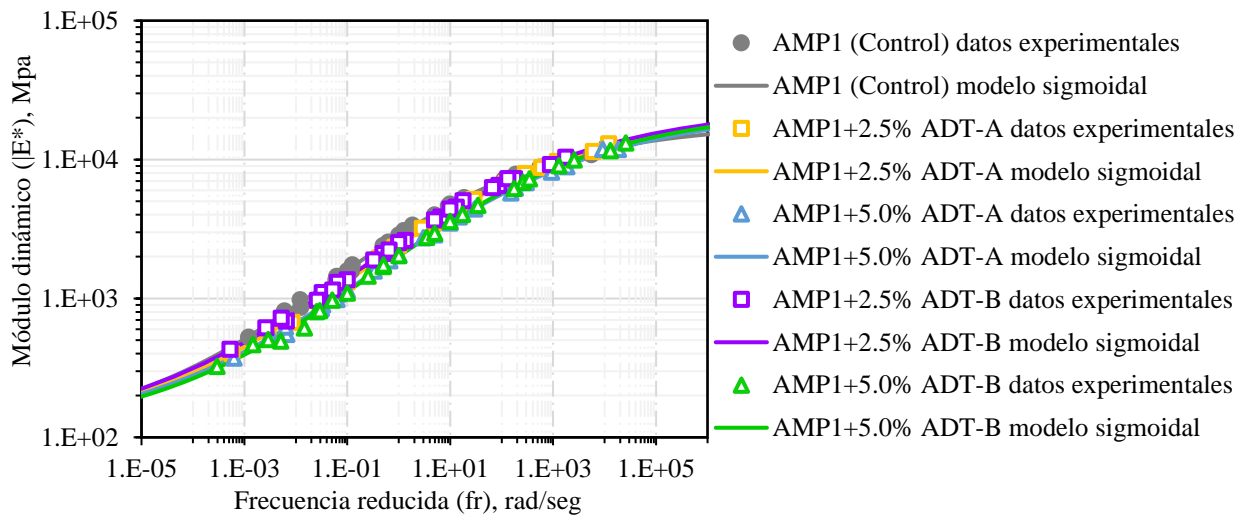


Figura 8.- Curva maestra ajustada a una temperatura de referencia de 20°C (AMP1 y aditivos).

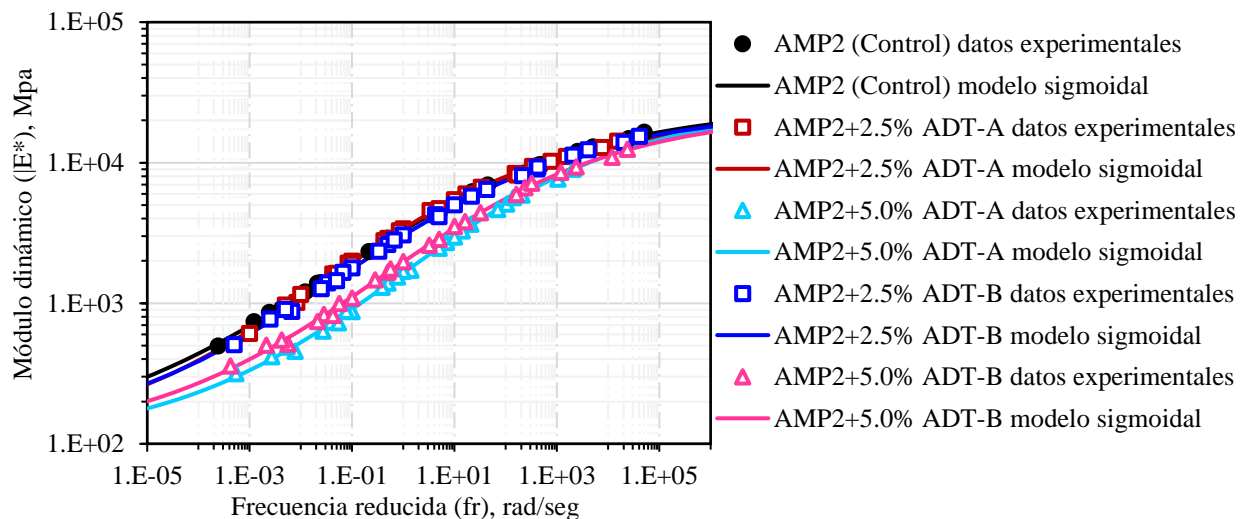


Figura 9.- Curva maestra ajustada a una temperatura de referencia de 20°C (AMP2 y aditivos).

De manera general, el módulo dinámico ( $|E^*|$ ) se encuentra en un amplio rango de valores desde 130 hasta 18000 MPa, donde las diferencias más importantes en cuanto a rigidez las podemos encontrar en las mezclas asfálticas que contienen 5.0% de aditivo. Lo anterior, resulta más evidente a frecuencias bajas ( $<0.01$  Hz) e intermedias (0.01-100 Hz). En este contexto, si analizamos puntualmente el valor de  $|E^*|$  a 10 Hz en las mezclas que contienen 2.5% de aditivo y lo comparamos contra el valor de  $|E^*|$  medido a la misma frecuencia en las mezclas asfálticas de control podemos identificar que las diferencias en las propiedades elásticas son mínimas de apenas 200-400 MPa. Sin embargo, 5.0% de aditivo produce reducciones en el valor de módulo dinámico que oscilan entre 1000 y 1600 MPa para el sistema AMP1 y AMP2, respectivamente. Nuevamente, la rigidez conferida por el ácido polifosfórico en el sistema AMP2 pudiera ser eliminada debido a la neutralización con la amina presente tanto en el aditivo A como en el aditivo B. Es importante tomar en cuenta el detrimento anterior, ya que el valor de  $|E^*|$  a 10 Hz y 20°C es una variable de entrada de los métodos de diseño empírico-mecanicista y su contribución estructural está fuertemente ligado con los esfuerzos de compresión y la deformabilidad que podrían experimentar las capas granulares inferiores, por lo tanto, la participación de aditivo convendría limitarse a un porcentaje inferior al 5.0% o bien, si se desea maximizar los beneficios asociados con su utilización, se tendrían que realizar las adecuaciones pertinentes para alcanzar secciones de pavimento estructuralmente equivalentes.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

## 6. CONCLUSIONES.

A partir de los resultados obtenidos se realizaron numerosas observaciones y, con base en ellas, las siguientes conclusiones:

**1)** Tanto el aditivo A como el aditivo B lograron establecer una marcada diferencia en las propiedades fisicoquímicas de los asfaltos modificados con polímero ya que desde la dosis de 2.5% lograron mejorar enormemente la capacidad de relajación y disipación de esfuerzos tensionales. Del mismo modo, la participación de los aditivos químicos aminoró la huella química referente a la formación del grupo funcional carbonilo indicando menor oxidación/fragilidad. **2)** El ensayo MSCR alertó de una degradación excesiva en la resistencia a la deformación permanente y debilitamiento en la capacidad de recuperación de la red polimérica en los asfaltos modificados con 5% de aditivo A y B, por lo que podría limitarse la cantidad de estos productos cuando se trate de proyectos carreteros en sitios con temperaturas muy elevadas, carga sostenida o bien, aumentar el contenido de polímero SBS. También, el ensayo MSCR al ser una prueba a esfuerzo controlado castiga bastante el desempeño de los asfaltos menos rígidos, lo cual fue más evidente a medida que se incrementó la temperatura de análisis. **3)** La forma de las curvas carga versus desplazamiento de las mezclas asfálticas elaboradas con ambos aditivos permitió visualizar el mecanismo de falla dúctil prevaleciente, ya que estos materiales fueron capaces de tolerar mayores deformaciones antes de su ruptura en comparación con las mezclas asfálticas de control. El incremento en la resistencia al agrietamiento es respaldado por los Índices de Flexibilidad (IF) y por el abatimiento de la pendiente en la región posterior a la falla. Del mismo modo, es posible concluir que la incorporación de ácido polifosfórico en los sistemas de asfalto modificado con polímero tuvo un impacto negativo en la propagación de fisuras causando un fallo frágil por lo que un grado reológico superior (PG+MSCR) alcanzado con este producto no necesariamente se traduce en mayor durabilidad. **4)** La comparación directa entre las mezclas asfálticas con 2.5% de aditivos versus sus equivalentes de control en el ensayo CAC permite concluir que no hay diferencias importantes en la susceptibilidad a la formación de roderas. Adicionalmente, el decremento en rigidez de las mezclas asfálticas con 5.0% de aditivo podría mitigarse mediante la adecuada selección de la estructura granular durante la etapa de diseño. **5)** Las propiedades viscoelásticas lineales de las mezclas asfálticas que contienen 2.5% de aditivos presentaron módulos dinámicos ( $|E^*|$ ) bastante cercanos al valor mínimo exigido a las mezclas asfálticas en caliente de alto desempeño (5000 MPa). Por el contrario, la utilización de 5.0% tanto del aditivo A como del aditivo B disminuyeron 20 y 30% la rigidez de las mezclas asfálticas fabricadas con los sistemas de asfalto modificado con polímero AMP1 y AMP2, respectivamente. Finalmente, podría establecerse una dosis intermedia (p.ej., 4.0-3.5%) que permita balancear las características de susceptibilidad al envejecimiento, flexibilidad y rigidez de las mezclas asfálticas en caliente fabricadas con polímero.

## 7. REFERENCIAS.

- [1] D'angelo, J. (2019). Pavement Cracking: what binder properties control. Asphalt Magazine. Asphalt Institute.
- [2] RaadAwadKattan and ArianOmerMahmood. (2023). Improvement of Engineering Properties of Asphalt Binders and Mixture by Using SBS Additive Material. Advances in Civil Engineering Volume 2023, Article ID 7151175, 13 pages <https://doi.org/10.1155/2023/7151175>.
- [3] Emtiaz, M.; Imtiyaz, M.N.; Majumder, M.; Idris, I.I.; Mazumder, R.; Rahaman, M.M (2023). A Comprehensive Literature Review on Polymer Modified Asphalt Binder, 4, 901–932. <https://doi.org/10.3390/civileng4030049>.
- [4] Asphalt Institute. (2019). State of the knowledge: Use of the delta Tc parameter to characterize asphalt binder behavior. IS-240.
- [5] 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.
- [6] Chen, C., Yin, F., Turner, P., West, R. C., & Tran, N. (2018). Selecting a Laboratory Loose Mix Aging Protocol for the NCAT Top-Down Cracking Experiment. Transportation Research Record, 2672(28), 359–371. <https://doi.org/10.1177/0361198118790639>.