

Evaluación reológica y mecánica de un aglutinante asfáltico modificado por polímeros

Rheological and mechanical evaluation of a polymer modified asphalt binder

L. Medina ¹*, M. Muniz de Farias ^{**}, C. Recarey ^{***}

* · Universidade Federal de Goiás – Goiás, BRASIL

** Universidade de Brasília – Brasília, BRASIL

*** Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas – Santa Clara, CUBA

Fecha de Recepción: 15/11/2019

Fecha de Aceptación: 26/06/2020

PAG 170-181

Abstract

The paper presents a comparative study between the properties of a conventional binder and a polymer-modified binder, as well as some mechanical properties of hot mix asphalt concrete (HMA) made with these binders. The comparison of binder based on conventional indices and advanced dynamic properties obtained with a dynamic shear rheometer (DSR). These include the dynamic modulus $|G^|$ and phase angle (δ) master curves, the fatigue susceptibility in the LAS (Linear Amplitude Sweep) and permanent deformations in the MSCR (Multi Stage Creep Recovery). The asphalt mixtures dosed and compacted according to the Superpave methodology. The mechanical properties explored in concrete asphalt (CA) specimens subjected to moisture-induced damage and static creep tests. The results show the positive effects of polymer addition in the binder's and hot mix asphalt concrete properties, especially with regard to elastic resilience and permanent deformation reduction.*

Keywords: Modified asphalt; evaluation; rheological; mechanical

Resumen

El trabajo presenta un estudio comparativo entre las propiedades de un asfalto convencional y un asfalto comercial modificado por polímeros. Se estudia la influencia en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas densas confeccionadas con estos aglutinantes. Los asfaltos son comparados a partir de índices convencionales y propiedades dinámicas obtenidas con un reómetro dinámico de cortante (DSR). Son determinadas las curvas maestras de módulo dinámico $|G^*|$ y del ángulo de fase (δ) , la susceptibilidad a la fatiga con el ensayo LAS (Linear Amplitude Sweep) y las deformaciones permanente con el ensayo MSCR (Multi Stage Creep Recovery). Las mezclas asfálticas son dosificadas y compactadas según la metodología SuperPave. Las propiedades estudiadas son: daño por humedad inducida y fluencia estática. Los resultados muestran efectos positivos de la adición del polímero tanto en las propiedades analizadas de los asfaltos como en la mezcla, fundamentalmente en la recuperación elástica y la reducción de deformaciones permanentes.

Palabras clave: Asfalto modificado; evaluación; reológicas; mecánicas

1. Introducción

Las mezclas asfálticas densas son ampliamente utilizadas como capa de revestimientos en las vías urbanas y rurales brasileñas. Con el aumento del volumen y la configuración del tránsito en los últimos años se ha incrementado el uso de mezclas asfálticas con diferentes granulometrías así como el uso de asfaltos modificados (Vasconcelos et al., 2011).

La capacidad de carga del concreto asfáltico está dada principalmente por la fricción generada por la disposición y el contacto entre los agregados. De acuerdo con (Kim, 2009) las patologías de una estructura de pavimento pueden ser categorizadas fundamentalmente en dos grupos principales: grietas y deformaciones permanentes. Las deformaciones permanentes y la propagación de las grietas en las mezclas asfálticas son afectadas por varios factores como las tasas de carga, tiempo de carga, período de reposo, temperatura, estado tensional, envejecimiento y humedad. Las grietas y fisuras pueden ser provocadas por efectos térmicos o por fatiga. Para (Santos, 2012) el agrietamiento está relacionado con fenómenos de microfisuración en la mezcla asfáltica y la concentración de tensiones en la interface árido-aglutinante mientras que la aparición de deformaciones permanentes está asociado a la disipación de la energía provocada por el comportamiento viscoelástico del asfalto y la acumulación de microfisuras. Si bien la reducción de la fracción volumétrica de aglomerante asfáltico en la mezcla reduce la susceptibilidad a las deformaciones permanentes, el aumento de la fracción volumétrica de áridos pétreos aumenta la susceptibilidad al agrietamiento.

Autor de correspondencia:

Universidade Federal de Goiás – Goiás, BRASIL

E-mail: lmedina@ufg.br



Con el objetivo de mejorar el comportamiento mecánico de los concretos asfálticos ha crecido el desarrollo de la modificación de los asfaltos por la adición de polímeros. Los modificadores confieren al asfalto una mayor resistencia a la fatiga y la deformación permanente así como disminuyen la susceptibilidad térmica (Domingos y Faxina, 2016); (Pamplona et al., 2012); (Saboo y Kumar, 2015); (Silva et al., 2002). El aumento de la rigidez del aglomerante asfáltico provocado por la incorporación de aditivos aumenta la resistencia a la deformación permanente (Pamplona et al., 2014). En el estudio de (Domingos et al., 2017) basándose en la aplicación de ensayos en el reómetro dinámico de cortante (DSR), se evalúa la susceptibilidad de asfaltos y mezclas asfálticas en la aparición de deformaciones permanentes estudiando tres tipos de polímeros como modificadores del asfalto. El uso de asfaltos modificados en la producción de mezclas asfálticas proporciona un aumento en la resistencia a la deformación permanente (Onofre et al., 2013).

Entre los ensayos que simulan el envejecimiento de la mezcla asfáltica a largo plazo se encuentra el ensayo de daño por humedad inducida. A partir de este ensayo son estudiadas varias mezclas asfálticas producidas en Brasil con la adición de asfaltos modificados y se demuestra que la modificación con polímeros SBS se torna más resistente a la acción del agua (Anitelli, 2013).

De esta forma en este trabajo se presentan los resultados de la caracterización convencional y reológica de un asfalto modificado por polímeros (AMP). Además se evalúa el desempeño de una mezcla asfáltica densa (CA), producida con AMP con base en ensayos mecánicos de daño por humedad inducida e la fluencia estática (Creep Compliance). Estos resultados se comparan con los de una mezcla producida con asfalto convencional en condiciones y características similares.

2. Materiales y métodos

Los ensayos de este trabajo fueron realizados en el laboratorio de Infraestructuras (In-fralab) de la Universidad de Brasilia (UnB). Las mezclas fueron producidas con árido cal-cáreo dolomítico frecuentemente utilizado en el Distrito Federal de Brasil, y asfalto modificado por polímeros elastómeros de nombre comercial Stylink, clasificado como PG 76-22 Tipo E 60/85. Los agregados son dosificados en una curva granulométrica que obedece a la fracción "C" definida por el Departamento Nacional de Infraestructura de Transporte (DNIT). El material calcáreo muestra resultados de desgaste a la Abrasión Los Ángeles de 21%; durabilidad en sulfato de magnesio de 4,2% y equivalente de arena de 68%. Por otra parte la caracterización del asfalto fue dividida en ensayos físicos convencionales y ensayos de caracterización reológica. Para fines comparativos se caracteriza también un cemento asfáltico extraído de petróleo (CAP) con un grado de penetración de 50/70 muy utilizado en la producción de mezclas asfálticas en Brasil. Los resultados de los ensayos de daño por humedad inducida y fluencia estática son comparados con una mezcla densa elaborada en condiciones y características similares y utilizando además del material calcáreo, el cemento asfáltico 50/70 puro.

2.1 Caracterización Reológica

Con el objetivo de caracterizar los parámetros reológicos de los cementos asfálticos puro y modificado se utiliza el reómetro dinámico de cortante (DSR) modelo Smartpave 102. Los cementos asfálticos son ensayados después del envejecimiento con el objetivo de verificar y comparar sus propiedades reológicas. Con esta finalidad son presentados los resultados de la viscosidad Brookfield, construcción de las curvas maestras del módulo de cortante dinámico $|G^*|$ y el ángulo de fase (δ), el ensayo de LAS (Linear Amplitude Sweep) y el ensayo MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery).

Para la construcción de la curva maestra se aplica el principio de superposición tiempo-temperatura, característica inherente a los materiales viscoelásticos, para una temperatura de referencia que en este caso será de 25°C. Las muestras de asfalto son sometidas a un barrido de frecuencia de 0,1 a 100 rad/s. En este ensayo se obtienen las isócronas de las propiedades del módulo complejo de cortante (G^*) y el ángulo de fase (δ). En una gama de temperaturas de 15 a 40°C en intervalos de 5°C. La curva maestra del módulo complejo puede ser modelada matemáticamente como una función sigmoidea. La función sigmoidea y el factor de desplazamiento (shift factor) son definidas por las formulas:

$$\text{Log}|G^*| = \mu + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta + \gamma \cdot \text{Log}(t_r))} \quad (1)$$



$$a(T) = \frac{t}{t_r} = \frac{\omega_r}{\omega} \quad (2)$$

$$\text{Log}(a(T)) = a.T^2 + b.T + c \quad (3)$$

Donde μ , β , α e γ son coeficientes de la función sigmoidea, t es el tiempo de carga en una temperatura de interés, t_r es el tiempo reducido de carga en la temperatura de referencia, $a(T)$ es el factor de traslación y a, b y c son coeficientes del polinomio de segundo orden. El proceso de obtener las variables definidas en las ecuaciones 1 - 3 se realiza por el método de los mínimos cuadrados, utilizando una planilla en Excel desarrollada por (Mello, 2008).

Basándose en esta planilla es desarrollada otra similar para la construcción de la curva maestra del ángulo de fase. Aunque la curva maestra del ángulo de fase se construye con el modelo Christensen Anderson and Marasteanu (CAM) el factor de desplazamiento se corresponde con lo explicado anteriormente. Según los autores (Bayane et al., 2017); (Yusoff et al., 2012) el modelo CAM es efectivo para los ajustes de la curva maestra tanto para frecuencias bajas como para las superiores. El modelo CAM es descrito por la fórmula 4 donde β y λ son los coeficientes del modelo y ω es la frecuencia reducida.

$$\delta(\omega) = \frac{90}{\left[1 + \left(\frac{\omega}{\lambda}\right)^\beta\right]} \quad (4)$$

El ensayo LAS fue desarrollado por (Johnson, 2010) con el objetivo de cuantificar la fatiga en asfaltos utilizando un proceso de corta duración. El ensayo es realizado a una temperatura de 25°C utilizando una muestra de asfalto con un diámetro de 8 mm y un espesor (gap) de 2 mm entre las placas paralelas. Este ensayo se divide en dos etapas: inicialmente se realiza un barrido de frecuencia de 0,1 – 30Hz, con una amplitud de deformación de 0,1% y seguidamente, un barrido de amplitud de deformación en el rango de 0,1-30%, en una frecuencia de 10Hz y llevando el material hasta la ruptura.

El ensayo Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) o Recuperación Elástica a Diferentes Esfuerzos se encuentra especificado bajo la norma AASHTO T 350 (AASHTO, 2014) y consiste en la medición de las propiedades viscoelásticas (mediante el “creep compliance”) de un asfalto envejecido en un horno RTFO, al aplicarle un esfuerzo de 100Pa y 3200Pa. El ensayo mide la respuesta elástica en un ligante asfáltico sometido a un esfuerzo cortante y recuperación. El “creep compliance” no recuperable es una medición de la deformación permanente y se define como el porcentaje de deformación unitaria residual (%ε) de un espécimen luego de ser sometido a un ciclo de carga y recuperación dividido por el esfuerzo aplicado.

2.2 Evaluación mecánica de la mezcla asfáltica.

Los cuerpos de pruebas (CPs) de concrete-to asfáltico denso fueron producidos con un diámetro de 150 mm en un compactador giratorio con energía de compactación de 100 giros. Una vez estabilizada a la temperatura ambiente son extraídos testigos de 100 mm de diámetro para ajustar las dimensiones a los requerimientos de los ensayos mecánicos. El proceso de extracción se muestra en la (Figura 1).





Figura 1. Proceso de preparación de los cuerpos de pruebas.

Para verificar el desempeño del asfalto modificado utilizado en la mezcla asfáltica densa se utiliza el ensayo de determinación de daño por humedad inducida. El método empleado para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad es el método utilizado por la AASHTO, que evalúa la acción del agua a largo plazo AASHTO T 283, (AASHTO 2014). Este método estima el daño a partir de las propiedades debido a que el agua puede separar la película de asfalto que aglutina los agregados de la mezcla. Los CPs producidos son separados en dos grupos, siendo un grupo de referencia y otro condicionado a la acción del agua. En el condicionamiento térmico los cuerpos de prueba son parcialmente saturados son embalados en un filme plástico y colocados en un saco plástico con 10ml de agua destilada, seguido por un congelamiento a -18°C durante 16 horas. Terminado este período los CPs son sometidos a un baño de 24h a una temperatura de 60°C . Después de este proceso de condicionamiento térmico la temperatura se estabiliza hasta 25°C y los CPs son llevados a la ruptura en un ensayo de compresión diametral. El valor de la compresión diametral para los grupos no condicionado y condicionado se determina a través de la ecuación:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (5)$$

Donde:

σ_R : resistencia a tracción (Mpa);

F: fuerza de ruptura en (N);

d: diámetro del cuerpo de prueba (mm);

h: altura do cuerpo de prueba (mm)

La mezcla es susceptible al daño por humedad cuando el valor de RRT (Resistencia Retenida a la Tracción), definida como la razón entre la RT (resistencia a la tracción indirecta) entre los CPs no condicionados y condicionados, es menor que 80%. En la (Figura 2) se presenta parte del proceso del ensayo de daño por humedad inducida.



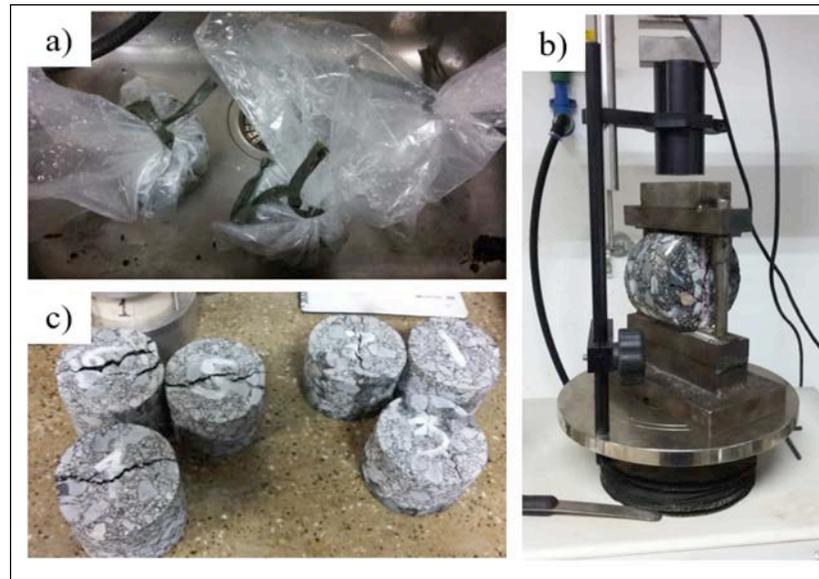


Figura 2. Ensayo de daño por humedad inducida. a) CPs durante el condicionamiento térmico. b) compresión diametral. c) grupos de CPs ensayados.

2.3 Ensayo de fluencia estática.

Para evaluar la susceptibilidad a las de-formaciones permanentes en las mezclas producidas con el asfalto modificado son realizados ensayos de fluencia estática. El ensayo consiste en aplicar una compresión axial a una temperatura de 25°C, aplicando una carga de estática a una tensión de 100 kPa (1,0 kgf/cm²) durante una hora. Seguidamente el cuerpo de prueba permanece durante 15 minutos en fase de descarga con el objetivo de verificar la recuperación elástica de la mezcla. En la (Figura 3) se muestra la ejecución del ensayo de fluencia estática.



Figura 3. Ensayo de fluencia estática.

3. Resultados

En esta sección son presentados y analizados los resultados obtenidos en los ensayos realizados a los asfaltos convencional y modificado y en los cuerpos de pruebas de concreto asfáltico denso CA.

3.1 Caracterización convencional de los asfaltos

Las propiedades convencionales de los cementos asfálticos además de ser importantes en las especificaciones propias del material auxiliaran de conjunto con las caracterización reológicas, la elección del asfalto para producir la mezcla de estudio en este trabajo. Los valores obtenidos en la caracterización de los cementos asfálticos CAP 50/70 y modificado PG 76-22 Tipo E 60/85 son mostrados en las especificaciones de cada ensayo realizado. (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados de los ensayos de caracterización de los cementos asfálticos.

Ensayos	U/M	Límites		Resultados		Método de Ensayo
		CAP 50-70	AMP	CAP 50-70	AMP	
Densidad	g/cm ³	-		1,002	1,012	DNER ME 193 (1996)
Penetración (100g, 5s, 25°C)	0,1m m	50-70	40-70	56	45	DNER ME 003 (1999)
Punto de Ablandamiento	°C	≥46	60, mín.	48	65	DNER ME 247 (1994)
Ductilidad a 25°C, mín.	cm	≥60		>100	>100	DNER ME 163 (1998)
Punto de fulgor	°C	>235		320	346	DNER ME 148 (1994)
Punto de Combustión	°C	-		380	395	DNER ME 163 (1998)
Recuperación elástica a 25°C, 20 cm	%	85 mín.		7	90	DNER ME 163 (1998)
Efecto del calor y el aire (RTFOT) a 163° C, 85 min						ASTM D 2872-04 (2004)
Variación en masa, máx.	% masa	0,5 máx.		0,19	0,14	
Viscosidad Brookfield						
a 135°C, Sp 21, 20 rpm	cP	141, mín.	3000, máx.	350	1022	ABNT NBR 15184 (2004)
a 150°C, Sp 21, 20 rpm	cP	50, mín.	2000, máx.	210	520	
a 177°C, Sp 21, 20 rpm	cP	30-150	1000, máx.	80	162	

El asfalto modificado es más “duro”, como expresa el resultado de la penetración, así como también es menos sensible a la influencia de la temperatura como muestran los resultados del punto de ablandamiento. La susceptibilidad a la influencia de la temperatura es determinada por la pérdida de más durante el envejecimiento a corto plazo (RTFOT). En la medida que este valor sea menor el cemento asfáltico será menos sensible a los efectos de la temperatura siendo justamente el caso del asfalto modificado si se compara con el CAP 50/70. Otra referencia importante para este trabajo es la notable diferencia que existe en el valor de recuperación elástica, siendo 90% para el caso del asfalto modificado contra apenas 7% presentado por CAP 50/70.

De los resultados de la viscosidad Brookfield son obtenidas las temperaturas de mezclado y compactación de para el asfalto convencional como se especifica en la norma ASTM D2493. En este caso la temperatura de mezclado se encuentra en el rango de viscosidad $0,17 \pm 0,02$ Pa.s y a la de compactación en el rango de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s. Resultando en temperaturas de mezclado de 145°C a 150°C y de compactación de 135 a 140°C. Este método tradicional no es aplicable para asfaltos modificados debido al natural aumento de la viscosidad. Para conseguir un valor de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s la temperatura necesaria es superior a los 177°C, valor máximo aplicado en el ensayo. Para el caso del asfalto modificado se mezcla con los agregados a 165°C y se compacta a 155°C como recomienda el proveedor. Esta recomendación sugiere que el asfalto modificado es producido a base de CAP 50/70, ya que, siguiendo la especificación 5.4.6.4 de la norma (26) la temperatura recomendable para la compactación de la mezcla asfáltica debe ser de 140°C +3°C para cada 1% de polímero acrecentado. A partir de este criterio se infiere que fue usada una adición de 5% de polímero para modificar el asfalto.



3.2 Construcción de la curva maestra

La curva maestra es muy utilizada en la representación del comportamiento reológico del material. Las propiedades reológicas son expresadas para una única temperatura de referencia dentro de un espectro de frecuencias o de tiempos de carga. Las curvas maestras del módulo dinámico de cortante $|G^*|$ para los asfaltos CAP 50/70 y el AMP son mostradas en la (Figura 4), para la condición de envejecimiento RTFOT y una temperatura de referencia de 25°C. Este valor de temperatura corresponde a la utilizada en los ensayos de fluencia estática en las mezclas elaboradas. Para producir los resultados en la citada temperatura es utilizado un espectro de entre 15 a 40°C.

La (Figura 4) muestra la variación de la rigidez de los asfaltos envejecidos a corto plazo en función de la frecuencia reducida. Los resultados muestran que para bajas frecuencias o altas temperaturas el desempeño del asfalto modificado, en términos de rigidez, es prácticamente igual al presentado por CAP 50/70. Por otro lado para bajas temperaturas o altas frecuencias, el asfalto modificado presenta un módulo complejo G^* mayor, lo que puede indicar menores deformaciones totales. La (Figura 5) exhibe la curva maestra del ángulo de fase ($^\circ$) construida con el mismo Shift Factor utilizado en la curva maestra del módulo dinámico $|G^*|$ y utilizando el modelo CAM. El asfalto modificado tiene un ángulo de fase menor que el CAP 50/70, lo que indica un comportamiento más elástico, corroborando también los resultados de recuperación elástica. Este comportamiento es más visible para frecuencias 0,1 a 100 rad/s que corresponden a la temperatura de referencia 25°C.

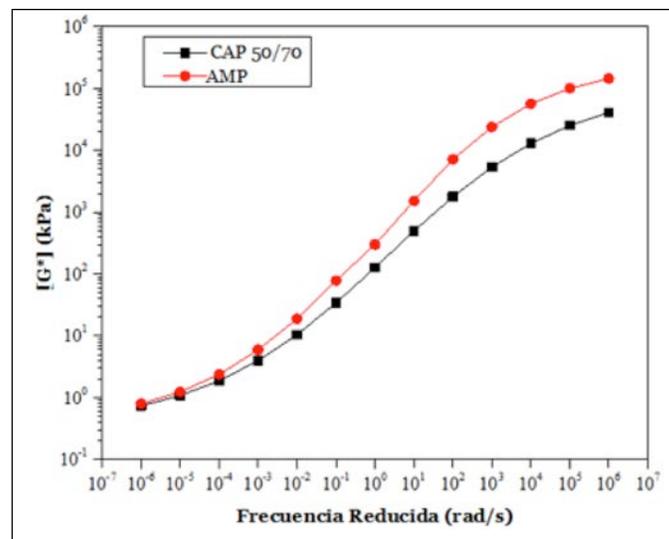


Figura 4. Curva maestra del módulo dinámico.

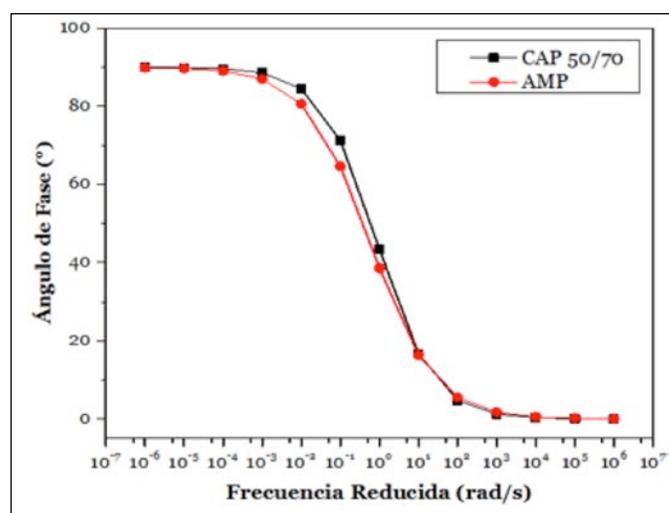


Figura 5. Curva maestra del ángulo de fase ($^\circ$).



3.3 Ensayo LAS (Linear Amplitude Sweep)

El ensayo de barrido de amplitud de frecuencia (LAS) es un test acelerado de fatiga en el que se evalúa la tolerancia de del material al proceso de cargamento cíclico. Los resultados del ensayo son una comparación de la susceptibilidad a la fatiga de los cementos asfálticos estudiados.

En la (Figura 6) se exhiben la comparación de las curva de tensión cortante versus deformación en una temperatura de 25°C para los as-faltos analizados. Los resultados demuestran que a pesar del CAP 50/70 presenta un mayor valor de tensión a cortante en la ruptura, tiene un comportamiento más frágil si se compara con el asfalto modificado. Los valores de tensión de cortante tienden a 0 Pa para una tasa de deformación de 20% y 30% respectivamente, comprobando así la afirmación anterior.

Por otra parte, en la (Figura 7) son explicitadas las curvas características que muestran la evolución del daño en los cementos asfálticos ensayados. Los resultados muestran que el asfalto convencional es más susceptible al daño que el asfalto modificado.

En las curvas características se percibe un valor inferior de integridad para un mismo valor de daño en el CAP 50/70 si se compara con el asfalto modificado, sugiriendo una relación entre la pérdida de integridad e el comportamiento frágil mostrado en la (Figura 6).

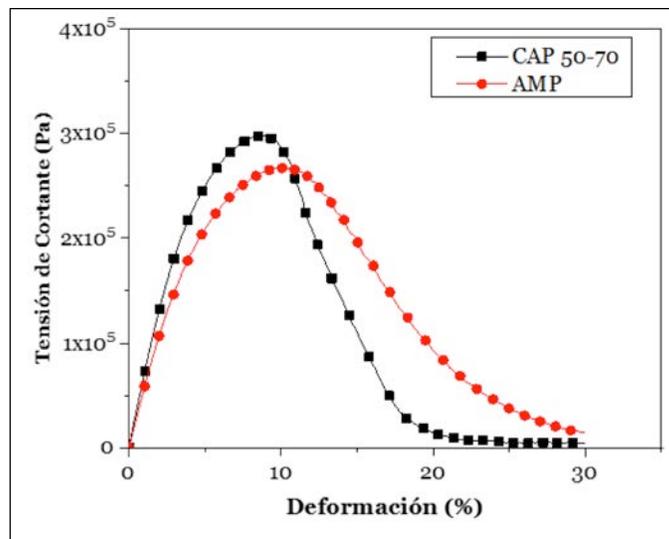


Figura 6. Curva de tensión-deformación para los asfaltos estudiados en el ensayo LAS.

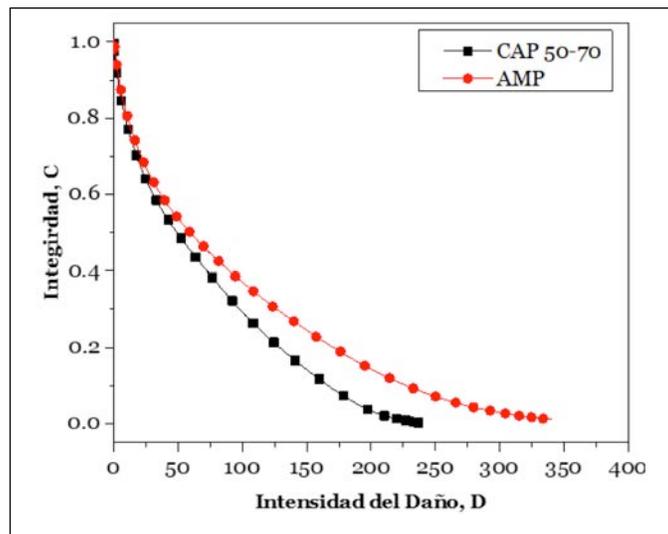


Figura 7. Curva característica del daño en el ensayo LAS para los asfaltos envejecidos.



3.4 Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

Los resultados del ensayo Recuperación Elástica a Diferentes Esfuerzos (MSCR) son mostrados en las (Tabla 2) y (Tabla 3). Es importante aclarar que los ensayos fueron realizados apenas en las temperaturas de 46, 58 y 58 °C, pues para temperaturas superiores el CAP 50/70 no muestra recuperación elástica retardada. Otro punto a ser considerado con respecto a las temperaturas del ensayo es el hecho de la caracterización reológica es realizada con el único objetivo de establecer una comparación de desempeño

Tabla 2. Resultados de la recuperación y del “creep compliance” no recuperable para 0.1 e 3.2 kPa.

Asfalto	Recuperación 0,1kPa (%)			Recuperación 3,2kPa (%)		
	46°C	52°C	58°C	46°C	52°C	58°C
CAP 50/70	15,4	9,76	4,61	11,58	4,14	0,86
AMP	76,8	73,3	69,7	66,3	63,1	46,69
Asfalto	Compliance 0,1kPa (kPa ⁻¹)			Compliance 3,2kPa (kPa ⁻¹)		
	46°C	52°C	58°C	46°C	52°C	58°C
CAP 50/70	0,19	0,57	1,4	0,2	0,63	1,54
AMP	0,04	0,12	0,27	0,06	0,17	0,52

Tabla 3. Resultados de la diferencia porcentual entre el “creep compliance” 0.1 e 3.2 kPa.

Asfalto	J _{nr,diff} (%)		
	46°C	52°C	58°C
CAP 50/70	5,24	9,52	9,09
AMP	33,33	29,41	48,08

Analizando las (Tabla 2) y (Tabla 3) se puede concluir que la adición de polímeros elastómeros hace del asfalto modificado un material con mayor potencial de recuperación elástica y menos susceptible a desarrollar deformaciones permanentes. La sensibilidad a la tensión y el grado de no linealidad de la respuesta reológica (J_{nr,diff}) se muestra también mayor para el cemento asfáltico modificado. Estas potencialidades del asfalto modificado pueden determinar el comporta-miento mecánico de la mezcla, sobre todo desde el punto de vista de la recuperación elástica.

3.5 Resultado del comportamiento mecánico de las mezclas

Las mezclas asfálticas son elaboradas de acuerdo con la metodología Superpave. Como resultado de la dosificación se produce una mezcla con asfalto modificado con 4,0% de asfalto, densidad aparente (Gmb) de 2,352 g/cm³, Densidad de Rice (Gmm) de 2,466 g/cm³ y volumen de vacíos (Vv) de 4,6%. La mezcla producida con el asfalto convencional con un 5% de asfalto Gmb=2,329 g/cm³, Gmm=2,431 g/cm³ y Vv=4,2%.

Los resultados en la (Figura 8) se corresponden con el ensayo de daño por humedad inducida. El ensayo es dividido en dos grupos de tres especímenes para cada mezcla a los cuales se le aplica una compresión. Un primer grupo es ensayado hasta la ruptura sin presentar ningún condicionamiento térmico llamado grupo de control y un segundo grupo se condiciona de acuerdo al procedimiento descrito en la norma AASHTO T 283.

La mezcla elaborada con CA 50/70 presenta un RT medio de 1,21 MPa y desviación típica 0,051 MPa para el grupo de control. Las muestras condicionadas tienen una media de 1,062 MPa y 0,024 MPa de desviación típica. Por otro lado, en la mezcla producida con asfalto modificado el grupo de control presenta un valor medio de RT 1.567 MPa con desviación típica de 0.022MPa. El grupo de muestras condicionadas tiene un valor de medio de RT de 1.514 MPa con valor de desviación típica de 0.043 MPa. Estos valores le confieren a las mezclas producidas con asfalto “puro” y modificado una RRT de 85% y 96% respectivamente, indicando así una menor susceptibilidad al deterioro por la acción del agua para la mezcla elaborada con AMP.



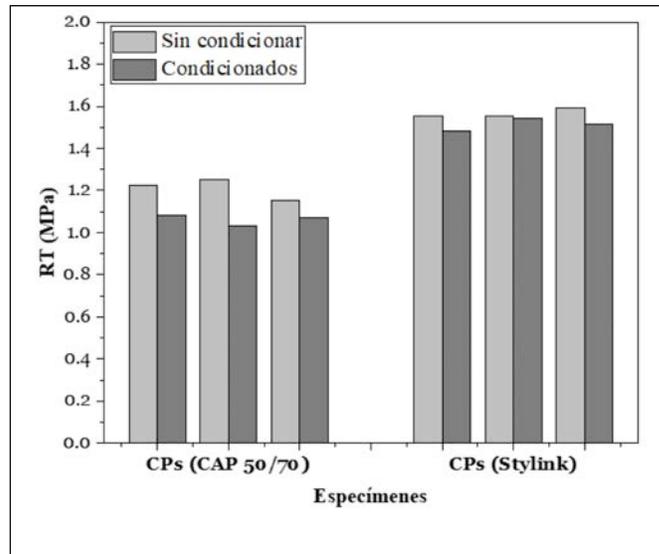


Figura 8. Resultados del ensayo de daño por humedad inducida.

3.6 Resultados del ensayo de fluencia estática

En la (Figura 9) se muestran los resultados de los ensayo de fluencia estática realizados en las mezclas elaboradas con el asfalto modificado. Se muestra también a título de comparación una curva con los resultados del ensayo realizado con un concreto asfáltico elaborado en condiciones similares con el CAP 50/70.

Los resultados muestran que el desplazamiento máximo en el periodo de aplicación de carga es de la misma orden de magnitud para los dos concretos asfálticos. Gráficamente se percibe también que la mezcla elaborada con AMP presenta una recuperación del desplazamiento superior si se compara con el concreto asfáltico producido con asfalto CAP 50/70, confiriendo un potencial elástico mayor.

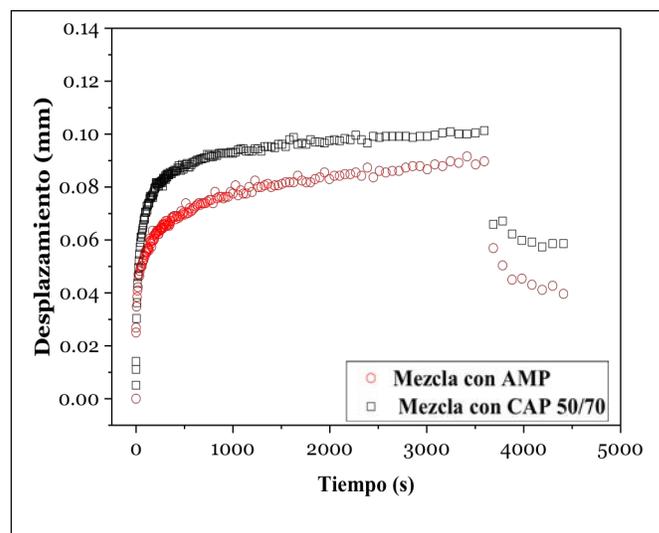


Figura 9. Resultados del ensayo de fluencia estática.



4. Conclusiones

Los ensayos de caracterización convencional confieren al asfalto modificado un padrón superior de calidad si se compara con el CAP 50/70. Esta afirmación es corroborada por los valores siempre superiores del aglutinante asfáltico modificado. Esta comparación es válida también delante de los resultados reológicos.

Las curvas maestras construidas para el módulo complejo G^* y el ángulo de fase también muestran la distinción del AMP en relación al asfalto convencional CAP 50/70. Los resultados del ensayo LAS (Linear Amplitude Sweep) demuestran que el asfalto modificado es menos susceptible a la fatiga que el asfalto convencional. Un aspecto relevante con respecto al ensayo LAS es la relación entre la pérdida de integridad y la intensidad del daño, siendo que, para un mismo valor de daño o AMP mantiene un valor de integridad superior al CAP 50/70.

El Asfalto modificado también presenta menor susceptibilidad a las deformaciones permanentes expresadas en los valores de J_{nr} así como mayor potencial a las deformaciones potencial para la recuperación elástica retardada si se compara con el CAP 50/70 cuando ambos son sujetos al ensayo de Recuperación Elástica a Diferentes Esfuerzos (MSCR).

Desde el punto de vista mecánico se constata, con base en los ensayos de daño por humedad inducida, que el uso del asfalto modificado atribuye al concreto asfáltico baja susceptibilidad térmica demostrado por el valor 96% de RRT.

En el caso de las propiedades viscoelásticas en el dominio del tiempo, la mezcla elaborada con asfalto modificado presenta una recuperación elástica del deslizamiento en la orden de 56% contra el 40% para la mezcla producida con el asfalto convencional CAP 50/70.

5. Referencias

- AASHTO (2014).** T 283. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO (2014).** T 350. Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ABNT (2004).** NBR 15184. Materiais Betuminosos- Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Anitelli, A. (2013).** Estudo do dano por umidade de misturas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado com polímero sbs (Dissertação de Maestría). São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos.
- ASTM (2004).** D 2872-04. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2001).** D2493.. ASTM D2493: Standard Viscosity-Temperature Chart for Asphalts. American Society for Testing and Materials.
- Bayane, B. M.; Yang, E.; Yanjun, Q. (2017).** Dynamic Modulus Master Curve Construction Using Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM) model. International Journal of Engineering Research and Applications, 07(01), 53–63. <https://doi.org/10.9790/9622-0701055363>.
- DNER-ES 385. (1999).** Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER (1999).** ME 003. Material betuminoso - determinação da penetração. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER (1994).** ME 148. Material betuminoso - determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto Cleveland) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER (1998).** ME 163. Materiais betuminosos - determinação da ductilidade Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER (1996).** ME 193. Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos - determinação da densidade e massa específica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER (1994).** ME 247. Material termoplástico para demarcação viária-determinação do ponto de amolecimento (método do anel e bola). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- Domingos, M. D.; Faxina, A. L. (2016).** Ensaios MSCR segundo as normas ASTM D7405-10a e AASHTO T350-14: um estudo de caso envolvendo ligantes asfálticos modificados. TRANSPORTES, 24(3), 38, doi: <https://doi.org/10.14295/transportes.v24i3.1115>.
- Domingos, M. D. I.; Faxina, A. L.; Bernucci, L. L. B. (2017).** Characterization of the rutting potential of modified asphalt binders and its correlation with the mixture's rut resistance. Construction and Building Materials, 144, 207–213, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.171>.
- Johnson, C. M. (2010).** Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance Using an Accelerated Test Method. University of Wisconsin-Madison.
- Kim, Y. R. (2009).** Modeling of Asphalt Concret (McGraw-Hill, Ed.). North Carolina.
- Mello, L. G. R. De. (2008).** A Teoria Do Dano Em Meio Contínuo No Estudo Da Fadiga em Misturas Asfálticas. (Tesis de Doctorado). Brasília: Universidade de Brasília, 2008.
- Onofre, F. C.; Castelo Branco, V. T. F.; Soares, J. B.; Faxina, A. L. (2013).** Avaliação Do Efeito De Ligantes Asfálticos Modificados Na Resistência À Deformação Permanente De Misturas Asfálticas Densas. Transportes, 21(3), 14–21, doi: <https://doi.org/10.4237/transportes.v21i3.685>.
- Pamplona, Thaís F.; Amoni, B. de C.; Alencar, A. E. V. de; Lima, A. P. D.; Ricardo, N. M. P. S.; Soares, J. B.; Soares, S. de A. (2012).** Asphalt binders modified by SBS and SBS/nanoclays: effect on rheological properties. Journal of the Brazilian Chemical Society, 23(4), 639–647. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532012000400008>.



SPANISH VERSION.....

- Pamplona, Thaís Ferreira; Nuñez, J. M.; Faxina, A. L. (2014).** Desenvolvimentos recentes em ensaios de fadiga em ligantes asfálticos. *Transportes*, 22(3), 12–25, doi: <https://doi.org/10.14295/transportes.v22i3.682>.
- Saboo, N.; Kumar, P. (2015).** A study on creep and recovery behavior of asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 96, 632–640, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.078>.
- Santos, M. A. A. (2012).** Simulação Numérica dos Efeitos de Cargas Dinâmicas na Vida de Fadiga de Pavimentos (Tese de Doutorado). Universidade de Brasília.
- Silva, L. S. da; Forte, M. madalena de C.; Specht, L. P.; Ceratti, J. A. (2002).** Polímeros como modificadores asfálticos. *TRANSPORTES*, 10(1), 85–104, doi: <https://doi.org/10.14295/transportes.v10i1.164>.
- Vasconcelos, K. L.; Bernucci, L. L. B.; Moura, E. de; Sanbonsuge, K.; Chaves, J. M. (2011).** (2011, 25 de Octubre). Caracterização mecânica de misturas asfálticas contínuas e descontínuas com diferentes ligantes asfálticos. 7o Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões –CBR&C, (pp.11-20). Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Concessões Rodoviárias (ABCR).
- Yusoff, N. I. M.; Hainin, M. R.; Airey, G. D. (2012).** A Comparative Study of Phase Angle Predictive Equations Using Bituminous Binder Data. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37(6), 1571–1583, doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0284-4>.

