

ANÁLISIS DE PROPIEDADES REOLÓGICAS DE FATIGA EN ASFALTOS PROVENIENTES DE MEZCLAS TIBIAS

Dr. Ing. Francisco Morea

Área Tecnología Vial, LEMIT-CIC.

Investigador Asistente CONICET

Dirección: calle 52 entre 121 y 122 sin número

Ciudad de La Plata, Buenos Aires – Argentina

Código Postal: 1900

Tel.: (054221) 483 1142/43/44

Fax: (054221)4250471.

Dirección de correo: franciscomorea@conicet.gov.ar,

tecnologiavial@lemit.gov.ar

ANÁLISIS DE PROPIEDADES REOLÓGICAS DE FATIGA EN ASFALTOS PROVENIENTES DE MEZCLAS TIBIAS

Resumen

El desempeño a largo plazo de mezclas tibias es hoy en día una cuestión sin una respuesta certera dada la corta vida de este tipo de tecnologías. Parte de las tecnologías de mezclas tibias utilizan asfaltos especiales o aditivos incorporados al asfalto que permiten reducir las temperaturas de elaboración. Conocer el aporte de estos ligantes para mezclas tibias y su posible respuesta frente a los modos de falla, sobre todo fatiga, es de suma importancia. En trabajos anteriores se ha estudiado propiedades reológicas que se relacionan con los modos de falla que se suscitan en el pavimento y su relación con el desempeño esperable de las mezclas asfálticas frente a estos. En este trabajo se ahonda en el estudio de propiedades reológicas relacionadas al comportamiento a fatiga de una serie de asfaltos recuperados de diferentes mezclas tibias. Las mezclas tibias de las que se recuperaron los asfaltos se elaboraron a diferentes temperaturas de mezclado y compactación con reducciones de hasta 30 °C respecto de las temperaturas convencionales. Se estudia y analiza comparativamente la posible respuesta a fatiga de estos diferentes asfaltos.

Keywords: Propiedades reológicas - Fatiga - Mezclas Tibias (WAM)

Área temática: pavimentos

1 Introducción

Dentro de las nuevas tendencias medioambientalmente amigables aparece el desarrollo de las mezclas tibias (WAM por sus siglas en inglés). Mezclas elaboradas a menores temperaturas que las tradicionales que permiten reducir las emisiones de CO₂, Mejorar las condiciones de trabajo de los operarios y mejorar condiciones del tendido de las mezclas [1]. Las mezclas tibias deben presentar un comportamiento aceptable frente a ahuellamiento y fatiga comparable al de una mezcla convencional. Es por ello que resulta importante evaluar su desempeño, sobre todo la durabilidad. Debido a lo reciente de las tecnologías de mezclas tibias es que no se tiene antecedentes desde el punto de durabilidad de este tipo de mezclas colocadas en caminos y resulta importante estudiar y determinar que este tipo de tecnologías permitan realizar mezclas con una durabilidad igual o superior a las tecnologías tradicionales de mezclas en caliente. En el LEMIT desde el 2010 se vienen estudiando el comportamiento en ensayos de laboratorio de mezclas tibias y de las propiedades reológicas de los asfaltos denominados tibios [2,3] además del monitoreo de tramos de prueba en caminos reales de nuestro país [4,5]. Es importante determinar que este tipo de tecnologías permitan realizar mezclas con una durabilidad igual o superior a las tecnologías tradicionales de mezclas en caliente. Ensayos de fatiga y de daño por humedad son estudios que brindan información respecto de la durabilidad de las mezclas.

Existe la posibilidad de realizar mediciones reológicas sobre los ligantes asfálticos de las mezclas que se relacionan directamente con la posible fatiga de la mezcla y brindan una idea de la durabilidad de la mezcla. Dos ensayos sobre ligantes asfálticos relacionados a la fatiga en mezclas son los ensayos de Linear Amplitud sweep (LAS) y Dissipated Energy Ratio (DER); realizados con el reómetro de corte dinámico (DSR). En ambos ensayos,

aunque de diferente forma, el asfalto se somete a ciclos de carga y descarga para evaluar la fatiga. Otro posible análisis de propiedades reológicas en el DSR son relativas al ahuellamiento como Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) y Low shear viscosity (LSV). Si bien estas no se relacionan a la durabilidad de la mezcla, si la misma falla tempranamente por ahuellamiento no hay tal parámetro como la durabilidad.

El ensayo de LAS de la norma AASTHO TP 101-14 [6] permite determinar parámetros de fatiga del ligante asfáltico. En el ensayo se obtiene una curva de carga-deformación de la cual se puede calcular la tenacidad del asfalto para las condiciones de ensayo. Asociado a la tenacidad está el fenómeno de disipación de energía de una mezcla asfáltica y es la fatiga del sistema agregado-asfalto, donde el compuesto va perdiendo gradualmente su energía disponible debido a cargas de corta duración cada vez que pasa un vehículo [7].

En trabajos anteriores [8] se estudiaron propiedades reológicas que se relacionan con el ahuellamiento y fatiga de una serie de asfaltos recuperados de diferentes mezclas tibias por medio de ensayos de MSCR, LSV y DER. Las mezclas tibias de las que se recuperaron los asfaltos se elaboraron a diferentes temperaturas de mezclado y compactación con reducciones de hasta 30 °C.

En este trabajo se estudiaron los mismos asfaltos del trabajo anterior [8], uno convencional y uno modificado con polímeros, que se mezclaron con dos tipos de aditivos para mezclas tibias. Los mismos se extrajeron de mezclas elaboradas al efecto de manera tradicional (sin aditivos) y con diferentes reducciones de temperatura de elaboración (con y sin aditivos). Sobre estos asfaltos se evaluaron las propiedades reológicas relacionadas a su resistencia a fatiga con el ensayo LAS y para recabar más datos se analizaron los valores de $G^* \cdot \sin \delta$, parámetro tradicional de SHRP para evaluar fatiga.

2 Experimental

2.1 Programa de ensayo

El objetivo de este trabajo fue observar los cambios que se producían en las propiedades reológicas de los asfaltos extraídos de cuatro diferentes tipos de mezclas: mezclas tradicionales en caliente sin aditivo (como control), mezclas tibias sin aditivos (para observar cómo afecta la reducción de temperatura) y mezclas tibias con dos diferentes aditivos tibios.

Las mezclas en caliente fueron mezcladas y compactadas a las temperaturas obtenidas para el asfalto convencional de acuerdo al criterio tradicional de valores de viscosidad de 0.17 y 0.28 Pa.s. En el caso del asfalto modificado se usaron las temperaturas de mezclado y compactación recomendadas por el fabricante.

Diferentes mezclas tibias fueron elaboradas con los asfaltos sin aditivos para observar los cambios en las propiedades reológicas producto de la reducción de temperaturas de mezclado y compactación. Las temperaturas se redujeron en 20 y 30 °C respecto de las tradicionales en caliente.

Posteriormente, se elaboraron mezclas tibias con los asfaltos con dos tipos de aditivos para mezclas tibias con la misma reducción de temperaturas de las tibias sin aditivos. De la

misma manera, se evaluaron las propiedades reológicas para su comparación con las mezclas tibias elaboradas sin aditivos.

Las muestras de asfalto para los análisis reológicos fueron extraídas directamente de las mezclas de acuerdo a la norma ASTM D 1856 [9].

2.2 Materiales

En este trabajo se estudiaron dos asfaltos comerciales de Argentina, un convencional (CA30) y uno modificado con polímero (AM3). La Tabla 1 presenta sus principales características incluyendo penetración, punto de ablandamiento, Viscosidad a 60 °C y su grado PG de la norma Superpave ASTM D 6373 [10]. La Tabla 1 también muestra la temperatura de mezclado y compactación para las mezclas en calientes.

Se usaron dos aditivos químicos tensoactivos (A y B) para hacer las WMA más trabajables. Los aditivos tensoactivos reducen la tensión superficial del asfalto y disminuyen el ángulo de contacto con el agregado y también actúan como lubricantes mejorando la trabajabilidad de la mezcla.

Ambos aditivos se incorporaron al asfalto previamente a la elaboración de las mezclas. Para ello, el asfalto se calentó por dos horas en estufa a una temperatura que asegurara un ablandamiento suficiente del mismo (150 °C y 180 °C para CA30 y AM3 respectivamente). En estas condiciones, los aditivos fueron incorporados y mezclados con el asfalto por medio de un agitador.

Tabla 1. Propiedades de los asfaltos

Asfalto		CA30	AM3
Penetración a 25 °C	[dmm]	55	64
Punto de Ablandamiento	[°C]	51,8	95,5
Viscosidad a 60 °C	[Pa.s]	297,6	-
Recuperación elástica torsional	[%]	-	77,2
Grado de performance (PG)		64-16	70-22
Temperaturas de elaboración tradicionales	[°C]	160-150	175-165

2.3 Métodos de ensayo

2.3.1 Linear Amplitud Sweep (LAS)

El ensayo sigue los lineamientos dados en la AASTHO TP 101-14 y tiene por objeto determinar una medida de la resistencia al daño del asfalto frente a ciclos de carga con deformaciones crecientes. Se somete al asfalto en primera instancia a un barrido de frecuencias (0,3 a 30 Hz) a deformación constante $\gamma = 0,1$ %. Este primer paso, donde el asfalto no sufre daños ya que se encuentra dentro del rango lineal viscoelástico, sirve para obtener un parámetro α que se utiliza posteriormente para el análisis del daño como estipula la norma. Inmediatamente después del barrido de frecuencias se procede a someter al

material a ciclos de carga a una frecuencia de 10 Hz. El esquema de carga consiste en ciclos oscilatorios a deformación creciente a lo largo de los ciclos. La deformación γ se incrementa linealmente de 0,3 a 30 % durante 3100 ciclos de carga. Durante el ensayo se mide el módulo complejo del asfalto (G^*) y el ángulo de fase (δ).

La temperatura de ensayo normalmente es la temperatura media del ligante determinada en el grado PG de acuerdo a la norma. En este trabajo se utilizó una temperatura de 20 °C para todos los ensayos ya que la idea era comparar el comportamiento de los ligantes obtenidos de mezclas tibias con diferentes reducciones de temperaturas y el efecto de los aditivos.

La AASTHO TP 101-14 estipula que esta metodología se haga sobre los asfaltos que han sido envejecidos en RTFOT (IRAM 6839) y PAV (AASTHO R28). En este trabajo los ligantes fueron sometidos al envejecimiento natural que sufrieron producto del proceso de elaboración en sí mismo (temperaturas tradicionales o reducidas). No se realizó un envejecimiento de los ligantes en el PAV que simularía el envejecimiento en el camino para una vida útil de 10 - 15 años.

Los datos del ensayo se utilizan en la normativa para calcular el daño que se acumula en el asfalto y obtener parámetros de fatiga del material a partir de un modelo desarrollado por Kim et al [11]. Sin embargo en este trabajo para facilitar la comparación se utilizaron los datos de los ensayos de curva carga-deformación como se muestran en la figura 1. Estos se utilizaron para determinar la tenacidad (área bajo la curva) para el análisis comparativo. Sobre cada ligante se realizaron dos ensayos como mínimo.

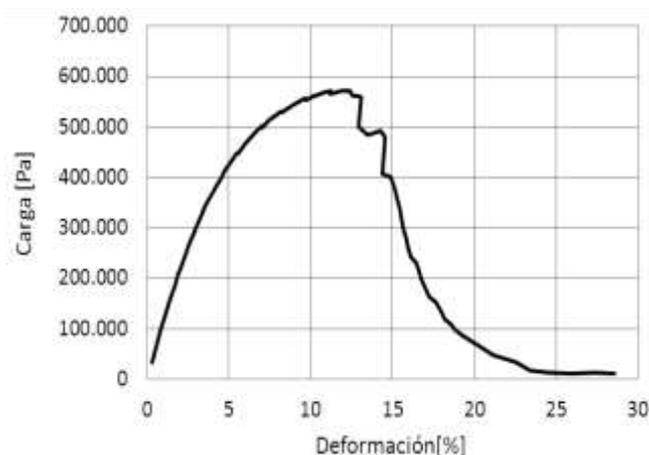


Figura 1. Curva de carga deformación obtenida en el barrido de deformaciones.

2.3.2 Mediciones de $G^* \cdot \sin \delta$.

A partir de los datos del ensayo LAS del primer barrido de frecuencias entre 0,3 y 30 Hz ($\omega = 1,88 - 188$ 1/s) se obtiene los valores de módulo complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) del asfalto. Estas medidas se utilizan para el análisis comparativo de la respuesta de los distintos ligantes (reducción de temperatura, con aditivos y sin aditivos). De la interpolación de los resultados se calculó el valor de $G^* \cdot \sin \delta$ para $\omega = 10$ rad/s para la temperatura de ensayo. De acuerdo al criterio SHRP la fatiga no se presenta si el asfalto cumple con un

valor reológico mínimo de $G^* \cdot \sin \delta$ que está relacionado con el total de la energía disipada por ciclo de carga [12].

3. Resultados

Las mezclas realizadas con tecnologías tibias deben ofrecer un buen desempeño y durabilidad. Esto es de suma importancia si se quiere que la ganancia medioambiental y mejores condiciones de trabajo obtenidas se reflejen en la realidad y no haya que levantar tempranamente un pavimento. Una de las formas de estimar el comportamiento de mezclas es a partir de evaluar ciertas propiedades reológicas de los ligantes de estas mezclas que se relacionan precisamente con el desempeño. En este trabajo se estudiaron dos asfaltos, uno convencional y uno modificado con polímeros, que se mezclaron con dos tipos de aditivos para mezclas tibias. Los mismos se extrajeron de mezclas elaboradas al efecto de manera tradicional (sin aditivos) y con diferentes reducciones de temperatura de elaboración (con y sin aditivos). Sobre estos asfaltos se evaluaron propiedades reológicas relacionadas a su resistencia fatiga. A continuación se muestran los principales resultados obtenidos.

En la figura 2 se observa los resultados del parámetro $G^* \cdot \sin \delta$ de los ligantes estudiados (con y sin aditivos) a diferentes temperaturas de elaboración. El $G^* \cdot \sin \delta$ se relaciona con el desempeño a fatiga. El criterio SHRP estipula que si el asfalto cumple con tener un $G^* \cdot \sin \delta < 5000$ kPa no se presentara fatiga en la mezcla para temperaturas mayores o iguales a la temperatura media del grado de desempeño. Este parámetro se mide sobre el ligante envejecido en RTFOT y PAV. Si bien a los asfaltos en este estudio les faltaría el envejecimiento en PAV desde un punto comparativo se puede utilizar las mediciones realizadas y observar los diferentes comportamientos. En primera instancia vemos que para los asfaltos sin aditivos la reducción de temperaturas de elaboración tiene un efecto diferente en cada asfalto. En el CA30 se observa como el $G^* \cdot \sin \delta$ de los ligantes disminuye con la reducción de temperaturas. Esto es un aspecto positivo ya que el asfalto tendrá un mejor comportamiento a fatiga. Ya en los asfaltos con aditivos con una reducción de 20 °C se observa que la incorporación de aditivo favorece el comportamiento a fatiga respecto a lo que se observa para el asfalto sin aditivos con la misma reducción de temperatura.

En el caso del asfalto AM3 vemos un aumento del parámetro $G^* \cdot \sin \delta$ con las menores temperaturas de elaboración. Probablemente entre en juego aquí un complicado balance entre el envejecimiento del asfalto base y la degradación de la red polimérica con el cambio de las temperaturas de elaboración. Por un lado las menores temperaturas hacen que el asfalto base se envejezca menos lo que daría un menor valor de $G^* \cdot \sin \delta$. Sin embargo esa menor temperatura permite una menor degradación de la red polimérica que le otorga a las temperaturas de ensayo mayor rigidez que la del asfalto elaborado a temperaturas tradicionales compensando la menor rigidez del ligante. Este tipo de comportamiento va a depender mucho del tipo de polímero, porcentaje de modificación y del tipo de asfalto base entre otras cosas. Es difícil inferir a partir de estos resultados un peor comportamiento del asfalto. Solo es distinto.

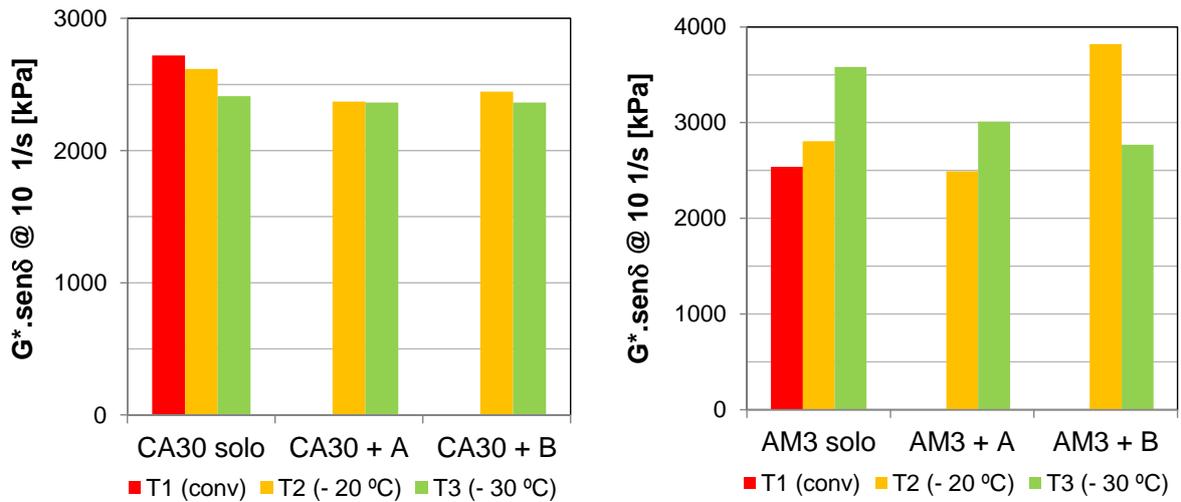


Figura 2. G*.senδ de los ligantes para $\omega = 10$ 1/s para T = 20 °C.

En la figura 3 se observan los resultados de G*.senδ del barrido de frecuencias para el asfalto CA30 sin aditivos tanto a temperatura tradicional como con las reducciones de 20 y 30 °C. Se observa que para las bajas frecuencias de carga, tránsitos lentos, la mezcla con reducción de la temperatura de elaboración de 20 y 30 °C tendría un mejor comportamiento a fatiga debido a los menores valores de G*.senδ. A altas frecuencia, tránsitos rápidos, se observa que los valores de G*.senδ tiende a ser similares por lo tanto el comportamiento a fatiga se espera sea similar.

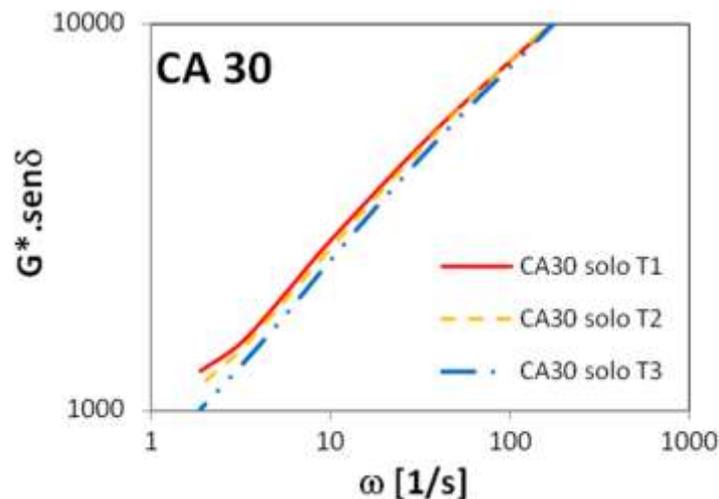


Figura 3. Resultados de G*.senδ para diferentes frecuencias del asfalto CA30 y AM3 sin aditivos a diferentes temperaturas de elaboración

En la figura 4 se observa los resultados de G*.senδ del barrido de frecuencias para el asfalto CA30 elaborado a 30 °C menos (T3) sin aditivo y con el aditivo A. Además se vuelcan los resultados para el CA30 T1, temperatura de elaboración tradicional, para comparación. Se observa allí como la incorporación del aditivo produce una disminución del parámetro G*.senδ, mejor comportamiento a fatiga, en todo el rango de frecuencia estudiado a diferencia de lo que ocurre sin el aditivo como ya fuera explicado en el párrafo anterior. En

el caso del aditivo B se produjo un comportamiento en el mismo sentido; mejorando el parámetro $G^* \cdot \text{sen} \delta$ en todo el rango de frecuencias pero no tan notable como el aditivo A.

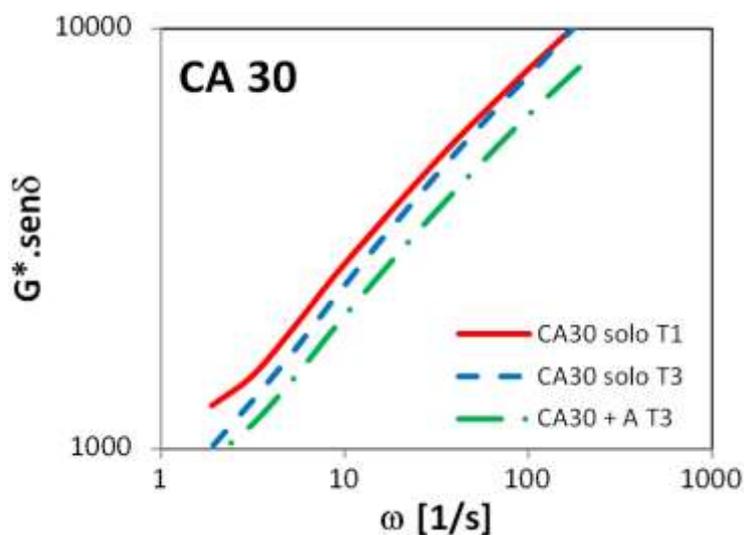


Figura 4. Resultados de $G^* \cdot \text{sen} \delta$ para diferentes frecuencias del asfalto CA30.

En la figura 5 se observan los resultados de $G^* \cdot \text{sen} \delta$ del barrido de frecuencias para el asfalto AM3 sin aditivos tanto a temperatura tradicional como con las reducciones de 20 y 30 °C. Se observa un aumento del parámetro $G^* \cdot \text{sen} \delta$ en todo el rango de frecuencia estudiado; menor para 20 °C de reducción y más marcado para 30 °C de reducción. Como ya se explicara anteriormente, las menores temperaturas hacen que el asfalto base se envejezca menos lo que debería generar un menor valor de $G^* \cdot \text{sen} \delta$. Sin embargo esa menor temperatura permite una menor degradación de la red polimérica que le otorga a las temperaturas de ensayo mayor rigidez que la del asfalto elaborado a temperaturas tradicionales dando lugar al posible aumento de los valores de $G^* \cdot \text{sen} \delta$.

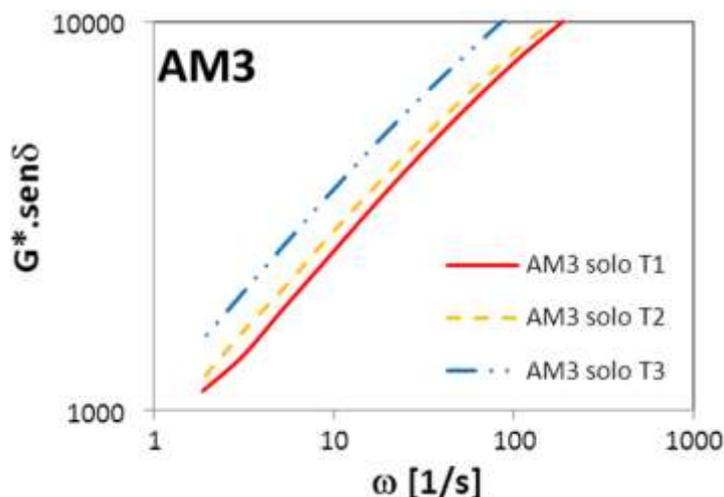


Figura 5. Resultados de $G^* \cdot \text{sen} \delta$ para diferentes frecuencias del asfalto AM3 sin aditivos a diferentes temperaturas de elaboración

En la figura 6 se observa los resultados de área bajo la curva de ensayo como la mostrada en la figura 1 que dan una idea de la tenacidad de cada ligante. La tenacidad es

posible analizarla desde el punto de vista de energía disipada. Una mezcla con mayor capacidad para disipar energía será capaz de resistir las cargas de tráfico sin disgregarse o fracturarse [13]. Por lo tanto cuanto mayor sea la tenacidad; mayor la energía requerida para fracturarla y mejor resistencia a fractura. Para el asfalto CA30 (figura 6 izquierda) se observa como en los asfaltos sin aditivos la reducción de temperatura de elaboración disminuye levemente su tenacidad por lo que las mezclas de las que provienen son más propensas a fracturar antes que la mezcla a temperaturas tradicionales. Se observa en la misma figura 6 izquierda como la incorporación de aditivos hace que los ligantes se comporten de manera similar a la mezcla elaborada a temperaturas tradicionales; salvo el caso del ligante CA30 + A T2. Cabe remarcar que las diferencias en tenacidad para este asfalto CA30 son muy leves. En el caso del asfalto AM3 se observa un más marcado cambio en la tenacidad a medida que disminuyeron las temperaturas de elaboración (ver figura 6 derecha). Esto se puede atribuir a un menor envejecimiento del asfalto base y menor degradación de la red polimérica que brinda un comportamiento más elástico necesitándose mayor energía de fractura para generarle un daño. Es decir los ligantes a menores temperaturas de elaboración ofrecen mayor resistencia a la fractura como es lógico. Por su parte la incorporación de aditivos parecería que ofrece mejor resistencia para uno de los aditivos cuando se reducen las temperaturas en 20 °C (aditivo B) mientras que el otro lo hace cuando se redujeron 30 °C la temperatura (aditivo A). No se puede tener una conclusión a partir de estos resultados.

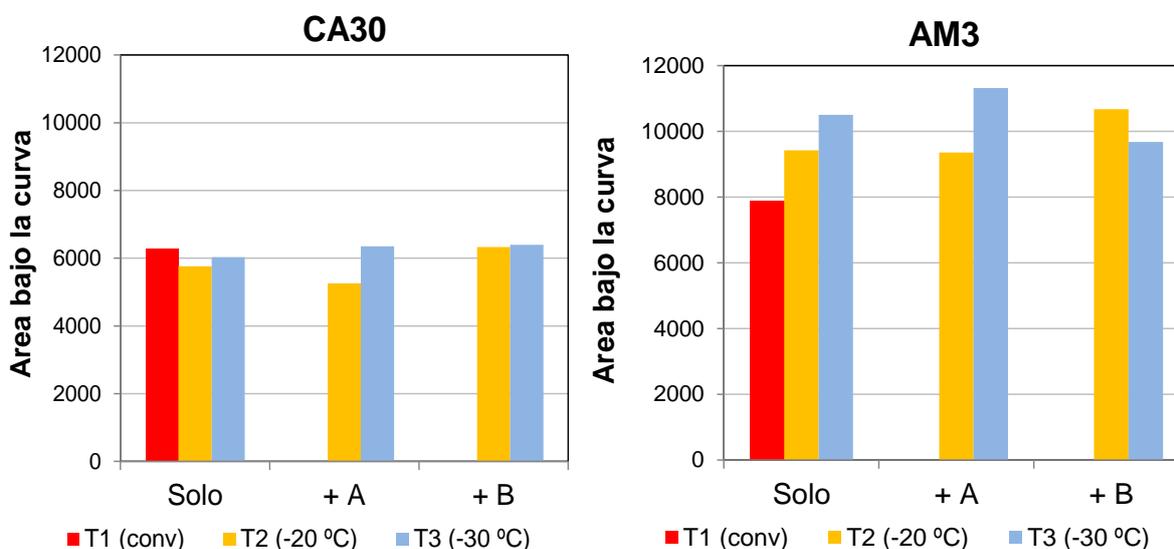


Figura 6. Resultados de "tenacidad" de los asfaltos estudiados.

Una cuestión que se observa claramente en los ensayos realizados es como el ligante modificado tiene una mayor tenacidad que el asfalto convencional como era lógico que sucediera, ver figura 7.

A manera de corolario es de destacar que las mediciones de propiedades reológicas son una herramienta que pone de manifiesto los cambios favorables o no que puedan tener los aditivo de mezclas tibias sobre el posible desempeño de las mezclas así como ayudar a definir cuanto es el nivel de reducción de temperaturas hasta el cual es posible materializar una mezcla tibia y que el aditivo tenga un impacto positivo.

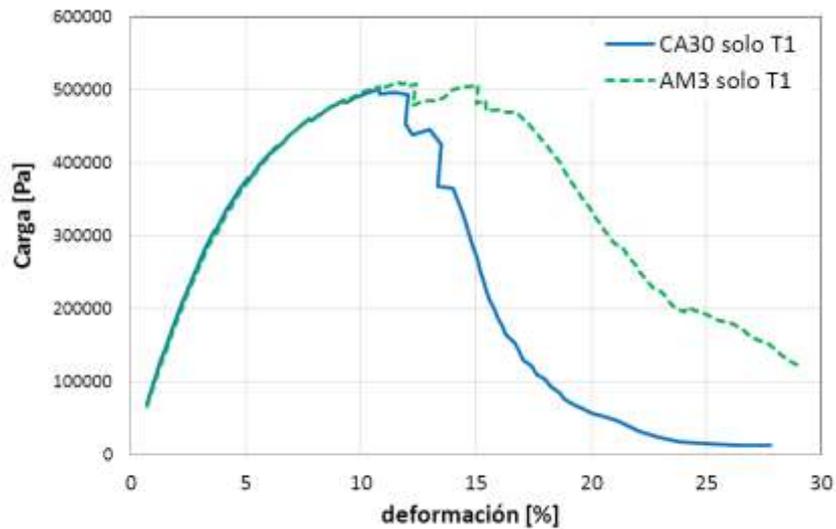


Figura 7. Curvas de carga – deformación del ensayo LAS para los asfaltos CA30 y AM3.

4. Conclusiones

Las mezclas tibias deben presentar desempeños aceptables como cualquier mezcla asfáltica. Las tendencias de investigación en ligantes asfálticos estudian propiedades reológicas que se relacionan con los modos de falla que se suscitan en el pavimento y un posible desempeño esperable de las mezclas asfálticas frente a estos. En este trabajo se estudiaron dos asfaltos, uno convencional y uno modificado con polímeros, que se mezclaron con dos tipos de aditivos para mezclas tibias. Los mismos se extrajeron de mezclas elaboradas al efecto de manera tradicional (sin aditivos) y con diferentes reducciones de temperatura de elaboración (con y sin aditivos). Sobre estos asfaltos se evaluaron propiedades reológicas relacionadas a su resistencia a fatiga con el ensayo de Linear Amplitud Sweep (LAS). A continuación se vuelcan las principales conclusiones obtenidas.

Se observa en carácter general que las mediciones de propiedades reológicas son una herramienta que pone de manifiesto los cambios favorables o no que puedan tener los aditivo de mezclas tibias sobre el posible desempeño de las mezclas.

Se encuentra que la reducción de temperaturas de elaboración puede traer aparejados problemas de durabilidad de la mezcla. A partir de los ensayos de LAS se observó que los asfaltos con aditivos recuperados de mezclas tibias mostraron resultados de tenacidad similares a los de los asfaltos extraídos de mezclas elaboradas a temperaturas tradicionales.

Se observó que la incorporación de aditivos modifica la reología de los ligantes cuando se evaluó el parámetro de fatiga $G^* \cdot \sin \delta$ en un barrido de frecuencia. En el asfalto convencional se observó que la incorporación de aditivo favorece el comportamiento a fatiga respecto a lo que se observa para el asfalto sin aditivos con la misma reducción de temperatura.

5. Referencias

1. D'angelo J., Harm E., Bartoszek J., Baumgardner G., Corrigan M., Cowser J., Harman T., Jamshidi M., Jones W., Newcomb D., Prowell B., Sines R., Yeaton B. (2008). Warm-mix asphalt: European practice FHWA report N° FHWA-PL-08-007.
2. Marcozzi R.G., Morea, F. (2011). Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas tibias. XVI CILA, Vol. 2, pp. 1362-1373.
3. Morea F., Marcozzi R., Castaño G. (2012). Rheological properties of asphalt binders with chemical tensoactive additives used in Warm Mix Asphalts (WMAs). *Construction and Building Materials*. 29:135-141.
4. Marcozzi R., Morea F., Jair M. (2013). Evaluación de los tramos de prueba realizados con mezclas asfálticas tibias. XVII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto.
5. Marcozzi R., Jair M., Morea F. (2015). Experiencias con mezclas asfálticas tibias. 10º Congreso de la Vialidad Uruguaya.
6. AASHTO Designation: TP 101-14. (2014). Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep.
7. Adhikari Sanjeev, Shen Shihui y You Zhanping (2009), Evaluation of fatigue models of hot-mix asphalt through laboratory testing. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2127, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 36-42
8. Morea F. (2015). Propiedades reológicas de fatiga y ahuellamiento de asfaltos recuperados de mezclas tibias (WAM). XVIII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto.
9. ASTM D 1856 (2003) Standard test method for recovery of asphalt from solution by Abson Method.
10. ASTM D 6373 (1999) Standard specification for performance grade asphalt binder. *J ASTM Int* 04.03:713–715.
11. Kim, Y., H. J. Lee, D. N. Little, and Y. R. Kim. A simple testing method to evaluate fatigue fracture and damage performance of asphalt mixtures. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 75, 2006, pp. 755–788.
12. D'Angelo John, Klutz Robert, Dongre Raj, Stephens Keith y Zanzotto Ludo (2007), Revision of the SUPERPAVE high temperature binder specifications: The multiple stress creep recovery test. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 76:123-162.
13. Noguera A.H., Miró R., (2011). Efecto de la tenacidad del asfalto en la resistencia a fatiga de las mezclas asfálticas. *Revista Ingeniería de Construcción* 26-2:224-239.