

IAG117-01-2013
INFLUENCIA DEL USO DE UN BIO-ASFALTO EN LAS
PROPIEDADES VISCO-EASTICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
RECICLADAS
DO USO DE BIOASFALTO NAS PROPRIEDADES VISCOELASTICAS
DE MISTURA ASFALTICA RECICLADA

Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D.
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Jorge Arturo Castro Ortiz
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
jorge.castroortiz@ucr.ac.cr

Resumen

La inclusión de material asfáltico reciclado (RAP) en cantidades cada vez mayores, se ha venido incrementando los últimos años, debido a distintos aspectos. La incorporación de RAP en altas dosificaciones enfrenta a la industria a nuevos retos desde el punto de vista de diseño, principalmente para determinar la influencia del RAP en las propiedades de desempeño de la mezcla asfáltica, especialmente por el efecto del rígido ligante asfáltico proveniente del RAP. Esta publicación resume la evaluación en laboratorio del impacto en el desempeño de mezclas asfálticas con altos contenidos de RAP provenientes de Manitoba-Canadá al usar un bio-rejuvenecedor, mediante los ensayos de daño por humedad y agrietamiento térmico y la determinación de las propiedades viscoelásticas de dichas mezclas. Mezclas preparadas con y sin rejuvenecedor fueron evaluadas mediante el ensayo de módulo dinámico (E^*) bajo varios ciclos de congelamiento-descongelamiento y el ensayo de esfuerzo termal de espécimen restringido (TSRST). La modelación viscoelástica generó gráficos de Cole-Cole que muestran un incremento en el módulo de pérdida al usar bio-asfalto. Más allá, se determinó que hay un incremento en la resistencia al daño por humedad al usar dicho aditivo al incrementarse la razón de módulo de almacenamiento versus módulo de pérdida. Adicionalmente, se determinó que dicho bioasfalto provoca una recuperación en las propiedades de resistencia al agrietamiento por baja temperatura.

Resumo

A inclusão de misturas asfálticas recicladas (RAP em Inglês), em quantidades cada vez maiores, tem vindo a aumentar nos últimos anos, devido à vários aspectos. A incorporação de RAP de altas dosagens enfrenta à indústria a novos desafios desde o ponto de vista de design, principalmente para determinar a influência do RAP nas propriedades de desempenho da mistura asfáltica, em particular o fato que o ligante asfáltico tornando-se mais viscoso no RAP. Este artigo resume a avaliação em laboratório do impacto no desempenho de misturas asfálticas com elevado teor de RAP da região de Manitoba, Canadá, quando foi utilizado um bio-rejuvenescedor chamado bio-asfalto, através de ensaios de dano por umidade e craqueamento térmico e a determinação das propriedades visco-elásticas distas misturas. As

misturas asfálticas preparadas com e sem rejuvenecedor foram avaliadas através do ensaio de módulo dinâmico (E^*) em vários ciclos de congelamento-descongelamento e o Teste de Espécies Contidas de Pressão Térmica (TSRST – Thermal Stress Restrained Specimen Test). A modelagem visco-elástica gerou gráficos Cole-Cole que mostram um aumento no módulo de perda usando bio-asfalto. Também, determinou-se que existe um aumento na resistência ao dano por umidade usando este aditivo, isto devido ao aumento da razão de armazenamento versus o módulo de perda. Além, determinou-se que o bio-asfalto causa uma recuperação nas propriedades de resistência à fissuração a baixa temperatura.

INTRODUCCIÓN

El RAP es la mezcla de asfalto y agregados creado a partir de un lote rechazado de una planta mezcladora en caliente o cuando una superficie existente de asfalto ha sido molida o removida por completo. Al usarse RAP, la durabilidad de la mezcla reciclada, su resistencia a fatiga y al agrietamiento térmico puede reducirse, induciendo un pobre desempeño del pavimento. Varios estudios han indicado que la adición de RAP en una mezcla asfáltica puede cambiar el comportamiento físico de la mezcla (Al-Qadi et al, 2012; McDaniel et al, 2000). Este incremento en la rigidez del ligante del RAP es la causa, presumiblemente, del incremento del módulo de la mezcla asfáltica.

El uso de agentes rejuvenecedores podría incrementar la durabilidad y el desempeño a bajas temperaturas de mezclas que contienen RAP sin poner en peligro el desempeño global de la mezcla. Esta investigación se enfoca en uno de estos aditivos bio-asfálticos llamado bio-asfalto, también vendido bajo el nombre de Hydrogreen desarrollado por Green Asphalt Technologies, LLC, como una alternativa a los rejuvenecedores de aceite aromáticos cancerígenos. Bio-asfalto es un tipo de asfalto producto de la combinación de extractos naturales de plantas reaccionados en distintos procesos para crear un potente dispersante asfáltico. Es derivado de resinas seleccionadas, ésteres y ácidos grasos que son 100% “verdes”, seguros, renovables y abundantes a nivel mundial (Elseifi et al, 2007). El grado de desempeño del asfalto puede ser reducido en un grado para tanto usos de bajo o alto contenido de ligante añadiendo bio-asfalto directamente a un ligante base (Green Asphalt Technologies, 2012). Ya que este aditivo reduce efectivamente la temperatura más baja a la cual el pavimento se agrieta, puede compensar uno de las principales preocupaciones del uso de mezclas con alto grado de RAP.

REVISIÓN DE LITERATURA Y OBJETIVO PRINCIPAL

El Departamento de Transporte de Florida (FDOT) construyó en 2009, dos secciones de prueba sobre la Interestatal 95 con 40% de RAP y 0,75% de bio-asfalto por peso de RAP usado (Green Asphalt Technologies, 2012). Las mezclas asfálticas en caliente (MAC) de las dos secciones fueron idénticas excepto que fueron mezcladas y compactadas a 132°C y 124°C para la sección uno y dos, respectivamente. Estas dos mezclas fueron comparadas con otras dos mezclas previamente construidas con otro aditivo para producir bio-asfalto. El análisis resultó en la no detección de diferencias significativas en las energías de compactación entre los bio-asfaltos estudiados. Las mezclas modificadas con el bio-asfalto estudiado en esta investigación no emitieron ningún humo azulado u olor y fue más cómodo para la cuadrilla de construcción.

En el año 2009, ensayos fueron completados en Connecticut para estudiar el proceso de mezcla y compactación usando dos agentes rejuvenecedores, el estudiado (R1) y otro

adicional (R2) (Green Asphalt Technologies, 2012). Las mezclas preparadas consistieron de aproximadamente 98% de RAP, 0.2 % de agente rejuvenecedor y 2% de tejas de asfalto recicladas (RAS). Aunque ambas mezclas tuvieron una buena compactación, la que contenía el aditivo (R2) mostró cantidades apreciables de humo azul y olor aceitoso. No existió humo detectable u olor en el modificador R1. En 2010, el Departamento de Transporte de la Ciudad de Nueva York también experimentó con el aditivo R1 con un 20% de RAP en dos proyectos de prueba. Del experimento se experimentó una reducción en la temperatura compactación de sin que se afrontaran problemas con las densidades in situ del pavimento. En 2011, el Departamento de Transporte de Texas realizó un ensayo usando 35% de RAP y 5% de RAS con el aditivo R1 (Green Asphalt Technologies, 2012). Especímenes compactados de MAC fallaron a 42626 pasadas en la prueba de la rueda de Hamburgo para alcanzar 1,25mm de deformaciones que excede el número mínimo de pasadas para cumplir la especificación (10000 ciclos).

El Centro Nacional para la Tecnología del Asfalto (NCAT) también estudio el efecto de bio-asfalto en mezclas del tipo RAP en Florida (Green Asphalt Technologies, 2012). Dos mezclas fueron ensayadas, una de control con un ligante con grado de flujo RA1000 y otra mezcla usando el mismo ligante con 35% RAP y 5% RAP mas 0,75% bio-asfalto por peso del combinado RAP/Ras. Fueron observadas resistencias similares en deformación y TSR para ambas mezclas. El estudio recomendó el uso de 0,75% de bio-asfalto para mezclas RAP para cumplir los requerimientos de FDOT. Recientemente, Asphalt & Wax Innovations, LLC (Loria et al, 2011), adoptó una evaluación para determinar el potencial incremento del grado de desempeño que podría ser alcanzado usando bio-asfalto cuando se incorpora con diferentes porcentajes de RAP y RAS. El estudio que determinó que el bio-asfalto tiene la habilidad de dar de vuelta la flexibilidad a bajas temperaturas al ligante virgen PG62-22 a razones de 40% a 60% de RAP/RAS. El estudio logró un mejoramiento de uno de los tres grados de ligante, en el grado de desempeño de alta temperatura. Adicionalmente, la mayoría de diseños RAP/RAS alcanzan el criterio de -22°PG.

El limitado número de estudios en la literatura muestra beneficios potenciales de usar bio-asfalto con mezclas RAP. Sin embargo, ninguno de los estudios ilustró el impacto del uso de bio-asfaltos en las propiedades viscoelásticas de las mezclas asfálticas y como esas propiedades están siendo influenciadas por el daño por humedad. Este estudio apunta a la evaluación de la efectividad de usar un agente bio-rejuvenecedor en mezclas con RAP de Manitoba, Canadá, como un medio para evitar algún posible daño por humedad o agrietamiento térmico que pueden producirse en un ambiente tan húmedo y frío. Este estudio va a observar el efecto de un bio-asfalto en el módulo de almacenamiento y de pérdida en mezclas que contienen entre 15% a 50% de RAP, en función del daño inducido por humedad. Además, se evaluará el efecto del bio-asfalto en las propiedades de agrietamiento térmico de las mezclas asfálticas.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Todas las mezclas fueron diseñadas usando el método de Diseño de Mezcla de Marshall según dicta el Manual de Métodos de Diseño de Mezcla MS-2 del Instituto de Asfalto siguiendo las especificaciones estándar de Infraestructura y Transporte de Manitoba (MIT). Las mezclas con bio-asfalto fueron diseñadas con el mismo contenido de ligante que las mezclas de control correspondientes. Las cuatro mezclas sin bio-asfalto han sido colocadas en secciones de pavimento de la autopista provincial Trunk Highway 8 en el 2009 en Manitoba, Canadá para evaluar la factibilidad usando MAC con un contenido alto de RAP en las regiones de clima frío. Las mezclas de laboratorio y producidas en planta de distintas

secciones del campo se han evaluado extensivamente respecto de su desempeño y propiedades mecánicas y los resultados se han publicado previamente (Loría et al, 2011; Hajj et al, 2012). Las secciones de campo también han sido monitoreadas por el Western Research Institute (WRI) para desempeño de pavimento. El bio-asfalto fue adicionado en una razón de 1,5% del peso del material RAP. Dos porcentajes de RAP, 15 y 50%, fueron usados para la mezcla con bio-asfalto. Especímenes de control usando 0, 15%, 50% y 100% de RAP sin bio-asfalto fueron preparados para propósitos de comparación del desempeño. Dos ensayos de laboratorio se utilizaron en este estudio: (1) módulo dinámico y (2) el ensayo de esfuerzo de tensión de espécimen restringido a baja temperatura (TSRST). La notación que se empleará a través del resto del documento denotará si la muestra contiene o no bio-asfalto, el porcentaje de RAP usado, el grado de ligante, y el número de ciclos de congelamiento y descongelamiento aplicados.

MÓDULO DE ALMACENAMIENTO Y DE PÉRDIDA A MÚLTIPLES CICLOS DE CONGELAMIENTO Y DESCONGELAMIENTO USANDO EL MODELO 2S2P1D

Uno de los pocos modelos físicos disponibles que tiene la capacidad de determinar las propiedades elásticas y viscosas por aparte es el modelo 2S2P1D (2 resortes, 2 parabólicas, 1 amortiguador) (ASTM, 2003). El modelo consiste en modificar el modelo Huet-Sayegh (Sayegh, 1965) adicionando un amortiguador lineal en serie con dos elementos parabólicos y resortes de rigidez, E_{∞} - E_0 .

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_{\infty} - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (1)$$

Donde:

i: número complejo definido por $i^2 = -1$

ω : 2π *frecuencia, velocidad angular

E_0 : módulo estático cuando $\omega \rightarrow 0$

E_{∞} : límite de módulo complejo cuando $\omega \rightarrow \infty$

h, k: exponentes tales que $1 > h > k > 0$

δ : constante adimensional

β : constante adimensional, $\beta = \eta \cdot \tau^{-1} / (E_{\infty} - E_0)$; cuando $\omega \rightarrow 0$, entonces $E^*(i\omega\tau) \sim E_0 + i\omega\eta$

τ : característica de tiempo, atribuida al Principio de Superposición de Tiempo Temperatura: $\tau(T) = aT(T) \cdot \tau_0$

$aT(T)$: el factor de ajuste de temperatura T

$\tau_0 = \tau(T_r)$ determinado a la temperatura de referencia T_r

El factor de ajuste de la temperatura T, puede ser determinado en términos de la ecuación de Williams-Landel-Ferry (WLF) para materiales asfálticos (eq. 2). Una T_r de 25°C fue seleccionada para el estudio.

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)} \quad (2)$$

Para determinar el comportamiento viscoelástico del material considerado a una temperatura dada se requieren siete constantes (δ , k, h, E_{∞} , E_0 , β y τ_0). El Principio de Superposición Tiempo-Temperatura (TTSP) contiene solamente el parámetro τ , dependiente de la temperatura. Basado en el TTSP, se calculan las dos constantes adicionales C1 y C2 (calculadas a la temperatura de referencia T_r elegida igual a 25°C) de la ecuación 2. Después de determinar las nueve constantes de cada mezcla, se generan los gráficos de Cole-Cole, que representan la relación entre el módulo de pérdida (viscoso) (E'') y el módulo de almacenamiento (elástico) (E'). El diagrama Cole-Cole, incluye el papel de cada elemento del modelo 2S2P1D, que describe el comportamiento lineal visco-elástico de la mezcla asfáltica

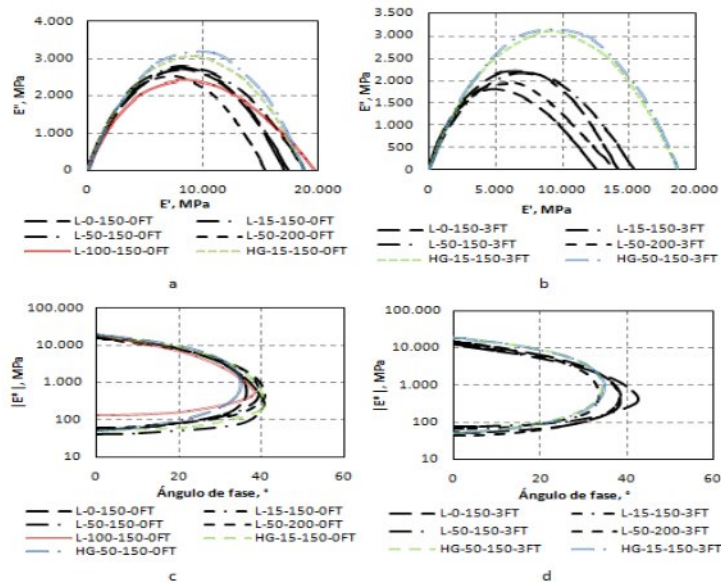
(15). La prueba de módulo dinámico fue aplicada en todas las mezclas de acuerdo con AASHTO TP 62-97 (13). Las mezclas fueron ensayadas tanto en estado condicionado y sin condicionar. Los especímenes con humedad condicionada fueron tratados con tres ciclos de congelamiento y descongelamiento (F-T) después de alcanzar un 75% de saturación. La Figura 1a muestra el análisis del diagrama Cole-Cole para todas las mezclas a 0 F-T. Las siguientes observaciones pueden ser realizadas:

- Las mezclas con RAP de 15 y 50% sin bio-asfalto mostraron menores valores de módulos de pérdida (E''). Los módulos de pérdida decaen al incrementar el contenido de RAP. Esto es debido al efecto de incremento de rigidez de los materiales con RAP.
- Ambas mezclas con 15 y 50% de RAP usando bio-asfalto produjeron propiedades visco-elásticas similares. La mezcla con 50% de RAP con bio-asfalto tuvo valores menores de módulo de pérdida comparados con la mezcla de 15% RAP con bio-asfalto.
- Las propiedades visco-elásticas de las mezclas con materiales vírgenes y con el 15% de RAP tuvieron respuestas similares. Usar un ligante menos rígido disminuyó la rigidez de la mezcla al reducir tanto el módulo de almacenamiento como el de pérdida.
- En general, el máximo módulo de pérdida ocurre en todas las mezclas sin bio-asfalto y usando PG58-28.
- Mezclas con 15 y 50% de RAP mostraron los mayores módulos de pérdida y valores similares de módulo de almacenamiento comparadas a las mezclas con 50% RAP y PG58-28

Por lo tanto, se determina que el uso de bio-asfalto incrementa el módulo de pérdida debido al proceso rejuvenecedor del ligante del RAP sin poner en peligro el módulo de almacenamiento de la mezcla. La Figura 1b muestra el análisis del diagrama Cole-Cole para las mezclas después de 3 ciclos F-T. Con base en lo anterior, los siguientes hallazgos pueden ser comentados:

- Las propiedades visco-elásticas representadas por el módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida de las mezclas con 15 y 50% de RAP usando bio-asfalto después de tres ciclos F-T fueron prácticamente los mismos que los que no tuvieron ciclos F-T. Figura 1a.
- Todas las mezclas después de ciclos F-T siguen una tendencia similar a las mezclas sin ciclos F-T, excepto la mezcla con 50% RAP. Ambos módulos de almacenamiento y de pérdida de la mezcla con 50% RAP usando PG52-34 son más altos que la mezcla con 50% RAP usando PG 58-28.
- La diferencia entre el módulo de almacenamiento de la mezcla virgen y con 15% RAP se incrementa después de 3 ciclos F-T. La Figura 1b también ilustra que el módulo de almacenamiento y de pérdida de las mezclas RAP usando bio-asfalto son significativamente mayores que aquellas sin bio-asfalto.

Figura 1. (a) Diagrama Cole-Cole para 0 ciclos F-T, (b) Diagrama Cole-Cole para 3 ciclos F-T, (c) Diagrama Black para 0 ciclos F-T, and (d) Diagrama Black para 3 ciclos F-T



Las figuras 1c y 1d muestran las relaciones entre el ángulo de fase y el módulo dinámico de las mezclas asfálticas antes y después de 3 ciclos F-T. El 15% y 60% de las mezclas sin bio-asfalto y con PG 58-28 exhibieron los mayores ángulos de fase. Esto es debido al incremento de la rigidez introducido por el ligante del RAP. El efecto de bio-asfalto en la resistencia de la mezcla al daño por humedad fue evaluado usando dos distintas razones de módulos: la razón de módulo de almacenamiento (SMR) y la razón de módulo de pérdida (LMR). SMR representa la razón del máximo valor del módulo de almacenamiento después de 3 ciclos F-T sobre el máximo valor del módulo de almacenamiento a cero ciclos F-T, obtenidos a partir del diagrama Cole-Cole. LMR representa la razón entre el valor máximo del módulo de pérdida a 3 ciclos F-T y el valor máximo del módulo de pérdida a cero ciclos F-T obtenidos del diagrama Cole-Cole.

En general, al no usar bio-asfalto, el SMR y LMR de las mezclas con 15% de RAP y PG58-38 exhibieron una caída significativa en sus valores SMR y LMR. Añadir bio-asfalto a las mezclas con 15% y 50% de RAP incrementó significativamente los valores de SMR y LMR para alcanzar casi un 100% en ambos casos. Adicionalmente, no fueron encontradas diferencias significativas en los valores de SMR y LMR entre las mezclas con 15% y 50% de RAP cuando el bio-asfalto fue usado. En general, los datos indican que el bio-asfalto puede mejorar la resistencia de las mezclas con RAP al daño por humedad sin el uso de otro ligante mas blando.

PROPIEDADES TÉRMO-VISCOELÁSTICAS USANDO EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION DE ESPECIMEN RESTRINGIDO A BAJA TEMPERATURA

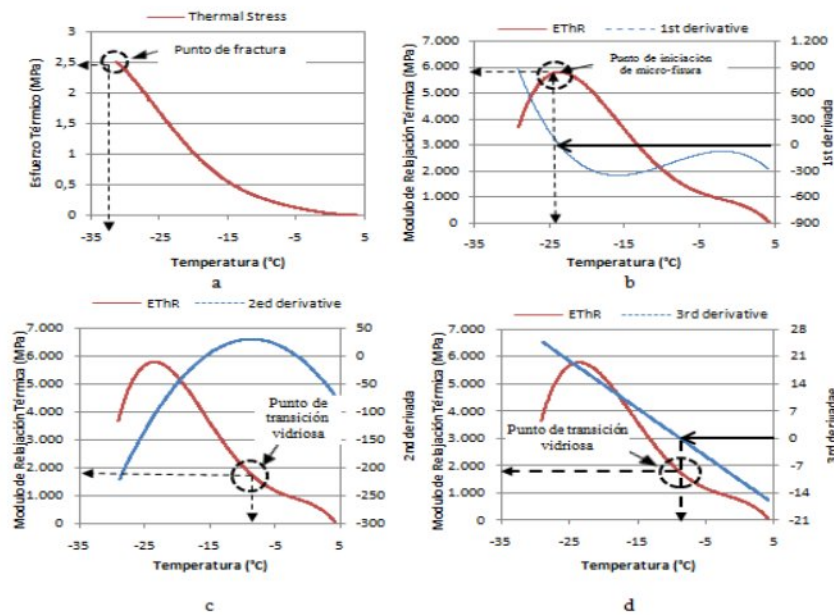
Las propiedades de la mezcla asfáltica para baja temperatura se pueden identificar de acuerdo con las tres etapas mostradas en la Figura 2, como un ejemplo ilustrativo, y definidas abajo.

- Etapa de transición vítrea: esta etapa se puede definir por dos parámetros, la transición vítrea de temperatura y la transición vítrea de módulo. Esto ocurre cuando la razón de curvatura del módulo de relajación térmica se acerca a cero (Figuras 2c y 2d).
- Etapa de iniciación de micro-fisura: en esta etapa ocurre una micro-fisura en el espécimen debido a un esfuerzo térmico inducido. Se pueden definir por tres parámetros: temperatura de iniciación de micro-fisura (MCIT), módulo de iniciación de micro-fisura (MCIM), y

esfuerzo de iniciación de micro-fisura (MCIS). El MCIM es identificado como el valor máximo del módulo de relajación térmica. La temperatura correspondiente al módulo de relajación térmica máximo se define como MICT y su esfuerzo correspondiente a esa temperatura es definido como MICS (Figura 2b).

- Etapa de fractura: el espécimen se quiebra debido a la propagación de la micro-fisura debido al esfuerzo térmico. Se puede definir por dos parámetros: la fractura por temperatura o la fractura por esfuerzo. El máximo valor de esfuerzo es definido como el esfuerzo de fractura mientras la temperatura de fractura es obtenida cuando el esfuerzo de fractura ocurre.

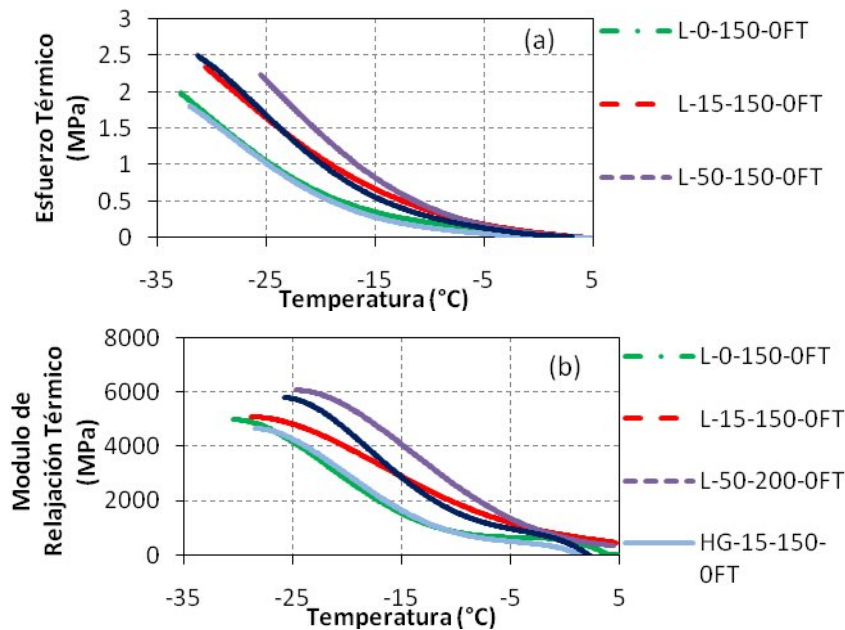
Figura 2: Propiedades mejoradas de agrietamiento a baja temperatura de mezcla asfáltica



En este estudio, el TSRST fue realizado en especímenes en forma de viga (50,8 x 50,8 x 254 mm) envejecidos a largo plazo, sin condicionar. El TSRST fue realizado para cada mezcla asfáltica en tres réplicas. El envejecimiento de la mezcla se realizó según AASHTO R30 para envejecimiento a largo plazo de MAC. La Figura 3 ilustra la composición del esfuerzo térmico (Figura 3a) y el módulo de relajación térmica calculado para varias mezclas asfálticas (Figura 3b). La Figura 3 muestra que la composición del esfuerzo térmico aumenta y el material se vuelve más rígido al aumentar la cantidad de RAP en la mezcla (Figuras 3a y 3b). El uso de bio-asfalto disminuye el esfuerzo térmico y el módulo de relajación térmica, en comparación con el correspondiente control de muestras. Además, las muestras con 15% y 50% de RAP usando bio-asfalto tienen similar la composición de esfuerzos térmicos y el módulo de relajación térmica hasta el 0% y 15% en mezclas con RAP sin el uso de bio-asfalto, respectivamente.

Las propiedades determinadas a baja temperatura para las mezclas estudiadas muestran que agregar RAP a una mezcla virgen aumenta su esfuerzo de fractura, su módulo de iniciación de la micro-fisura, y el módulo de transición vítrea. Además, disminuye la temperatura de agrietamiento, la temperatura de iniciación de micro-fisura y, la temperatura de transición vítrea.

Figura 3: (a) Composición del esfuerzo térmico, y (b) módulo de relajación térmico de TSRST



Al agregar bio-asfalto, se restauran las propiedades de temperaturas bajas de las mezclas asfálticas significativamente. Se observó que al agregar bio-asfalto se suavizan las mezclas y disminuye el esfuerzo de fractura, el esfuerzo de micro-fisuramiento, el módulo de micro-fisuramiento, y el módulo de transición vítrea.

CONCLUSIONES

Una evaluación extensiva en laboratorio fue conducida para determinar el efecto de un bio-asfalto en mezclas asfálticas con un contenido de RAP hasta el 50%. El impacto del contenido del RAP y del bio-asfalto en el daño por humedad y agrietamiento térmico de las mezclas asfálticas en caliente fue evaluado usando avanzadas técnicas de análisis. Basados en los resultados de los datos generados en el estudio, se puede concluir lo siguiente:

- Análisis de Cole-Cole mostraron que los valores del módulo de pérdida (E'') con bio-asfalto fueron significativamente mayores comparados con las mezclas vírgenes. Además, el desempeño de la mezcla con 50% RAP y bio-asfalto, fue similar a la mezcla con 15% RAP. Por lo tanto, mezclas con altos porcentajes de RAP (hasta 50%) pueden ser usadas con bio-asfalto sin sacrificar el desempeño de la mezcla.
- La adición de bio-asfalto a las mezclas con RAP mejoró su resistencia al daño por humedad después de 3 ciclos de congelamiento-descongelamiento. Las mezclas con bio-asfalto exhibieron valores del módulo de almacenamiento y del módulo de pérdida significativamente mayores que las mezclas sin bio-asfalto.
- Para el ensayo TSRST, la adición de bio-asfalto restauró las propiedades de baja temperatura de las mezclas con RAP. Una reducción del módulo de relajación térmica se observó relacionado con un cambio de la temperatura de fractura, la temperatura de

inicialización del micro fractura y la temperatura de transición vítrea hacia el lado más frío

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. 30th Edition, Washington, D.C., 2010.
- American Society of Testing and Materials (ASTM) Designation D 5404, "Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator", 2003.
- Al-Qadi, I., Aurangzeb, Q., Carpenter, S., Pine, W., Trepanier, J. Impact of High Rap Content on Structural and Performance Properties of Asphalt Mixtures. Research Report FHWA-ICT-12-002, Illinois, June 2012.
- Di Benedetto, H., Olard, F., Sauzéat, C., Delaporte, B., Linear Viscoelastic Behavior of Bituminous Materials: From Binders to Mixes, Road Materials and Pavements Design, 2004, pp.163-202.
- Elseifi, M., Mohammad, L., Cooper, S., Laboratory Evaluation of Asphalt Mixtures Containing sustainable Technologies. AAPT, Florida, 2011, Vol. 80, pp. 227-254.
- Green Asphalt Technologies LLC. bio-asfalto and PER High RAP and Warm-Mix Asphalt Solutions. Consultado el 21 de Julio, 2012
<http://www.engineeredadditives.com/images/bio-asfaltoRAP&PERHighRap&WarmMixAsphaltSolutions.pdf>
- Hajj, E. Y., Sebaaly, P. E., and Shresta, R. Laboratory Evaluation of Mixes Containing Recycled Asphalt Pavement (RAP). International Journal of Road Materials and Pavements Design, RMPD, Vol. 10, Issue 3, 2009, pp. 495-518.
- Hajj, E., Loria, L., Sebaaly, P., Estimating Effective Performance Grade of Asphalt Binders in High Rap Mixtures Using Different Methodologies: Case Study. Transportation Research Board, Washington D.C., 2012. In Press.
- Loria, L., Hajj, E., Sebaaly, P., Barton, M., Kass, S., Liske, T., Performance Evaluation Of Asphalt Mixtures With High Rap Content. Transportation Research Record, No. 2208, Washington, D.C., 2011, pp. 72-81.
- McDaniel, R.S., Soleymani, H., Anderson, R.M., Turner, P., and Peterson, R. Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mixture Design Method. NCHRP Final Report (9-12). Transportation Research Board, Washington, DC. 2000.
- Naidoo, Prem and Terry Naidoo. Hydrogreen the Natural Asphalt Solution." WMA Technical Working Group Meeting. 2007. Consultado el 21 de Julio, 2012
http://76.12.53.242/submissions/57_20080101_Prem%20Naidoo%20-%20Akzo%20Nobel%20Rediset%20WMX.pdf
- Naidoo, T. Effect of bio-asfalto/Hydrogreen Bio-Rejuvenator on The Performance Grade of RAP & RAS Asphalt Binder, Asphalt & Wax Innovations, LLC, July 2012.
- National Asphalt Pavement Association, NAPA. Recycling Hot Mix Asphalt Pavements Information Series 123. Lanham, MD, 2007.

Sayegh, G., Variation des modules de quelques bitumes purs et enrobés bitumineux. Thèse de doctorat d'ingénieur, Faculté des Sciences de l'Université de Paris, June 1965. 74p.

Shu, X., Huang, B., and Vukosavljevic, D. Laboratory Evaluation of Fatigue Characteristics of Recycled Asphalt Mixture. *Journal of Construction and Building Materials* Vol. 22, 2008, pp.1323–1330.

Solaimanian, M., and Tahmoressi, M. Variability Analysis of Hot-Mix Asphalt Concrete Containing High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of the Transportation Research Board* 1543, 1996, pp. 89-96.

Stroup-Gardiner, M., Chadbourn, B., Newcomb, D., Babbitt, Minnesota: Case Study of Pretreated Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete. *Transportation Research Record*, No. 1530, Washington, D.C., 2007, pp. 34-42.