

**117-1-13**

## **EFECTO DEL USO DE BIOASFALTO EN LAS PROPIEDADES VISCOELASTICAS DE MEZCLA 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 llamado BituTech RAP, 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 BituTech RAP. 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-rejuvenecedor chamado BituTech RAP, 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 BituTech RAP. 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**

Los RAP son 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. La durabilidad de la mezcla y la resistencia a fatiga y 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 modulo 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 BituTech RAP, también vendido bajo el nombre de Hydrogreen desarrollado por Green Asphalt Technologies, LLC, como una alternativa a los rejuvenecedores de aceite aromáticos cancerígenos. BituTech RAP es la combinación única de extractos naturales de plantas reaccionados en distintos procesos para crear un potente dispersante asfáltico. BituTech RAP es derivado de resinas seleccionadas, esteroides y ácidos grasos que son 100% “verdes”, seguros, renovables y abundantes a nivel mundial (Elseifi et al, 2007). El grado de desempeño puede ser reducido en un grado para tanto un uso bajo o alto del ligante añadiendo BituTech 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 BituTech RAP por peso de RAP usado (Green Asphalt Technologies, 2012). Las mezclas de las dos secciones fueron idénticas excepto que la HMA fue mezclada y compactada 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 Hydrolene. No existían diferencias significativas en compactación entre BituTech RAP y Hydrolene. Las Mezclas BituTech RAP no emitieron ningún humo azulado u olor y fue más cómodo para la cuadrilla de construcción.

En 2009, ensayos fueron completados en Connecticut para estudiar el proceso de mezcla y compactación usando dos agentes rejuvenecedores: Hydrolene y BituTech RAP (Green Asphalt Technologies, 2012). Las mezclas preparadas consistieron de aproximadamente 98% de RAP, 0,2 % de agente rejuvenecedor y 2% de tejas de asfalto (RAS). Mientras ambas mezclas tuvieron buena compactación, la que contenía Hydrolene mostro cantidades apreciables de humo azul y olor aceitoso. No existió humo detectable u olor en el BituTech RAP. En 2010, el Departamento de Transporte de la Ciudad de Nueva York también experimentó con BituTech RAP con un 20% de RAP en dos proyectos de prueba. Una reducción en la temperatura de compactación fue observada 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 BituTech RAP (Green Asphalt Technologies, 2012). Especímenes compactados de HMA 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 estudió el efecto de BituTech RAP en mezclas RAP en Florida (Green Asphalt Technologies, 2012). Dos mezclas fueron probadas, una de control con un ligante con grado de flujo RA1000 y otra mezcla usando el mismo ligante con 35% RAP y 5% RAS mas 0,75% BituTech RAP 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 BituTech RAP 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 BituTech RAP cuando se incorpora con diferentes porcentajes de RAP y RAS. Fue observado que BituTech RAP tiene la habilidad de dar flexibilidad a bajas temperaturas de vuelta al ligante virgen PG62-22 a razones de 40% a 60% de RAP/RAS. Un mejoramiento de uno de los tres grados de ligante fue alcanzado 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 BituTech RAP con mezclas RAP. Sin embargo, ninguno de los estudios ilustraron el impacto de BituTech RAP 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 el agente bio-rejuvenecedor BituTech RAP con 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 BituTech RAP en el modulo de almacenamiento y de pérdidas de una mezcla de 15% a 50% de RAP como función del daño inducido por humedad. Además, el efecto de BituTech RAP con las propiedades de agrietamiento térmico de las mezclas asfálticas a evaluar. Un análisis de costo asociado al uso de BituTech RAP y materiales RAP también será presentado.

## **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 BituTech RAP tienen el mismo contenido de ligante que las mezclas de control correspondientes. Las cuatro mezclas sin BituTech RAP han sido usadas en secciones de pavimento de la autopista Provincial Trunk Highway 8 en el 2009 en Manitoba, Canadá para evaluar la factibilidad usando Mezclas Asfálticas en Caliente (HMA) con un contenido alto de RAP en las regiones de clima frío. Las mezclas de laboratorio o producidas en planta de distintas secciones del campo se han evaluado extensivamente para desempeño y propiedades mecánicas y los resultados se han publicado en otra parte (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 BituTech RAP 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 BituTech RAP. Especímenes de control usando 0, 15%, 50% y 100%

de RAP sin BituTech RAP fueron preparados para propósitos de comparación de desempeño. Dos pruebas se utilizaron en este estudio: (1) módulo dinámico complejo y (2) prueba de espécimen con esfuerzo térmico restringido (TSRST). La notación usada a través de el resto de documento denotará si la muestra esa con o sin BituTech RAP, el porcentaje de RAP usado, el grado de ligante, y el número de ciclos de congelado y descongelado aplicados.

## MODULO DE ALMACENAMIENTO Y DE PERDIDA A MULTIPLES CICLOS DE CONGELAMIENTO Y DESCONGELAMIENTO USANDO EL MODELO 2S2P1D

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

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

Donde:

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

$\omega$ :  $2\pi$ \*frecuencia, la pulsación

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

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

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

$\delta$ : constante adimensional

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

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

$a_T(T)$ : el factor de cambio de temperatura T

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

El factor de cambio 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.

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

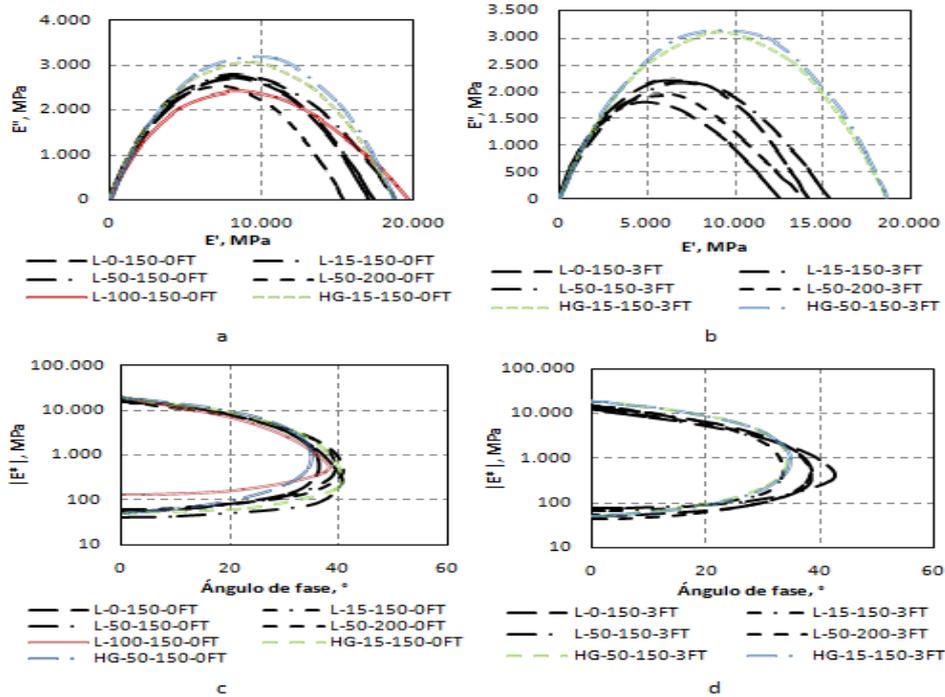
Siete constantes ( $\delta$ , k, h,  $E_{\infty}$ ,  $E_0$ ,  $\beta$  y  $\tau_0$ ) se requieren para determinar el comportamiento viscoelástico del material considerado a una temperatura dada. El Principio de Superposición Temperatura Tiempo (TTSP) sostiene solamente el  $\tau$  parámetro dependiente de la temperatura. Sí el TTSP sostiene, las dos constantes adicionales  $C_1$  y  $C_2$  (calculadas a la temperatura de referencia  $T_r$  elegida igual a 25°C) de la ecuación 2 son necesarias. Después de determinar las nueve constantes de cada mezcla, los gráficos de Cole-Cole, que representan la relación entre el modulo de pérdida (viscoso) ( $E''$ ) y el modulo de almacenaje (elástico) ( $E'$ ), son generados. En el diagrama Cole-Cole, el papel de cada elemento del modelo 2S2P1D que describe el comportamiento lineal visco elástico de la mezcla asfáltica (15). La prueba de modulo dinámico fue aplicada en todas las mezclas de acuerdo con AASHTO TP 62-97 (13). Las mezclas fueron ensayadas tanto en estado de humedad acondicionado e inalterado. Los especímenes con humedad acondicionada 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 RAP de 15 y 50% sin BituTech RAP mostraron menores valores de módulos de pérdida ( $E''$ ). Los módulos de pérdida decae al incrementar el contenido de RAP. Esto es debido al efecto de incremento de rigidez de los materiales RAP.
- Ambas mezclas de 15 y 50% de RAP usando el aditivo BituTech RAP produjeron propiedades visco elásticas similares. La mezcla 50% RAP con BituTech RAP tuvo valores menores de modulo de perdida comparados con la mezcla de 15% RAP con BituTech RAP.
- Las propiedades visco elásticas de las mezclas con materiales vírgenes y con el 15% de RAP tuvieron respuestas similares. Usar un ligante menos rígido disminuyo la rigidez de la mezcla que redujo tanto el modulo de almacenamiento como el de pérdida de la mezcla.
- En General, el máximo modulo de perdida para todas las mezclas sin BituTech RAO y usando PG58-28 fueron idénticas.
- Mezclas con 15 y 50% de RAP mostraron los mayores módulos de perdidas y valores similares de modulo de almacenamiento comparadas a as mezclas con 50% RAP y PG58-28

Estos descubrimientos indican que usar BituTech RAP incrementa el modulo de perdida debido al proceso rejuvenecedor del ligante RAP sin poner en peligro el modulo de almacenamiento de la mezcla. La Figura 1b muestra el análisis del diagrama Cole-Cole para las mezclas después de 3 ciclos F-T. Los siguientes descubrimientos pueden ser comentados:

- Las propiedades visco elásticas representadas por el modulo de almacenamiento y el modulo de pérdida de las mezclas con 15 y 50% RAP usando BituTech RAP 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 modulo 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 modulo de almacenamiento y de pérdida de las mezclas RAP usando BituTech RAP son significativamente mayores que aquellas sin BituTech RAP.

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



Figuras 1 c y d muestran las relaciones entre el Ángulo de fase y el módulo dinámico de mezclas asfálticas antes y después de 3 ciclos F-T. El 15 y 60% de las mezclas sin BituTech RAP y con PG 58-28 exhibieron los mayores ángulos de fase. Esto es debido al incremento de la rigidez introducido por el ligante RAP. El efecto de BituTech RAP 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, sin BituTech RAP, el SMR y LMR de las mezclas 15% RAP y PG58-38 exhibieron una caída significativa en sus valores SMR y LMR. Añadir BituTech RAP a las mezclas 15 y 50% RAP incremento significativamente los valores de SMR y LMR para alcanzar casi 100%. Además, no fue encontrada alguna diferencia significativa en los valores de SMR y LMR entre el 15 y 50% RAP cuando el BituTech RAP fue usado. En General, los datos indican que BituTech RAP puede mejorar la resistencia de las mezclas RAP al daño por humedad sin el uso de otro ligante mas blando.

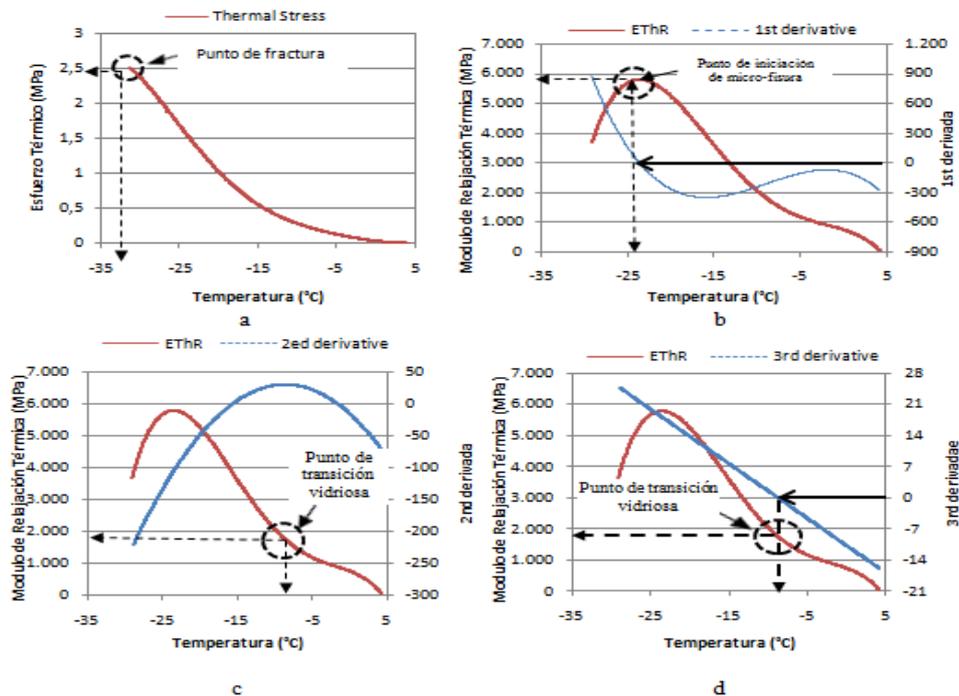
### PROPIEDADES TÉRMICAS VISCOELÁSTICAS USANDO ESPECIEN DE PRUEBA DE ESFUERZO TÉRMICO RESTINGIDO

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

- Etapa de transición vidriosa: esta etapa se puede definir por dos parámetros, la transición vidriosa de temperatura y la transición vidriosa de módulo. Esto ocurre cuando la razón de curvatura del módulo de relajación térmica se acerca a cero (Figuras 2 c y d).

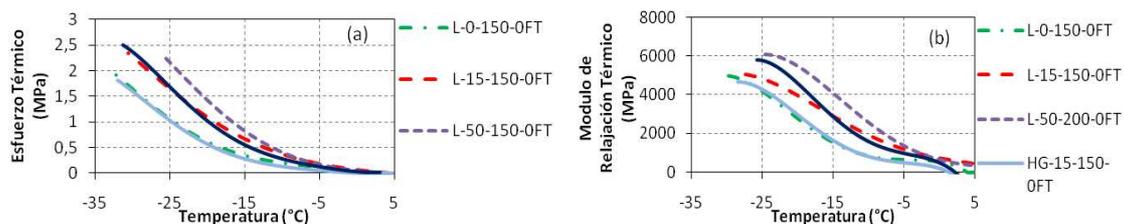
- Etapa de iniciación de micro-fisura: en esta etapa ocurre una micro-fisura en el espécimen debido a un esfuerzo térmico inducido. Se puede definir por tres parámetros: temperatura de iniciación de micro-fisura (MCIT), modulo de iniciación de micro-fisura (MCIM), y esfuerzo de iniciación de micro-fisura (MCIS). El MCIM es identificado como el valor máximo del modulo de relajación térmica. La temperatura correspondiente al modulo 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 del 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**



Este estudio, el TSRST fue realizado en especímenes de viga (50,8 x 50,8 x 254 mm) en el largo plazo, incondicionados. El TSRST fue realizado para cada mezcla asfáltica en tres réplicas. El envejecimiento de la mezcla se realizó según AASSHTO R30 para envejecimiento a largo plazo de mezclas HMA. La Figura 3 ilustra la composición del esfuerzo térmico (Figura 3a) y el modulo 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 de en la mezcla (Figuras 3a y 3b). El uso de BituTech RAP disminuye el esfuerzo térmico y el modulo de relajación térmica, en comparación con el correspondiente control de muestras. Además, las muestras con 15 y 50% de RAP usando BituTech RAP tienen similar la composición de esfuerzos térmicos y el modulo de relajación térmica hasta el 0 y 15% en mezclas RAP sin el BituTech RAP, respectivamente.

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



Las propiedades determinadas para baja temperatura de varias mezclas asfálticas muestran que agregar RAP a una mezcla virgen aumenta su esfuerzo de fractura, su modulo de iniciación de la micro-fisura, y el modulo de transición vidriosa. Además, disminuye la temperatura de agrietamiento, la temperatura de iniciación de micro-fisura y, la temperatura de transición vidriosa. Agregando BituTech RAP se restauran las propiedades de temperaturas bajas de las mezclas asfálticas significativamente. Se observó que al agregar BituTech RAP se suavizan las mezclas y disminuye el esfuerzo de fractura, el esfuerzo de micro-fisuramiento, el modulo de micro-fisuramiento, y el modulo de transición vidriosa.

## ANÁLISIS DE COSTOS PRELIMINARES

El análisis de ahorro de costos preliminares se llevo a cabo para las mezclas realizadas para evaluar la efectividad al usar distintos porcentajes con aditivo RAP BituTech RAP. Basándose en la discusión presentada en la serie de publicaciones de información de NAPA refiriéndose al costo asociado al uso de RAP, el valor de RAP puede ser calculado como sigue: contenido de asfalto RAP = 4,7%; costo del asfalto virgen (costos MIT) PG58-28 = \$685/ton y PG52-34 = \$755/ton; costo del agregado virgen = \$15/ton. Sin embargo, el valor de RAP por tonelada de mezcla caliente es: 1) ligante asfáltico en RAP = \$685 x 0,047 = \$32,20/ton; 2) agregado en RAP = \$15 x 0,953 = \$14,30/ton; 3) valor total de RAP = \$32,20/ton + \$14,30/ton = \$46,5/ton. La Tabla 2 muestra dos ejemplos para el costo asociado a obtener y procesar RAP a dos porcentajes diferentes: 15 y 50% con y sin BituTech RAP. El primer ejemplo en la tabla es para RAP obtenido desde la molienda en el proyecto para el cual el costo de la molienda está incluido en el contrato y el segundo ejemplo es para RAP comprado y que requiere procesamiento.

**Tabla 2: Ejemplos de ahorro típicos usando RAP y BituTech RAP**

Costos	RAP obtenido de las moliendas <sup>1</sup>	RAP Comprado
Valor del RAP	\$46.5/ton	\$46.5/ton
Costo del RAP		- \$5.00/ton
Costo de planta para equipo adicional	- \$0.85/ton	- \$0.85/ton
Costo de transporte	- \$3.50/ton	
Costo de manipulación y procesamiento	- \$5.80/ton	- \$5.80/ton
Costo de control de calidad extra	- \$0.60/ton	- \$0.60/ton
Costo BituTech RAP <sup>2</sup>	- \$21.49/ton	- \$21.49/ton
Ahorros totales	\$35.74/ton	\$34.24/ton
Ahorro por 15% RAP en mezcla (sin BituTech RAP) <sup>3</sup>	\$5.36/ton	\$5.14/ton
Ahorro por 50% RAP en mezcla (sin BituTech RAP) <sup>3</sup>	\$17.87/ton	\$17.12/ton
Ahorro por 50% RAP en mezcla (sin BituTech RAP) con ligante suave (PG52-34)	\$14.57/ton	\$13.82/ton
Ahorro por 15% RAP en mezcla (con BituTech RAP) <sup>3</sup>	\$2.14/ton	\$1.91/ton
Ahorro por 50% RAP en mezcla (con BituTech RAP) <sup>3</sup>	\$7.12/ton	\$6.37/ton

<sup>1</sup> Costo de moliendas incluidas en el contrato

<sup>2</sup> Un kg de BituTech RAP cuesta \$1.43. BituTech RAP fue adicionado en un 1.5% del peso de RAP.

<sup>3</sup> Usando PG58-28.

El costo de análisis de resultados presentado en la Tabla 2 muestra que el ahorro en costos usando un 15% de RAP puede variar entre \$5,14 a \$5,36/ton. Los ahorros pueden incrementarse aumentando el porcentaje de RAP a un 50% (\$17,12 a \$17,87/ton), pero esto puede llevar a un desempeño más bajo de la mezcla en termino de fisuramiento térmico y resistencia a la humedad como se menciono anteriormente. Una potencial solución fue usar un ligante gradado más suave, por ejemplo PG52-34, el cual introduce un costo adicional y reduce los ahorros de \$13,82 a \$14,57/ton. Una solución adicional fue usar BituTech RAP con PG58-28 y un 50% de RAP. Las propiedades de resistencia térmica y de humedad para esta mezcla fueron las mejores y se lograron ahorros de costo (\$6,37 a \$7,12/ton) a pesar de que el costo adicional por BituTech RAP. Por otra parte, el 50% de mezcla RAP con PG58-28 y BituTech RAP tuvo como resultados un ahorro de costos que son entre 24 y 33% más altos que los anticipados con 15% de mezcla RAP sin poner en peligro el desempeño de la mezcla.

## CONCLUSIONES

Una evaluación extensiva en laboratorio fue conducida al estudio del efecto del BituTech RAP en mezclas asfálticas con un contenido de RAP hasta el 50%. El impacto del contenido del RAP y del BituTech RAP 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:

- Los análisis de Cole-Cole mostraron que los valores del modulo de perdida (E'') con BituTech RAP fueron significativamente mayores comparados con las mezclas sin aditivo. Además, el desempeño de la mezcla con 50% RAP y BituTech RAP, fue similar a la mezcla con 15% RAP (Con BituTech RAO). Por lo tanto, mezclas con altos porcentajes de RAP (hasta 50%) pueden ser usados con BituTech RAO sin sacrificar el desempeño de la mezcla.
- Adicionar BituTech RAP a las mezclas RAP mejoraron su resistencia al daño por humedad después de 3 ciclos F-T. Mezclas con BituTech RAP exhibieron valores del modulo de almacenamiento y del modulo de perdida son significativamente mayores que las mezclas sin BituTech RAP.
- Para el ensayo TSRST, la adición de BituTech RAP restauraron las propiedades de baja temperatura de las mezclas RAP. Una reducción del modulo de relajación térmica se observo con un cambio para una temperatura de fractura, la temperatura de inicialización del micro fractura y la temperatura de transición vítrea hacia el lado más frio

Un análisis de costos ilustrativo mostró ahorros potenciales al usar BituTech RAP con un 50%, aparte de su efecto como agente rejuvenecedor. Usar BituTech RAP posibilita el uso de porcentajes mayores de RAP sin afectar el desempeño global de la mezcla.

## 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. Bitutech RAP and PER High RAP and Warm-Mix Asphalt Solutions. Consultado el 21 de Julio, 2012  
<http://www.engineeredadditives.com/images/BituTechRAP&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](http://76.12.53.242/submissions/57_20080101_Prem%20Naidoo%20-%20Akzo%20Nobel%20Rediset%20WMX.pdf)
- Naidoo, T. Effect of Bitutech RAP/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.