



RETROCÁLCULO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL
LIGANTE ASFÁLTICO USANDO EL MODULO DINÁMICO DE
MEZCLA ASFÁLTICA A TRAVÉS DE LOS MODELOS DE
HIRSCH Y DE HUET-SAYET

Luis G. Loria¹, Elie Hajj², Peter Sebaaly³,
Alejandro Navas⁴, Ernesto Villegas⁵

Copyright 2011, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP

Este Trabajo Técnico, elaborado para ser presentado en el XVI CILA – Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto a realizarse entre el 20 y el 25 de noviembre de 2011 en Rio de Janeiro, fue seleccionado por el Comité Técnico del evento para dicho fin, de concordancia con las informaciones contenidas en el resumen sometido por el/los autor(es). Tal cual presentado, su contenido no fue revisado por el IBP. Por ende, los organizadores no traducirán ni corregirán los textos recibidos. La versión original del material presentado no refleja necesariamente las opiniones del Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, sus Asociados y Representantes. El/los autores de este Trabajo Técnico tienen pleno conocimiento de esto y aprueban su publicación en los Anales del

XVI CILA – Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto.

Resumen

La determinación de las propiedades del ligante asfáltico es fundamental para caracterizar el desempeño y realizar un adecuado diseño de la mezcla asfáltica. Una vez que la mezcla asfáltica ha sido preparada, el método tradicional para determinar las propiedades del ligante ha sido extraerlo con solventes mediante el rotavapor. Esta técnica ofrece el inconveniente de que los solventes más comunes empleados como el tricloroetileno alteran el asfalto mediante su ablandamiento, lo cual impide realizar un preciso análisis de las propiedades remanentes de este, por ejemplo, para diseño de materiales reciclados. Así las cosas, la predicción del desempeño se aleja muchísimo del comportamiento real del material, lo cual no es conveniente para maximizar el uso de recursos usados en la construcción con dichos materiales. Por lo anterior, este trabajo busca aproximar las propiedades del ligante asfáltico mediante dos métodos matemáticos basados en la ciencia de materiales: El modelo de Hirsch –ampliamente usado en los Estados Unidos- y el modelo de Huet-Sayet – de uso común en Francia-. Ambos modelos relacionan las propiedades mecánicas más importantes del material: el modulo dinámico de cortante del asfalto (G^*), el modulo dinámico de la mezcla asfáltica (E^*), y los respectivos ángulos de fase. Adicionalmente, ambos modelos incluyen propiedades de uso común de la mezcla asfáltica como los vacíos llenos con asfalto y los vacíos en el agregado mineral. Para realizar la investigación, 8 diseños de mezcla densa y dos ligantes asfálticos (PEN 150-200 y 200-300) fueron preparados con materiales de Manitoba, Canadá. Esto permitió comparar las propiedades retrocalculadas con las mediciones realizadas en los ligantes usados. Los resultados obtenidos son prometedores.

Abstract

The determination of the properties of the asphalt binder is a key factor to assess the performance and to do an adequate Hot-mix asphalt design. Once the mix is produced, the traditional method to assess the properties of the asphalt binder is to extract and recover it with trichloroethylene. Unfortunately, the extraction process altered the asphalt by its softening, and therefore, it is not adequate to assess its properties using this process, for example, for recycled materials. Hence, the prediction of the asphalt performance is too far from the real material behavior, which is not convenient. Therefore, this research searches to determine the asphalt properties using two backcalculation methods, the Hirsch –widely used in United States- and the Huet-sayet –commonly used in France-. Both methods relate the mechanical properties of the material: the dynamic shear modulus (G^*) of the asphalt to the dynamic modulus of the mix (E^*), and the correspondent phase angles. Additionally, both models include properties of the mix like voids filled with asphalt and voids filled with air. To perform the research, 8 dense-graded mix design were performed, combined with two asphalt binders (PEN150-200 and 200-300). The mixes were prepared with materials from Manitoba, Canada. This allowed to backcalculate the asphalt properties from the mix properties and compared them to the ones of the original binders. The obtained results are promising.

¹ PHD, Ingeniería Civil – LanammeUCR

² PHD, Ingeniería Civil – UNR

³ PHD, Ingeniería Civil – UNR

⁴ MSc, Ingeniería Civil – LanammeUCR

⁵ Técnico-Química de Materiales - LanammeUCR

1. Introducción

El principal uso de RAP en la industria de la construcción de los pavimentos flexibles ha sido en la carpeta asfáltica. El uso de RAP en mezclas de concreto asfáltico nuevo se ha vuelto muy atractivo, debido a la limitación de espacio disponible en los rellenos sanitarios, la disminución en la cantidad de agregado virgen de alta calidad y el alto precio del petróleo. El RAP se obtiene ya sea por extracción en frío, por el proceso de calentamiento/suavizamiento de un pavimento viejo o el generado como desecho en una planta de mezclas calientes (1). Los materiales presentes en los pavimentos asfálticos viejos pueden ser útiles incluso cuando los mismos pavimentos han alcanzado el plazo de su vida de servicio. Reconociendo el valor de los recursos existentes de agregado y asfalto, estados y contratistas hicieron uso extensivo de RAP en la construcción de pavimentos nuevos en el pasado. El uso de RAP ha probado ser económico y favorable para el medio ambiente. Además, en la mayoría de los casos, se ha encontrado que el rendimiento de las mezclas que contienen RAP, es tan bueno como el de las mezclas generadas con agregado virgen (1). El uso de RAP además de ser económico y puede ayudar a contrarrestar los costos iniciales, a conservar los recursos naturales, y a evitar problemas para la disposición de los desechos y los costos asociados.

Hoy en día, el RAP se ha convertido en una opción atractiva para generar lo que se conoce como caminos sostenibles. En este sentido, el RAP reduce el consumo de los recursos naturales y requerimientos de energía asociados. El otro producto del uso de los caminos sostenibles es la reducción del calentamiento usado en la producción de la mezcla asfáltica. Al tiempo que se reduce el calor y se incrementa el uso de RAP las técnicas para hacer pavimentos asfálticos se vuelven más sostenibles, la cuantificación de estos beneficios y el impacto en la vida de servicio son desconocidos (2). Impulsar una baja en el uso de la energía, en el calor generado de los procesos de producción y en las emisiones, así como métodos de construcción amigables con el ambiente están echando raíces en la industria del asfalto, esto se trata de un cambio en la definición de “verde” y “sostenible” en la práctica de la actualidad. Un excelente artículo escrito por Miller et al revela a la luz los cinco usos que son críticos en el desarrollo de caminos sostenibles: 1. La extracción de materias primas, 2. La fabricación o producción de productos de pavimentación, 3. La construcción y colocación de materiales, 4. El mantenimiento y 5. La remoción, reciclaje o disposición (2). La presente investigación está basada en proveer algunas soluciones para estos cinco puntos. En América del Norte, cerca del 80 por ciento de todos los pavimentos son reciclados, en los Estados Unidos, el mayor producto del reciclaje en construcción es debido al reciclaje de pavimentos asfálticos (3).

Hay tres preocupaciones principales con respecto al diseño de mezclas que contienen RAP. El primero se relaciona con la caracterización y el impacto de las propiedades de los agregados en el diseño de las mezclas que contienen RAP, la segunda está relacionada con la determinación del rendimiento mecánico de las mezclas que tienen alto contenido de RAP, y la tercera se relaciona con la determinación de las propiedades del ligante RAP sin considerar el proceso de extracción y recuperación. Esta investigación se enfoca en obtener conocimientos acerca de estos tres usos.

Finalmente, la determinación de las propiedades del ligante RAP, es otro motivo de preocupación desde que en las guías de diseño actuales se empezó a recomendar la extracción del ligante reciclado por algún método sostenible (centrifugado o reflujo con diferentes solventes), y la recuperación por rotavapor. Sin embargo, algunos investigadores creen firmemente, que el proceso de extracción y recuperación de ligante RAP, seguido por la determinación de su grado PG, que posteriormente por medio de su relación en la tabla de mezclas, da el valor del grado de ligante virgen, no es un método muy confiable/práctico para el diseño de mezclas RAP que contengan materiales reciclados. Por lo tanto, esfuerzos actuales han sido desarrollados para retrocalcular las propiedades del ligante RAP de las propiedades de las mezclas con contenido de RAP, usando las curvas maestras de ligantes de los modelos de Hirsch y Huet-Sayet. En este sentido esta investigación también proporciona una metodología basada en trabajo de laboratorio y de modelos matemáticos para determinar las propiedades mencionadas, sin el uso de métodos de recuperación y extracción.

2. Diseño experimental

Otra parte del experimento evaluó la resistencia de las mezclas de HMA con alto contenido de RAP (sobre el 50%) para secciones de campo en Manitoba, Canadá, con respecto al daño por humedad y al agrietamiento térmico. El proyecto se encuentra en la carretera provincial 8 entre Gimli Hnausa y Manitoba, Canadá. La longitud total del proyecto es de alrededor de 17 millas, de las cuales se comparan en sitio 6.0 millas del proyecto. Las secciones evaluadas fueron construidas en septiembre de 2009 y consistían de dos trayectos de 2 pulgadas con HMA convencional (i.e. 0% RAP), 15% RAP, 50% RAP, que fueron construidos un año antes (i.e. 2008) sobre una base y subbase. Las cuatro mezclas evaluadas en la parte superior de los dos trayectos, consisten de una mezcla densa de graduación densa manufacturada con un ligante asfáltico Pen 150-200 excepto para la mezcla de 50% de RAP, que se manufacturó con un ligante asfáltico Pen 200-300. El objetivo de la graduación del ligante para el proyecto fue PEN 150-200.

Mezclas sueltas fueron muestreadas durante la pavimentación de la parte superior del trayecto del proceso de barrenado del pavimento con la pavimentadora en el sitio del proyecto. Esas mezclas se relacionaron con las con las mezclas producidas en el campo y fueron etiquetadas como F-0% y el 150, F-15% -150%, F-50 a 150 y F-50% -200. Además, los agregados fríos, ligantes asfálticos, y materiales RAP, fueron muestreados para varias muestras durante el

proceso de producción en planta. Las materias primas fueron usadas para reproducir las cuatro mezclas en laboratorio. Esas mezclas fueron relacionadas con las de laboratorio y fueron etiquetadas como L-0% y el 150, L-15% y el 150, L-50% y el 150 y L-50% -200.

La determinación de las propiedades del ligante RAP es uno de los pasos más importantes en el diseño de mezclas con contenido de RAP. Cinco metodologías fueron utilizadas para determinar las propiedades del ligante RAP:

- Gráficos de mezcla de acuerdo a AASHTO T 323.
- Mediciones directas de la extracción y recuperación de ligantes asfálticos usando el reómetro de cortante dinámico. Dos métodos fueron utilizados en este aspecto:
 - Curvas maestras (MMC, Master-master curve por sus siglas en inglés) definidas por el modelo CAM (Christensen-Anderson-Masterreanu).
 - Curvas maestras (MMC, Master-master curve por sus siglas en inglés) definidas por el modelo CAS (Christensen-Anderson-Sharrock).
- El método mortero desarrollado por investigadores de la Universidad de Madison-Wisconsin.
- Retrocálculo de las propiedades del ligante reciclado a través del modelo Hirsh.
- Retrocálculo de las propiedades del ligante reciclado a través del modelo the Huet-sayegh.

2.1. Los diseños de mezcla

El método de diseño de mezcla, como se indica en el Manual de Métodos de Diseño de Mezclas MS-2, del Instituto del Asfalto fue usado para diseñar todas las mezclas, según las especificaciones estándar de la MIT. Todas las mezclas evaluadas fueron diseñadas con 75 golpes por cada lado. Un análisis granulométrico realizado en agregados extraídos de mezclas extraídas de los cuatro lugares, revelaron que todas las granulometrías cumplían con los criterios de trabajo de la mezcla. El contenido de ligante asfáltico del material RAP y de las mezclas producidas en campo, fue determinado usando el método del horno de ignición, (AASHTO T308 (5)). Un contenido de ligante asfáltico de .47% fue medido para el material RAP. Un contenido de ligante de 5.1% fue medido para 0 a 15% de las mezclas producidas en campo (i.e. F-0% -150% y F-15 -150), mientras que un contenido de 4.9% fue medido para el 50% de las mezclas producidas en campo (i.e. F-50% y el 150 y F-50% -200). El contenido de asfalto extraído en total estuvo dentro del 0.1% del contenido de diseño.

2.2. Gráficos de mezclado para ligantes extraídos y recuperados de acuerdo con AASHTO M 323

El sistema Superpave de clasificación del rendimiento (PG, por sus siglas en inglés) (AASHTO M320 (5)) fue usado para la clasificación de los ligantes vírgenes, el ligante RAP, y aquellos de la recuperación de varias mezclas producidas en campo y en laboratorio. Todos los ligantes recuperados fueron extraídos usando centrifuga (AASHTO T164 (54)) y recuperados usando el rotavapor (ASTM D5404 (6)) y una solución que consiste de 85% de Tolueno y 15% de Etanol por volumen. Los ligantes recuperados fueron clasificados con respecto a pruebas de los originales, a corto plazo a través de RTFO, y a largo plazo a través de PAV. Cabe señalar que todas las mezclas sueltas producidas en laboratorio estuvieron sujetas por tiempo corto de cuatro horas a envejecimiento a 275°F en un horno de corriente de aire forzada, mientras que las mezclas producidas en campo no. Temperaturas críticas, son temperaturas a las cuales el ligante reúne apropiadamente los criterios especificados por Superpave. En cuanto a los datos de los resultados se puede observarse lo siguiente:

- Las bajas temperaturas críticas de ambos ligantes vírgenes (i.e. PEN 150-200 Y PEN 200-300) estuvieron a solo 2°C de las otras. Sin embargo, las altas temperaturas críticas estuvieron a 5°C de las otras.
- En el caso de ambas, las mezclas producidas en campo y en laboratorio elaboradas con ligante asfáltico PG58-28, con el aumento en el contenido de RAP en la mezcla se dio lugar a una temperatura más alta y más caliente en puntos de temperatura crítica alta; y una más baja en puntos críticos de temperatura baja para ligantes asfálticos recuperados, respectivamente.
- En promedio, independientemente del contenido de RAP, los ligantes asfálticos recuperados de las mezclas producidas en campo tuvieron temperaturas críticas más altas que las de los ligantes recuperados de las mezclas producidas en laboratorio. En promedio, las temperaturas críticas altas y bajas de los ligantes recuperados de las mezclas producidas en campo fueron mayores en alrededor 2.4 y 1.2°C, respectivamente. En otras palabras, los ligantes asfálticos recuperados de las mezclas producidas en campo fueron más rígidos que los recuperados en las mezclas recuperadas en laboratorio. Esto indica que las cuatro horas de envejecimiento en un horno de corriente de aire forzada a 275°F podrían no simular el envejecimiento de las mezclas producidas en campo.
- La recuperación de ligante asfáltico de las mezclas F-50%-200 y L-50%-200 fueron más suaves que los ligantes recuperados de las mezclas F-50%-150 y L-50%-150, en alrededor 4.0 y 4.2°C, respectivamente.

2.3. Mediciones directas de las propiedades del ligante RAP usando la curva maestra

Como se mencionó previamente, dos metodologías fueron usadas para evaluar las propiedades del ligante RAP: el modelo CAM (Christensen-Anderson-Mastereanu) y el modelo CAS (Christensen-Anderson-Sharrock). Los resultados obtenidos usando ambas metodologías se muestran y se discuten en esta sección.

2.3.1. Modelo CAM

Las curvas maestras (MMC, por sus siglas en inglés) de varios ligantes extraídos y recuperados fueron determinadas usando los principios mostrados en la investigación mostrada por Zeng et al (7)(8). Este modelo es llamado el modelo CAM en referencia a sus desarrolladores: Christensen, Anderson, y Mastreanu. La prueba consiste en la evaluación de las propiedades reológicas del ligante (Módulo de cortante complejo G^* , y ángulo de fase δ) a varias temperaturas, frecuencias y niveles de deformaciones. Las propiedades reológicas tienen que ser ajustadas para crear una sola curva a una temperatura y deformación de referencia dadas. El modelo CAM fue ajustado usando una hoja de cálculo de Microsoft Excel[®] diseñada por el Dr. Elie Hajj. El proceso de extracción y recuperación y las pruebas de reología fueron realizadas en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) para todos los ligantes extraídos y recuperados de las mezclas RAP (de campo y laboratorio). Las pruebas de extracción y recuperación realizadas en el LanammeUCR usaron una mezcla de 85% de Tolueno con 15% de Etanol como solvente (TE).

2.3.1.1. Determinación de las temperaturas críticas con el modelo de CAM

Las temperaturas críticas fueron determinadas usando el modelo de análisis CAM. Varios modelos de ajuste para cada mezcla, se ajustaron de acuerdo con a las mismas temperaturas usadas en la determinación de la extracción y recuperación de los ligantes PG. En este sentido, es importante mencionar que solo temperaturas altas e intermedias fueron determinadas desde que las pruebas realizadas de no baja temperatura dieron rendimiento.

Las propiedades reológicas determinadas usando las curvas del modelo de ajuste CAM y las propiedades determinadas por medio del procedimiento normal de Superpave (a una frecuencia de 1.59Hz) se relacionan unas con otras. Para las mezclas de campo, la mayor diferencia para altas temperaturas fue 1.2°C esto para la mezcla F-50%-150, mientras que para las temperaturas intermedias, la mayor diferencia fue de 1.8°C, esto para la mezcla F-0%-150. Para las mezclas de laboratorio, la mayor diferencia en la alta temperatura fue 0.5°C, nuevamente para la mezcla F-50%-150, mientras que para temperaturas intermedias la mayor diferencia fue de 2.9°C para la mezcla F-0%-150. Por lo tanto, los resultados de las mezclas de campo y de laboratorio son consistentes. En general, los resultados entre el modelo CAM y el procedimiento normal PG, estuvieron cercanos para las mezclas de laboratorio a pesar de la diferencia de 2.9°C para la mezcla F-0%-150 indicada.

La ecuación para el módulo complejo viene dada por:

$$G^* = G_e^* + \frac{G_g^* - G_e^*}{[1 + (f_c/f)^k]^{m_c/k}} \quad (1)$$

Donde,

$G_e^* = G^* (\Gamma \rightarrow 0)$, módulo de equilibrio complejo, $G_e^* = 0$ para las carpetas y $G_e^* > 0$ para las mezclas de corte,

$G_g^* = G^* (\Gamma \rightarrow \infty)$, módulo vidrio complejo,

f_c = parámetro de localización con dimensiones de frecuencia,

f = frecuencia reducida, función de la temperatura y presión deformación, y

k, m_c = parámetros de forma, adimensionales.

En la Figura 1, se muestra la comparación entre los G^* predicho con el modelo HIM vs G^* predicha por el modelo CAM para las mezclas de varios campos. Temperatura de referencia: 25 ° C.

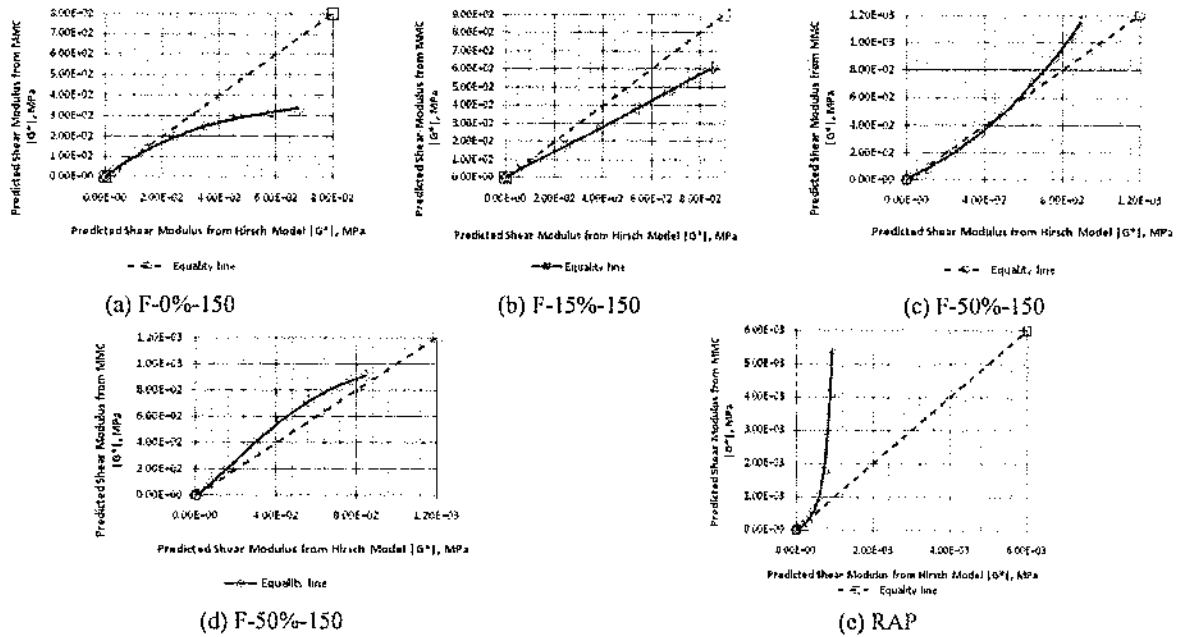


Figura 1. Comparación entre los G^* predicho con el modelo HM vs G^* predicha por el modelo CAM para las mezclas de varios campos. Temperatura de referencia: 25 °C.

2.5. Modelo CAS

Como se indicó anteriormente, el modelo CAS fue utilizado también para el ajuste de los datos generados por el barrido de la frecuencia, por WRI a varias temperaturas y niveles de esfuerzos. Las pruebas realizadas por WIR se llevaron a cabo usando TE y ciclohexano como solventes. Como estas fueron realizadas para el modelo CAM, los datos de DSR fueron ajustados para desarrollar una sola curva a cierta temperatura y deformación de referencia. Para el modelo CAM, WRI realizó la determinación de los parámetros de ajuste usando el software Rhea y para todas las mezclas de campo, las curvas maestras de ajuste a una temperatura de 25°C y un nivel de deformación del 0.1% fueron dadas. WRI también proveyó las constantes Kaelble para desarrollar la curva del factor de ajuste a distintas temperaturas. La Figura 2, muestra los valores de G^* de las curvas maestras desarrolladas por WRI para mezclas de campo y laboratorio con 50% de RAP y asfalto tipo PEN 150-200.

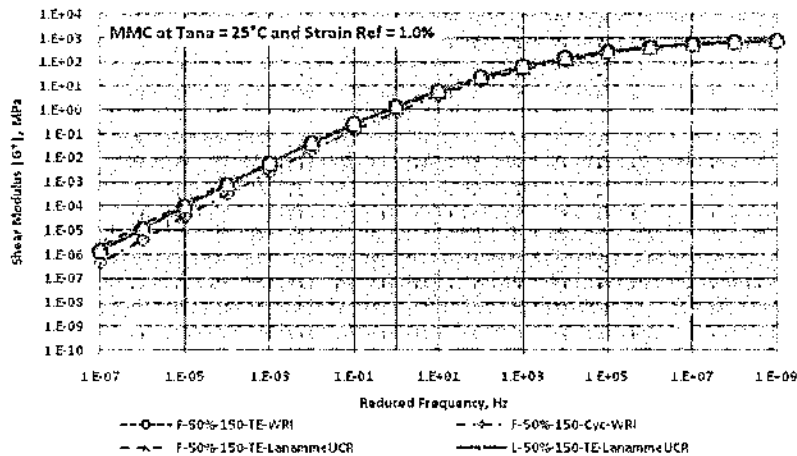


Figura 2. Comparación entre valores de G^* para curvas maestras desarrolladas para mezclas de laboratorio y de campo con 50% de RAP y asfalto PEN 150-200

2.5.1. Determinación de las temperaturas críticas con el modelo CAS

Al igual que en el modelo CAM, todas las curvas maestras a una temperatura de referencia de 25°C y una deformación de 1.0% se ajustaron a otras temperaturas usando las constantes de Kaelble. El modelo CAS tiene menos componentes (sólo G_0 , a , k y β) que el modelo CAM, por lo tanto, es más fácil ajustar y realizar análisis con este.

Las propiedades reológicas determinadas usando las curvas de ajuste del modelo CAS para ligantes extraídos y recuperados con TE, se acercaron a las propiedades determinadas a través del procedimiento normal del Superpave (a una frecuencia de 1.59 Hz). Para temperaturas altas la máxima diferencia es de alrededor 1.8°C y corresponde a la mezcla RAP. Para la temperatura intermedia, la mayor diferencia corresponde a 1.2°C para la mezcla F-15%-150. Sin embargo, la determinación de las temperaturas críticas cuando se utiliza TE presenta pequeñas y razonables diferencias con las determinadas usando el método Superpave a 1.59 Hz. Por otro lado, las temperaturas críticas obtenidas de los ligantes extraídos y recuperados usando ciclohexano. En general, esas temperaturas críticas estuvieron por fuera y fueron más suaves que las desarrolladas con el procedimiento normal del Superpave y que las de los ligantes extraídos y recuperados con TE. Solo las temperaturas críticas de la mezcla F-0%-150 estuvieron en un rango razonable, con una diferencia máxima de 0.4°C para las altas temperaturas y de 2.2°C para las intermedias. Las diferencias entre las temperaturas críticas fueron más grandes conforme el porcentaje de RAP aumentó. Por ejemplo, para la mezcla F-15%-150, la temperatura alta crítica fue 3.1°C más baja, y para la intermedia, 2.2°C. La diferencia más grande reportada corresponde con el material RAP donde la temperatura alta crítica fue 16.9°C más baja, y la intermedia 18.7°C más baja que las obtenidas del proceso normal PG.

2.6. Método de mortero RAP

Una prueba innovadora desarrollada por Ma et al (9) de la Universidad de Wisconsin-Madison (UWM) fue utilizada para determinar los gráficos de mezcla y las temperaturas críticas para el ligante RAP a varios contenidos de RAP. El equipo de la UWM desarrolló un nuevo procedimiento de análisis para estimar el porcentaje permisible de ligante RAP en mezclas asfálticas basadas en las propiedades reológicas del ligante a temperaturas altas, intermedias y bajas. El método desarrollado incluye un procedimiento de análisis para alcanzar este objetivo basado en una prueba de mortero RAP. El procedimiento de análisis requiere de entrada los resultados de las pruebas DSR y BBR de un ligante fresco y dos diferentes tipos de morteros. Esta entrada es analizada en diferentes pasos, y la salida del procedimiento es el límite admisible de RAP para diferentes grados de PG objetivo. Una hoja de cálculo fue desarrollada para llevar a cabo el análisis completo. Este tema ya fue explicado con detalle en la revisión literaria, aquí, los resultados de la prueba serán mostrados.

El concepto de mezclado (10, 11), que se muestra en las ecuaciones (2) y (3), indica que las propiedades del ligante mezclado en el mortero RAP, están relacionadas con el porcentaje del ligante RAP en la mezcla (10). La relación es usada para calcular el porcentaje de ligante RAP permisible en la mezcla. Finalmente, el porcentaje estimado permisible a dos temperaturas seleccionadas fue usado para estabilizar la relación entre el grado PG objetivo y el porcentaje de ligante RAP permisible.

$$\log S_{blended} = v_{aged} \log S_{aged} + v_{fresh} \log S_{fresh} \quad (2)$$

$$m_{blended} = v_{aged} \times m_{aged} + v_{fresh} \times m_{fresh} \quad (3)$$

La Figura 3 (a) y (b) muestra un resumen de los resultados de las pruebas para ambos asfaltos PEN 150-200 y PEN 200-300. El método del mortero de la UWM indica que el procedimiento de la mezcla con asfalto PEN 150-200 y un contenido de 15% de RAP fue para una temperatura alta crítica de 58.7°C, una temperatura intermedia crítica de 16.7°C y una temperatura baja crítica de -30.9°C. Si la misma mezcla contiene 50% de RAP, las nuevas temperaturas críticas pueden ser respectivamente para los casos de alta, intermedia y baja, 61.0°C, 21.8°C, y -28.4 °C. Para el asfalto PEN 200-300, la mezcla que contiene 50% de RAP muestra una temperatura crítica alta de 57.0°C, una intermedia crítica de 18.8°C y una baja crítica de -31.4°C

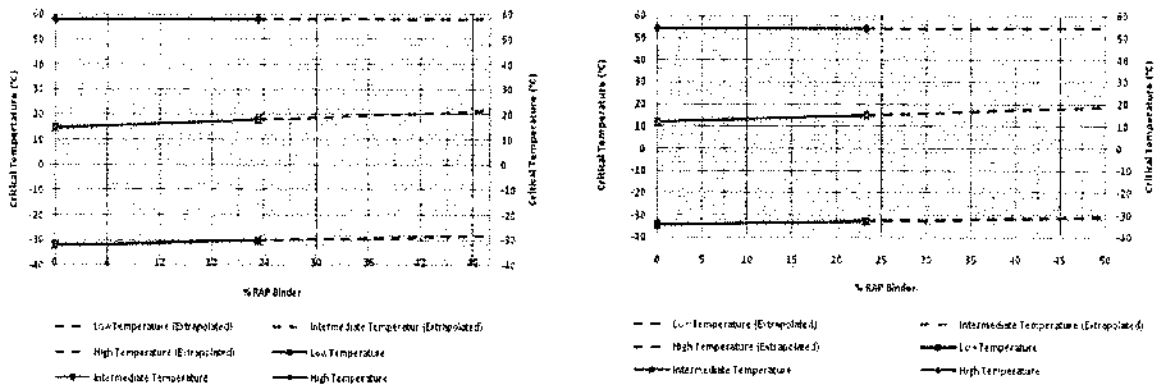


Figura 3. Las temperaturas críticas del método de mortero UWM para el (a) PEN asfalto 150-200 y (b) PEN asfalto 200-300

2.7. Modelo Hirsh

El modelo Hirsh (12), fue usado para el retrocálculo de las propiedades del ligante asfáltico (Módulo de cortante dinámico, G^* , y el ángulo de fase δ) para las propiedades mecánicas (Módulo dinámico, E^*) y volumétricas (VMA y VFA) de la mezcla. El análisis se realizó en mezclas de campo y de laboratorio. Las propiedades del ligante fueron determinadas con datos del LanamincUCR, que fueron usados para compara el G^* y el ángulo de fase predichos del modelo Hirsh. El uso del modelo Hirsh para el retrocálculo de las propiedades del ligante requirió el ajuste de varias curvas maestras de E^* a temperaturas seleccionadas. Para esta investigación, las temperaturas seleccionadas fueron las mismas usadas en la clasificación PG de los ligantes extraídos y recuperados. La comparación entre el retrocálculo de la curva maestra del modelo Hirsh y la curva maestra del modelo CAM para las mezclas (a) F-50%-200 y (b) L-50%-200 a una temperatura de 25°C y una deformación de un 0.1%, se muestra en la Figura 4. También, de acuerdo con la ecuación 4, el modelo Hirsh requiere el VMA y VFA de las mezclas evaluadas, y en la ecuación 5, el modelo Hirsh determina el ángulo de fase con base solo en el factor P_c . Las ecuaciones del modelo de Hirsh son las siguientes:

$$E^* = P_c \left[4,200,000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 435,000 \left(\frac{VFA \times VMA}{10,000} \right) + (1 - P_c) \left[\frac{1 - VMA/100}{4,200,000} + \frac{VMA}{435,000 \times VFA} \right]^{-1} \right] \tag{4}$$

Donde:

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{435,000 \times VFA}{VMA} \right)^{0.28}}{650 + \left(\frac{435,000 \times VFA}{VMA} \right)^{0.58}} \tag{5}$$

P_c = Factor de contacto (el volumen de contactos agregados)

VMA = Vacío en el agregado mineral, por ciento

Vacío = VFA lleno de asfalto, por ciento.

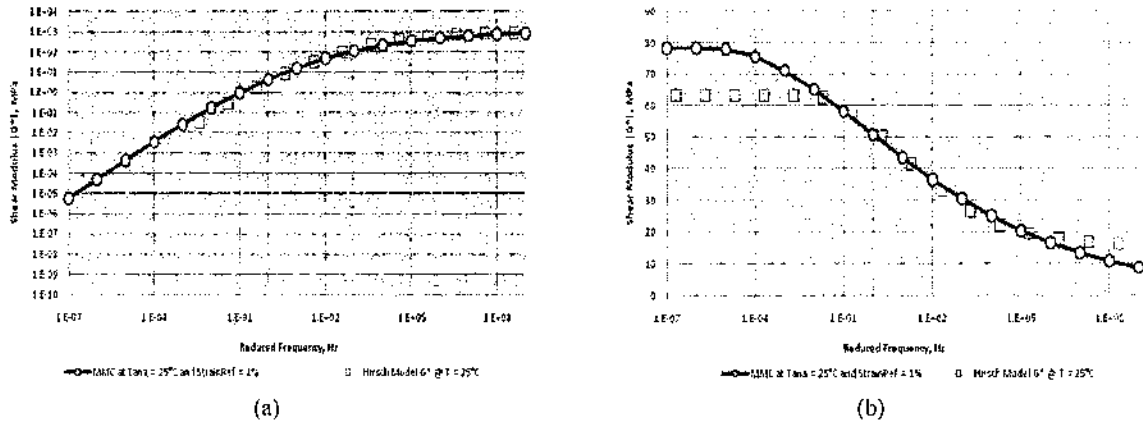


Figura 4. Comparación entre el retrocálculo de la curva maestra del modelo Hirsh y la curva maestra del modelo CAM para las mezclas (a) F-50%-200 y (b) L-50%-200 a una temperatura de 25°C y una deformación de un 0.1%

2.8. Modelo Huet-Sayegh

El modelo Huet-Sayegh fue también usado para retrocalcular las propiedades de los ligantes RAP de las propiedades de las mezclas. Las siete constantes ($\delta, \beta, k, h, E_{\infty}, E_0,$ y τ_0) de la ecuación 6, requieren ser determinadas con un proceso de minimización de los datos experimentales a la temperatura de referencia de 25°C para todos los ligantes RAP estudiados y las mezclas correspondientes. Una hoja de cálculo de Microsoft Excel, desarrollada por el Dr. Elie Hajj fue utilizada. Las propiedades de ligantes fueron determinadas con datos del LanammeUCR (modelo CAM) que se utilizaron para comparar el valor G^* y el ángulo de fase predichos por el modelo Huet-Sayegh.

De la comparación entre el PG del análisis de los gráficos de mezcla con el de los ligantes recuperados se puede observar lo siguiente:

- Para mezclas con 15% de RAP la clasificación del ligante era PG58-28 y consistía con el PG medido en las mezclas de campo y de laboratorio (i.e. F-15% y el 150 y L-15% y el 150). En la Figura 1, se muestra la comparación de Huet-Sayegh curva maestra y modelo de la MMC CAM modelo para el L-0% -150 mezcla a una temperatura de 25 ° C y la tensión del 1,0% (CAM MMC).

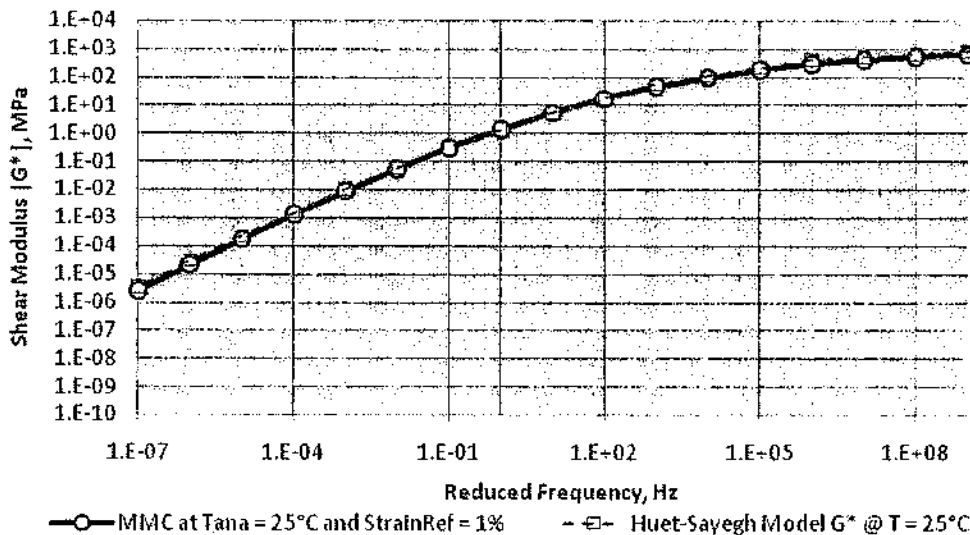


Figura 5. Comparación de Huet-Sayegh curva maestra y modelo de la MMC CAM modelo para el L-0% -150 mezcla a una temperatura de 25 ° C y la tensión del 1,0%(CAM MMC)

- Para las mezclas con un 50% de RAP hechas con PG58-28, la clasificación del ligante de la mezcla fue PG64-22, y fue el mismo que el de la mezcla de laboratorio L-50%-150.
- Para mezclas con un 50% de RAP hechas con PG52-34, la clasificación del ligante asfáltico de la mezcla fue PG64-22, y fue el mismo que se midió para la mezcla de campo F-50%-200.

En general, se observaron buenas correlaciones entre los PG medidos de los gráficos y los recuperados. Asumiendo que la clasificación para el ligante recuperado es verdadero, los datos muestran que el procedimiento con los gráficos podría algunas veces subestimar o sobreestimar las temperaturas críticas en 2°C.

El ligante generalmente no cumplió con respecto a la temperatura baja objetivo de -28°C para un 50% de RAP, incluso si se utilizaba un ligante más fino (i.e. PG52-34). Sin embargo, como se mencionó, aunque el PEN 200-300 es clasificado como un ligante tan suave como el PEN 150-200 según la PG, la diferencia en sus temperaturas críticas fue de solo 2°C y no fue suficiente para reducir la baja temperatura crítica del ligante asfáltico en la mezcla con 50% de RAP a -28°C.

Al igual que el modelo de Huet-Sayegh, el modelo 2S2P1D tiene un espectro continuo (que puede ser representado por una infinidad de elementos Kelvin-Voigt en series o en elementos de Maxell en paralelo). La ecuación del modelo se muestra a continuación.

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_{\infty} - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (6)$$

Donde,

i = número complejo (i2 = -1)

E∞ = límite del módulo complejo de ωτ → ∞ (módulo vítreo),

E0 = límite del módulo complejo de ωτ → 0,

h, k = exponentes tal que 0 < k < h < 1,

δ = constante adimensional,

β = parámetro adimensional introduce para tener en cuenta la viscosidad newtoniana del amortiguador lineal

τ = tiempo característico que varía con la temperatura de contabilidad para el principio de superposición tiempo temperatura (TTSP) y

ω = 2π * frecuencia.

La tabla 1, muestra un resumen general de todas las temperaturas críticas determinadas usando varias de las metodologías estudiadas. La tabla muestra, las temperaturas críticas incluyendo el modelo CAS para recuperación del ligante con TE y ciclohexano.

Tabla 1. Resumen de temperaturas críticas

% RAP-PB	Mezcla	Temperatura											Temperatura crítica								TTSP					
		Rec	Gráfico de mezcla	HSM (24.7)	HSM (24.8)	HSM (24.9)	HSM	CAS (TE)	CAS (TE)	CAS (Cyc)	Mar	Rec	Gráfico de mezcla	HSM (24.7)	HSM (24.8)	HSM (24.9)	HSM	CAS (TE)	CAS (TE)	CAS (Cyc)		Mar	Rec	Gráfico de mezcla	Mar	
Ligante virgen		PEN 150-200 59.0 PEN 200-300 54.3											PEN 150-200 14.7 PEN 200-300 12.2								PEN 150-200 72.5 PEN 200-300 64.4		-			
0%	F	81.0	-	69.8	69.4	69.5	81.5	69.4	81.1	69.0	-	55.8	-	55.2	14.7	14.9	14.0	14	14.9	15.6	-	-	-31.5	-	-	-31.9
15%	L	71.6	-	59.1	59.5	59.2	59.3	59.8	-	-	-	14.9	-	12.6	12.3	12.0	11.9	12	-	-	-	-	-32.5	-	-	-33.0
35-40	F	67.6	57.8	53.7	53.6	59.5	62.4	52.9	53.1	59.5	58.4	18.5	18.1	20.4	20.0	19.7	19.5	19	18.9	16.3	-	14.7	-29.5	-29.1	-33.9	-33.9
	L	54.4	61.3	62.6	61	53.2	60.1	59.4	-	-	-	17.8	18.5	17.9	18.4	18.5	18.2	17.9	-	-	-	-	-33.5	-29.8	-33.9	-33.9
50-150	F	59.1	68.8	68.8	68.4	68.4	68.4	67.9	68.6	67.1	61	24.3	25.4	26.8	26.2	26.1	25.8	24.5	24.1	16.3	-	21.1	-21.2	-23.1	-24.4	-24.1
	L	67.3	67.6	65.8	66.5	66.8	69.1	67.6	-	-	-	23	23.7	23.7	21.4	22.5	24.3	23.7	-	-	-	-	-22.5	-23.1	-24.2	-27.2
50-200	F	65.1	65.3	64.5	64.3	64.3	64.2	65.3	64.5	64.4	57	22.7	21.6	24.7	24.1	24.5	23.7	22.9	23.1	15.5	-	18.5	-25.1	-24.6	-24.1	-31.1
	L	63.1	63.2	64.8	64.5	64.3	64.3	63.5	-	-	-	21.6	21.8	21.8	20.9	22.7	22.8	21.8	-	-	-	-	-26.4	-24.1	-24.4	-34.4
RAP	F	76.7	-	70.2	70.3	71.4	70.7	71.3	70.3	70.3	-	33.9	-	32.5	33.1	32	33.3	31	31.4	33.2	-	-	-34.7	-	-	-

- *Temperaturas críticas determinadas usando ajuste lineal para el tiempo característica entre la mezcla y el ligante.
- †Temperaturas críticas determinadas usando el ajuste cuadrático para el tiempo característico entre la mezcla y el ligante.
- ***Temperaturas críticas determinadas usando el ajuste lineal para el tiempo característica entre la mezcla y el ligante, eliminando las bajas temperaturas de la línea de ajuste.

3. Conclusiones

Varias metodologías se utilizaron para determinar las propiedades del ligante RAP. En general, buenos resultados fueron reportados. Las conclusiones más importantes se muestran a continuación:

- En general, buenas correlaciones fueron observadas entre las temperaturas críticas estimadas de los gráficos de mezcla, y las medidas de los ligantes recuperados. En algunos casos el procedimiento realizado con los gráficos subestimaba o sobreestimaba las temperaturas críticas de los ligantes recuperados en 2°C.
- El modelo CAM y el modelo CAS tuvieron correlaciones cercanas con el retrocálculo de G^* y los ángulos de fase. No se encontró una tendencia específica que determinara si alguna de estas metodologías subestimaba o sobreestimaba con respecto a la otra.
- El modelo CAS fue desarrollado para ligantes RAP extraídos y recuperados con TE y ciclohexano. Los ensayos con TE dieron resultados comparables en el mismo orden de magnitud que los demás análisis realizados, por otro lado, los ligantes RAP extraídos con ciclohexano presentaron propiedades totalmente fuera del rango con respecto a las otras metodologías, ya que este suaviza significativamente los ligantes RAP.
- Adicionalmente, las temperaturas críticas de los modelos CAS y CAM mostraron buenas correlaciones con respecto a los valores determinados usando los gráficos de mezclado del procedimiento normal Superpave. Fueron reportadas diferencias estrictamente más bajas de 3.0°C y normalmente bajo los 2.0°C entre las temperaturas críticas de ambos modelos y las determinadas usando AASHTO T M323.
- El modelo CAS, parece ser el método más fácil y sencillo, para determinar las curvas maestras de G^* y ángulo de fase de los datos para materiales vírgenes obtenidos en laboratorio.
- El modelo Hirsh y el modelo Huey-Sayegh parecen ser adecuados para el retrocálculo de las propiedades mecánicas del ligante RAP con un error bajo.
- El método del mortero RAP parece ser propicio para la determinación de las propiedades del ligante RAP. Sin embargo, podría decirse que el proceso de preparación de muestras lleva mucho tiempo, y la repetibilidad de la prueba aún no ha sido muy estudiada aún.
- La aplicación del modelo Hirsh para el retrocálculo, ya sea de G^* , o del ángulo de fase, es un proceso que lleva tiempo, ya que el cálculo se tiene que hacer punto por punto para cada E^* de la curva maestra.
- Por otro lado, el método de Huey-Sayegh es más fácil para trabajar ya que se ajusta de inmediato la totalidad de los puntos de la curva E^* a la temperatura especificada. Dado que el método Huey-Sayegh predice la forma de la curva principal, la predicción de lo que se mide en el laboratorio se acerca más a la de la curva E^* . Por lo tanto, el rango de frecuencias con buena predicción de las propiedades mecánicas es más amplio para el método Huey-Sayegh.
- Además, la investigación hecha, predice las propiedades del ligante a bajas temperaturas.

4. Recomendaciones

4.1. Metodología propuesta para determinar las propiedades aglutinantes de RAP

Con base en los diferentes análisis realizados en esta investigación, se propone la siguiente metodología para la determinación de las propiedades de los ligantes:

- En lo posible, se debe evitar la extracción y recuperación del ligante asfáltico ya que se cree que los solventes suavizan el ligante. Si la extracción y recuperación tienen que llevarse a cabo, no utilizar el ciclo hexano como disolvente. Con el fin de determinar la curva maestra de G^* y del ángulo de fase, se recomienda el uso del modelo CAS, ya que es más fácil de ajustar y manejar.
- Si el laboratorio no cuenta con un dispositivo de módulo dinámico, el método del mortero RAP podría ser una buena opción para determinar las temperaturas críticas del ligante RAP. La metodología mortero RAP ofrece la ventaja de que necesita los mismos equipos Superpave que cualquier laboratorio tiene: reómetro de flexión viga, reómetro de corte dinámico, la vasija de envejecimiento a presión y el horno de película delgada rodante.
- Si el laboratorio dispone de un dispositivo de módulo dinámico, la mejor opción es retrocalcular las propiedades del ligante RAP para la curva maestra de E^* . En este caso, el modelo de Huey-Sayegh parece ser más apropiado retrocalcular las propiedades del ligante RAP.

8. Referencias

1. McDaniel, R. et al (2001). "Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Guidelines". National Cooperative Highway Research Program: RESEARCH RESULTS DIGEST. North Central Superpave Center at Purdue University, West Lafayette, Indiana. http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_rdd_253.pdf
2. Shesta, Raghubar (2009). "A Laboratory Evaluation on the Use of Recycled Asphalt Pavements in HMA Mixtures". PhD Dissertation. University of Nevada, Reno.
3. Miller, T. D., and H. U. Bahia (2009). Sustainable Asphalt Pavements: Technologies, Knowledge Gaps and Opportunities. White Paper, University of Wisconsin-Madison Modified Asphalt Research Center. <http://uwmarc.wisc.edu/files/MARC-Sustainable-Asphalt-Pavements-white-paper.pdf>

4. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Designation T 308 (2009). "Standard Method of Test for Determining the Asphalt Binder Content of Hot Mix Asphalt (HMA) by the Ignition Method," Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, 26th Edition, Washington, D.C.
5. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Designation M 320 (2008). "Standard Specification for Performance Grade Asphalt Binder" Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, 26th Edition, Washington, D.C.
6. American Society of Testing and Materials (ASTM) Designation D5404 (2008). Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator.
7. Williams, M., Landel, R., and, Ferry, J. (1955) "The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and other Glass – Forming Liquids". University of Wisconsin. J Am Chem Soc 77:3701–3707.
8. Zeng, M., Bahia, H., Zhai, H., and, Turner, P. (2003) "Rheological Modeling of Modified *Asphalt* Binders and Mixtures". In Proceedings of the Association of Asphalt Pavement Technologist (AAPT). V.70-01, p.403.
9. Tao, M., Xiaoming, H., and, Jiupeng, Z. (2008). "Recycling Law of Aged Asphalt Based on Composite Theory of Material". Journal of Southeast University, Vol. 38, No. 3, 2008, pp. 520–524.
10. Tao, M., Bahia, H., Mahmoud, E., and, Hajj, E.Y. (2010). "Estimating Allowable RAP in Asphalt Mixes to Meet Target Low Temperature PG Requirements". In CD ROM, AAPT 2010, Sacramento, California.
11. Soleymani, H., Bahia, H., and, Bergan, A. (1999). "Blending Charts Based on Performance-Graded Asphalt Binder Specification". In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1661, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 7–14.
12. Di Benedetto, H., Olard, F., Sauzéat, C., and, Delaporte, B. (2004) "Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: from binders to mixes". From EATA Nottingham, International Journal Road Materials and Pavement Design, Vol. 5, Special Issue, p. 163-202.

