

**IAG414-06-2013**  
**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL Y DESEMPEÑO A CORTO PLAZO DE**  
**MEZCLAS TIBIAS**  
**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E DESEMPEÑO DE CURTO PRAZO DAS**  
**MISTURAS ASFALTICAS MORNAS**

Adriana Vargas Nordbeck, Ph.D.  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica  
San José, Costa Rica  
adriana.vargasnordbeck@ucr.ac.cr

David H. Timm, Ph.D.  
Auburn University  
Auburn, Alabama, Estados Unidos  
timmdav@auburn.edu

## **Resumen**

Mientras las agencias de estado han empezado la transición de un método de diseño de pavimentos empírico a uno mecanístico-empírico, se ha vuelto necesario evaluar a fondo las propiedades de los materiales y las características estructurales de las mezclas tibias. El objetivo de este estudio fue evaluar las respuestas de los pavimentos y el desempeño a corto plazo de secciones de mezclas tibias construidas en la pista de pruebas del National Center for Asphalt Technology (NCAT). La pista de pruebas fue reconstruida en el verano del 2009 y parte del experimento incluyó secciones construidas con tecnología de mezclas tibias. Pruebas de deflectometría y mediciones bajo carga se obtuvieron periódicamente bajo diferentes condiciones climáticas. Los resultados indicaron que las respuestas de los pavimentos no cambiaron significativamente para las mezclas tibias. Las medidas de desempeño en campo mostraron que el ahuellamiento fue mayor para las mezclas tibias, pero el desempeño fue bueno para todas las secciones, con menos de 10 mm de profundidad. No se observó agrietamiento en ninguna de las secciones luego de la aplicación de 10 millones de ejes equivalentes.

## **Resumo**

Enquanto as agências estaduais têm iniciado a transição de um método de dimensionamento de pavimentos empírico, para um método mecanístico-empírico, tornou-se necessário avaliar cuidadosamente as propriedades dos materiais e as características estruturais das misturas mornas. O objetivo deste estudo foi avaliar as respostas dos pavimentos e o desempenho a curto prazo de seções de misturas mornas construídas na pista experimental do National Center for Asphalt Technology (NCAT). A pista experimental foi reconstruída no verão de 2009 e parte do experimento incluiu seções construídas com tecnologia de misturas mornas. Testes de defletômetro de impacto e medições de carga foram obtidas periodicamente sob diferentes condições climáticas. Os resultados indicaram que as respostas dos pavimentos não mudaram significativamente para a misturas mornas. As medidas de desempenho em campo mostraram que

o afundamento plástico foi maior para as misturas mornas, mas o desempenho foi aceitável para todas as seções, com menos de 10mm de profundidade. Também não observou-se trincas em nenhuma das seções depois da aplicação de 10 milhões de eixos equivalentes.

## **INTRODUCCION**

Las mezclas asfálticas tibias (WMA por sus siglas en inglés) se refieren a un grupo de tecnologías que permiten una reducción de las temperaturas a las cuales las mezclas asfálticas con producidas y colocadas. Mientras que las mezclas asfálticas en caliente se producen normalmente en el rango de temperatura entre 140°C y 170°C, las mezclas tibias pueden producirse en el rango de 100°C a 135°C gracias al uso de tecnología que reduce la viscosidad y mejora la trabajabilidad de la mezcla. Esta reducción de temperatura brinda beneficios ambientales tales como la reducción de emisiones y ahorro de energía (Anderson et al, 2008). La mejora en la trabajabilidad resulta en beneficios constructivos, como la posibilidad de pavimentar a bajas temperaturas, recorrer mayores distancias de acarreo de la mezcla, mejor compactación, y mayor uso de pavimento reciclado (D'Angelo et al, 2007).

La disminución en la temperatura de producción de las mezclas asfálticas también provoca una reducción en el envejecimiento del ligante asfáltico, lo cual puede causar mayor flexibilidad y resistencia al agrietamiento durante la vida de servicio del pavimento. Sin embargo, existe la preocupación de que un ligante asfáltico potencialmente más suave podría contribuir a la pérdida de estabilidad en climas calientes y aumentar la susceptibilidad al ahuellamiento (Newcomb, 2006). Además, ya que algunas mezclas tibias utilizan agua para mejorar la trabajabilidad, éstas podrían ser más propensas al daño por humedad (Anderson et al, 2008).

Mientras las agencias de estado han empezado la transición de un método de diseño de pavimentos empírico a uno mecanístico-empírico, se ha vuelto necesario evaluar a fondo las propiedades de los materiales y las características estructurales de las mezclas tibias. Esta información es importante para predecir con exactitud el desempeño del pavimento y así diseñar estructuras más eficientes, ya que el método mecanístico-empírico se apoya en modelos mecanísticos que calculan las respuestas estructurales (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) basados en propiedades de los materiales, condiciones climáticas y de carga, así como en modelos empíricos que predicen el desempeño del pavimento a partir de las respuestas calculadas y las propiedades de los materiales.

## **OBJETIVO**

El objetivo de este estudio fue evaluar las respuestas estructurales y el desempeño a corto plazo de secciones de mezclas tibias bajo ensayos acelerados a escala natural.

## **ALCANCE**

Para lograr el objetivo planteado, se construyeron tres secciones instrumentadas a escala natural en la pista de pruebas del National Center for Asphalt Technology (NCAT): una sección de control y dos secciones WMA. Todas las secciones tuvieron el mismo diseño estructural, así

como el mismo diseño de mezcla, variando únicamente la temperatura de producción. Se realizaron pruebas de deflectometría periódicamente para cuantificar el efecto ambiental sobre el módulo de la capa asfáltica. También se obtuvieron mediciones de deformación unitaria y presión aproximadamente una vez por semana bajo condiciones de carga y en diferentes condiciones climáticas. El desempeño en campo fue monitoreado semanalmente.

Se realizaron comparaciones entre las secciones por medio de regresiones estadísticas de cada una de las propiedades medidas contra la temperatura a la profundidad media del pavimento en cada una de las secciones. Se realizaron pruebas de hipótesis a los coeficientes de las regresiones con un nivel de confiabilidad del 95% para determinar si las tendencias eran similares entre las secciones. Adicionalmente, se utilizó una prueba de Tukey posterior al análisis de varianza con un nivel de significancia del 5% para comparar las respuestas medidas a una temperatura de referencia. La explicación detallada de los procedimientos estadísticos utilizados está más allá del alcance de este trabajo y puede encontrarse en otras fuentes bibliográficas (Devore, 2000).

## PISTA DE PRUEBAS Y SECCIONES

Este estudio se basó en datos de la Fase IV de la pista de pruebas del NCAT. La pista de pruebas del NCAT es un circuito cerrado de ensayos acelerados a escala natural con una longitud de 2.7 km y se localiza en Opelika, Alabama. Una flota de camiones opera cinco días a la semana durante 16 horas al día, aplicando un total de 10 millones de ejes equivalentes de 40 kN (ESALs) a lo largo de un período de dos años. Las secciones de prueba tienen una longitud de 60 m y fueron construidas entre julio y agosto de 2009. La aplicación del tráfico inició el 28 de agosto de 2009 y concluyó el 30 de setiembre de 2011.

Las secciones estudiadas consistieron en una sección de control de mezcla asfáltica en caliente y dos secciones de mezclas tibias; una de ellas producida con asfalto espumado (WMA-F) y la otra con la incorporación de un aditivo (WMA-A). Durante la construcción, en cada sección se instalaron sensores para medir la deformación unitaria horizontal de la capa asfáltica, así como la presión vertical en la base granular y en la subrasante. Además, cada sección contó con cuatro sensores para medir la temperatura en la superficie, el medio y el fondo de la capa asfáltica, y 7.5 cm bajo la superficie de la capa de base granular. La configuración detallada de la instrumentación se encuentra descrita en otras fuentes (Timm, 2009).

En todas las secciones la mezcla asfáltica se colocó en tres capas: una capa superficial con un tamaño nominal máximo (NMAS) de 9.5 mm, y una capa intermedia y una de base, cada una con un NMAS de 19.0 mm. Las capa superficial e intermedia utilizaron un ligante con grado de desempeño PG 76-22, mientras que la capas base utilizó PG 67-22. Todas las mezclas se produjeron en la misma planta. Cada capa se colocó en el mismo día para las tres secciones en un proceso continuo, manteniendo los ajustes de la planta constantes y variando solamente la temperatura de producción. La Tabla 1 muestra las temperaturas de producción de cada sección.

**Tabla 1: Temperaturas de producción**

Capa Asfáltica	Temperatura de Producción (°C)		
	Control	WMA-F	WMA-A
Superficie	168	135	121

Intermedia			
Base	163		

Todas las secciones se diseñaron con un espesor de la capa asfáltica de 17.8 cm, sobre 15.2 cm de base granular y con una subrasante rígida. Las pequeñas diferencias presentadas en los espesores medidos en campo producto de la variabilidad del proceso constructivo se tomaron en cuenta para ajustar las mediciones de presión vertical obtenidas.

## MEDICIONES DE CAMPO

Durante la aplicación de tráfico, se tomaron mediciones de deformación unitaria y presión bajo condiciones de carga aproximadamente una vez por semana y bajo diferentes condiciones climáticas. Una flota de cinco camiones operaba durante 16 horas al día, cinco días a la semana. En cada fecha de recolección de datos, se obtuvieron tres pasadas de cada camión que viajaba a aproximadamente 70 km/h, junto con las temperaturas del pavimento.

Las deformaciones unitarias horizontales se midieron en el fondo de la capa asfáltica en las direcciones longitudinal (dirección del tráfico) y transversal (perpendicular al tráfico). Las presiones verticales se midieron en la superficie de la base granular y en la superficie de la subrasante. Este estudio se concentró solamente en la deformación unitaria longitudinal y la presión vertical en la subrasante. La deformación longitudinal se seleccionó ya que en estudios previos realizados en esta pista de pruebas se ha mostrado que las deformaciones unitarias longitudinales son aproximadamente 36% más altas que las medidas transversales (Priest y Timm, 2006). Se utilizó la presión en la subrasante ya que los procedimientos clásicos de diseño de pavimentos se basan en limitar las respuestas verticales en la superficie de la subrasante para prevenir el ahuellamiento (Haddock, 2002). Los datos se subdividieron por tipo de eje (simple delantero, simple, tándem). Sólo los ejes simples (no delanteros) se presentan en este estudio ya que representan la mayoría de pasadas de eje en cada sección. Adicionalmente, los valores corresponden a la "mejor medición" en cada sección para cada fecha, el cual se definió como el percentil 95 de las mediciones obtenidas en una fecha dada.

Las pruebas de deflectometría se realizaron tres veces al mes para cuantificar el efecto ambiental sobre el módulo del pavimento. Los ensayos se realizaron en tres puntos predeterminados para cada sección. En cada punto, se midieron las deflexiones en el interior, medio y exterior del carril. Se utilizó un deflectómetro de impacto (FWD por sus siglas en inglés) con nueve geófonos espaciados a 0, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 y 180 cm del centro de la carga, con un plato de carga de 15 cm de radio para asegurar un bien asentamiento sobre la superficie del pavimento. Se realizaron tres repeticiones a tres niveles de carga (aproximadamente 26, 40, 53 y 71 kN) en cada punto y se obtuvieron las temperaturas a la profundidad media del pavimento al momento del ensayo. Los datos mostrados en este estudio corresponden a las mediciones obtenidas con la carga de 40 kN. Los módulos del pavimento se recalcularon a partir de las deformaciones utilizando el programa EVERCALC 5.0 para una estructura de tres capas (mezcla asfáltica, base granular y subrasante). Como se utilizó la misma base y subrasante en las tres secciones, el estudio se concentra solamente en los módulos de la capa asfáltica. Los resultados se filtraron para eliminar datos con errores mayores al 3%.

## Deformación unitaria y presión

Se utilizó la temperatura a la profundidad media del pavimento para establecer una correlación entre las respuestas medidas (deformación unitaria y presión) y temperatura. Estudios previos efectuados en la pista de pruebas del NCAT han mostrado la efectividad de utilizar la temperatura a la profundidad media para estas correlaciones (Priest y Timm, 2006; Willis y Timm, 2009). La relación entre estos parámetros sigue una función exponencial, como se muestra en la Ecuación 1:

$$\text{respuesta} = k_1 e^{k_2 T} \quad (1)$$

donde respuesta = respuesta del pavimento (deformación unitaria o presión en la subrasante (kPa)); T = temperatura a la profundidad media de la capa asfáltica (°C); y  $k_1$ ,  $k_2$  = coeficientes de regresión específicos de cada sección.

Las Figuras 1 y 2 muestran la deformación unitaria longitudinal y le presión vertical en la subrasante en función de la temperatura a la profundidad media para cada una de las secciones. Para determinar si las relaciones temperatura-respuesta eran estadísticamente similares entre las secciones, se realizaron pruebas de hipótesis al intercepto ( $k_1$ ) y la pendiente ( $k_2$ ). Al 95% de confiabilidad, no hubo evidencia de que los coeficientes de regresión de las secciones WMA fueran diferentes a los de la de control.

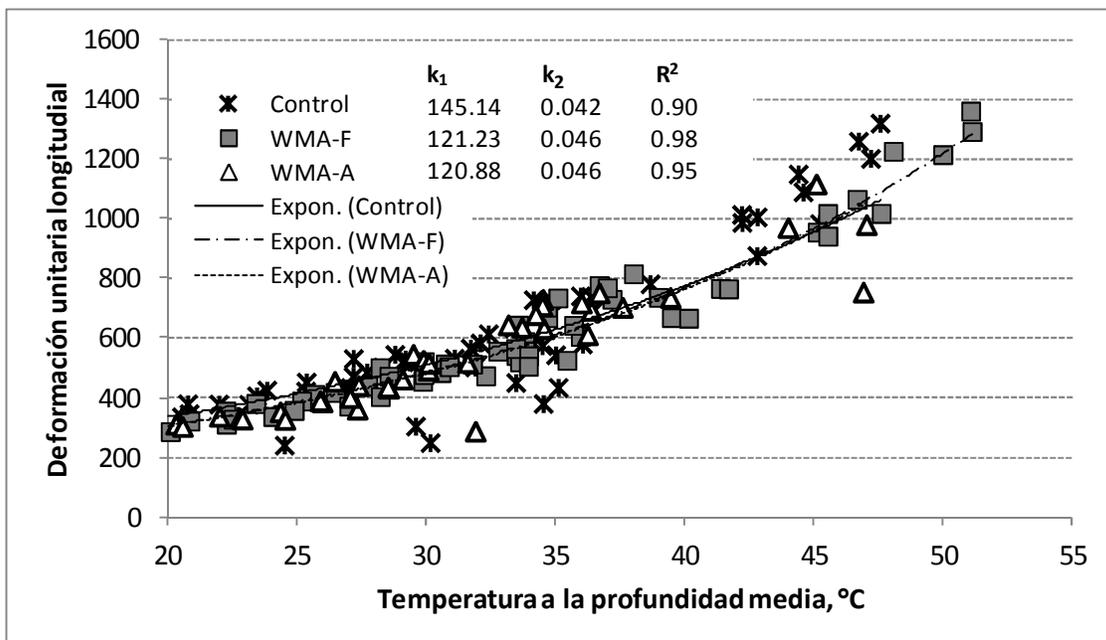


Figura 1: Deformación longitudinal en función de la temperatura

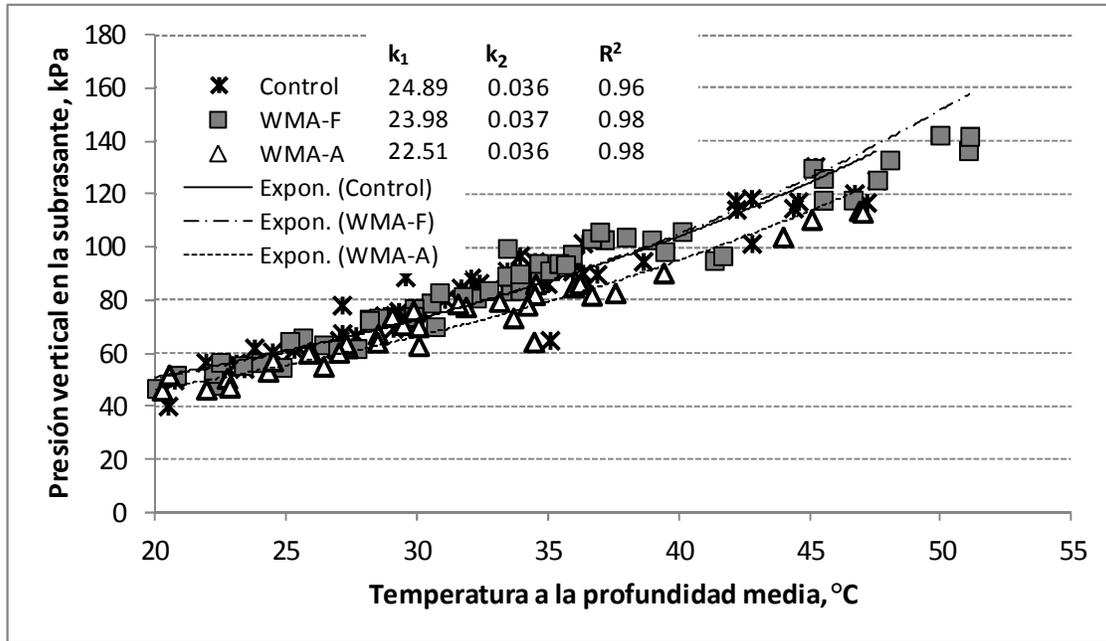


Figura 2: Presión vertical en función de la temperatura

Para poder comparar las diferentes secciones de manera justa, fue necesario normalizar las respuestas a una temperatura de referencia de 20°C dividiendo la Ecuación 1 con temperatura de referencia ( $T_{ref}$ ) entre la misma ecuación con la temperatura medida ( $T_{med}$ ) y despejando la respuesta normalizada (respuesta $_{T_{ref}}$ ), como se muestra en la Ecuación 2.

$$respuesta_{T_{ref}} = respuesta_{T_{med}} e^{k_2(T_{ref}-T_{med})} \quad (2)$$

Dado que las presiones también dependen del espesor de las capas del pavimento, fue necesario aplicar una corrección para representar las pequeñas diferencias en los espesores reales. Los factores de corrección se obtuvieron basados en relaciones teóricas entre el espesor de capa y la presión vertical de acuerdo al análisis elástico lineal. Cada sección se modeló utilizando el programa WESLEA; los módulos de las capas se recalcularon a partir de datos de deflectometría y los espesores de capa se variaron en incrementos de 1.25 cm desde 14 cm hasta 20 cm para la capa asfáltica y de 7.5 cm hasta 19 cm para la capa de base granular. Las respuestas se graficaron contra los espesores de las capas y se obtuvo una curva de mejor ajuste utilizando una función potencial, tal y como se observa en la Ecuación 3.

$$respuesta = aH^b \quad (3)$$

donde respuesta = deformación unitaria o presión en la subrasante (kPa); H = espesor de la capa asfáltica o de base granular (cm); y a, b = coeficientes de regresión. El factor de corrección se encontró dividiendo el lado derecho de la Ecuación 3 con el espesor de referencia ( $H_{ref}$ ) por el mismo término con el espesor medido ( $H_{med}$ )

$$FC = \frac{H_{ref}^b}{H_{med}^b} \quad (3)$$

donde  $H_{ref}$  = espesor de referencia (17.8 cm para la capa asfáltica y 15.2 cm para la base granular);  $H_{med}$  = espesor de la capa medido en el centro de la configuración de sensores (cm); y  $b$  = coeficiente de regresión específicos de cada sección. Aunque las diferencias durante la construcción fueron sutiles, esta corrección permite una comparación más adecuada de las secciones.

La Figura 3 representa el promedio de las deformaciones unitarias longitudinales y de las presiones verticales normalizadas por temperatura y corregidas por espesor. Se realizó una prueba de Tukey posterior al análisis de varianza para comparar las secciones y se encontró que, a un nivel de confianza del 95%, las deformaciones unitarias de las secciones WMA fueron significativamente menores que las de la sección de control. En el caso de la presión vertical, sólo la sección WMA-A exhibió valores estadísticamente menores que los de la sección de control.

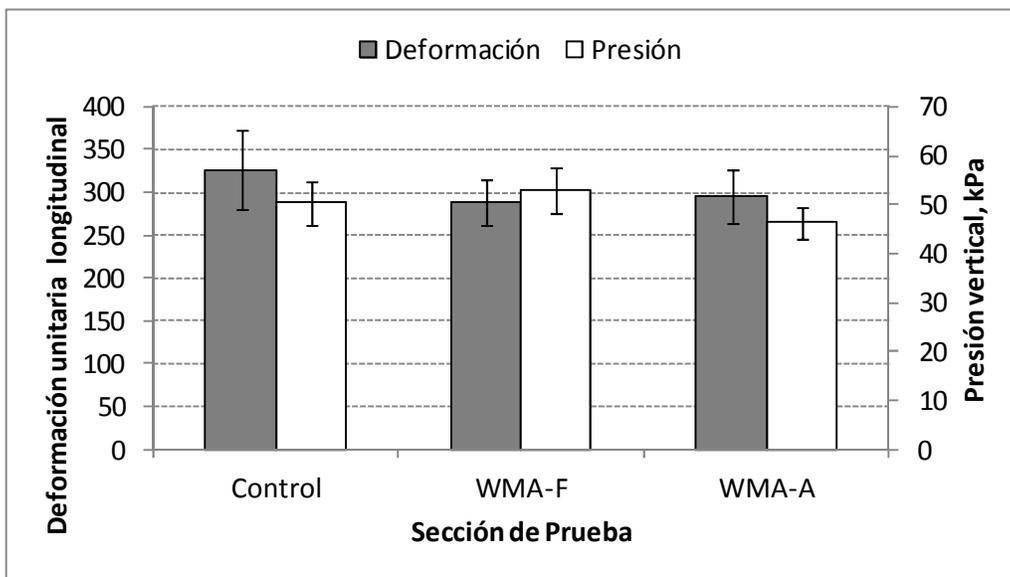


Figura 3: Deformación unitaria longitudinal y presión vertical promedio a 20°C

### Módulo retrocalculado de la capa asfáltica

El módulo retrocalculado de la capa asfáltica obtenido a partir de ensayos de deflectometría también depende de la temperatura a la profundidad media del pavimento y sigue una función similar a la presentada en la Ecuación 1. Los módulos de cada sección y los coeficientes de regresión se muestran en la Figura 4. Se realizaron pruebas de hipótesis al intercepto ( $k_1$ ) y a la pendiente ( $k_2$ ) y se encontró que la sección WMA-F tuvo menor intercepto y mayor pendiente que la sección de control, lo cual significa que esta sección tuvo valores de módulo ligeramente más bajos que los de control a todas las temperaturas bajas.

La Figura 5 muestra el promedio de los módulos normalizados a una temperatura de 20°C, utilizando el mismo procedimiento aplicado a las mediciones de deformación unitaria y presión. El análisis estadístico indicó que existieron diferencias significativas entre la sección de control y las secciones WMA. Sin embargo, desde un punto de vista práctico, dichas diferencias no excedieron el 10% y por lo tanto pueden considerarse comparables.

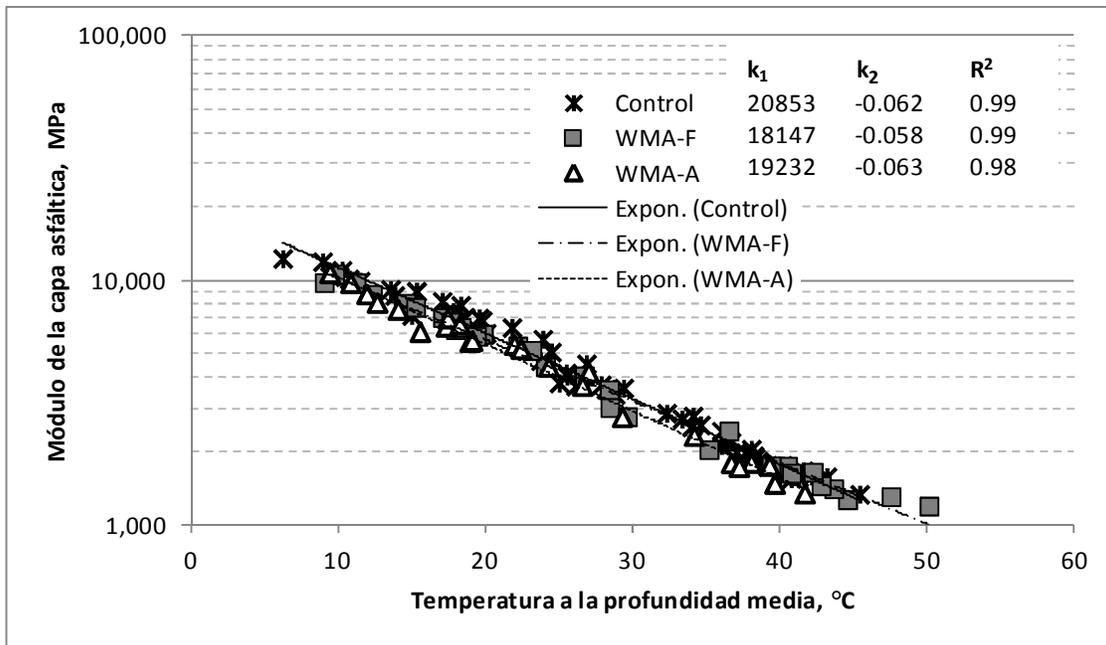


Figura 4: Módulo de la capa asfáltica en función de la temperatura

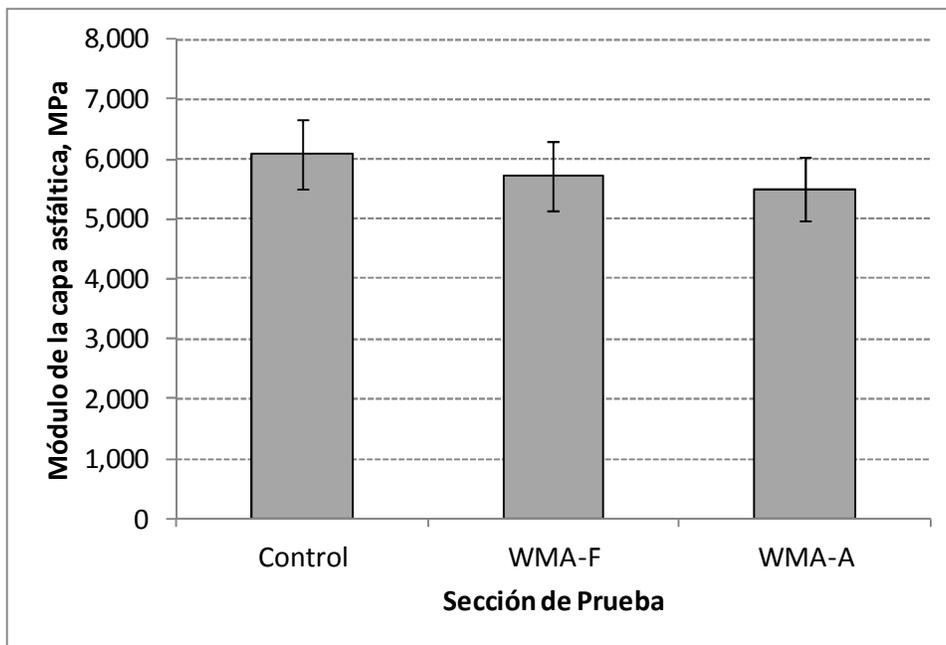


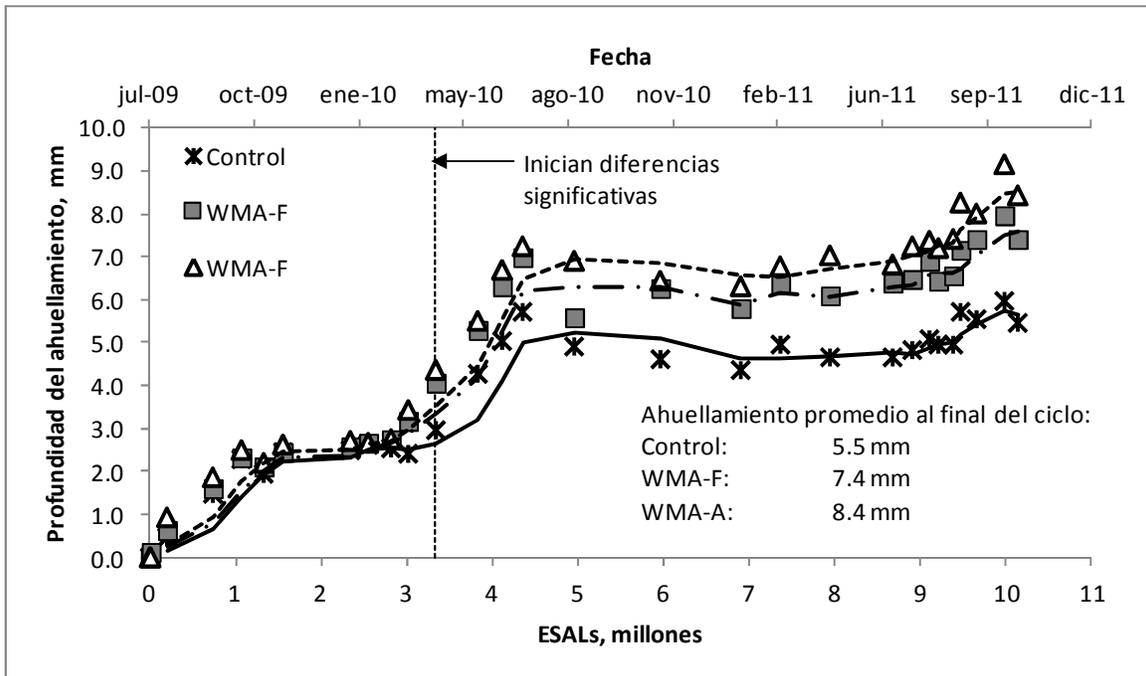
Figura 5: Módulo de la capa asfáltica promedio a 20°C

## DESEMPEÑO

Todas las secciones fueron evaluadas en campo periódicamente para estudiar su desempeño. Dichas evaluaciones se realizaron en los 45 metros centrales de las secciones de 60 metros para eliminar los efectos de las transiciones cerca de los extremos. Las profundidades de ahuellamiento se midieron aproximadamente una vez al mes mediante el método del

Departamento de Transportes de Alabama. Además, las secciones se inspeccionaron visualmente cada semana para identificar la formación de grietas.

La progresión del ahuellamiento se muestra en la Figura 6. Las líneas representan Puede observarse que al inicio las deformaciones se acumularon rápidamente y de manera similar para las tres secciones. Conforme se aplicaron más ejes equivalentes, las diferencias se volvieron más acentuadas. El análisis indicó que las diferencias estadísticamente significativas empezaron a distinguirse al aplicarse aproximadamente 3.3 millones de ESALs, en Mayo de 2010.



La Figura 6 también incluye la deformación permanente promedio al final del ciclo de investigación. Se encontró que el ahuellamiento en las secciones WMA fue igual o mayor al de la sección de control. Sin embargo, es importante enfatizar que el desempeño de las secciones fue bueno y que los resultados se encontraron muy por debajo de los 12.5 mm, considerado el límite aceptable en Alabama.

Al concluir el ciclo de investigación no se había observado agrietamiento en ninguna de las secciones. Esto impide que se pueda realizar una comparación directa de campo entre la sección de control y las secciones WMA. Por este motivo se recomendó mantener estas secciones en funcionamiento durante el siguiente ciclo (2012 - 2014), a fin de obtener una evaluación más completa.

## CONCLUSIONES

Este estudio evaluó las respuestas estructurales de secciones construidas con mezcla asfáltica tibia bajo cargas a escala natural y su desempeño en términos de ahuellamiento y agrietamiento. Se encontró que las secciones WMA tuvieron deformaciones unitarias y presiones menores que la

sección de control, y aunque se identificaron diferencias estadísticamente significativas, desde una perspectiva práctica, los módulos de las secciones WMA pueden considerarse comparables a los de la sección de control. La relación módulo-temperatura de cada sección fue consistente con las tendencias observadas para deformación permanente y presión en función de la temperatura. El uso de tecnologías WMA parece haber aumentado la susceptibilidad de las mezclas a la deformación permanente. Sin embargo, luego de 2 años de operación y 10 millones de ejes equivalentes aplicados, las tres secciones se habían desempeñado de manera satisfactoria, con menos de 12.5 mm de ahuellamiento. Se recomienda aplicar más tráfico a las secciones a fin de poder evaluar también la resistencia al agrietamiento y posteriormente realizar ensayos de carácter forense para poder observar el efecto de las tecnologías WMA más allá de la superficie.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean agradecer a los siguientes Departamentos de Transporte por su cooperación y apoyo a este estudio: Alabama, Florida, North Carolina, South Carolina, Oklahoma y Tennessee. De igual manera se agradece a la Federal Highway Administration por su constante apoyo.

## **REFERENCIAS**

- Anderson, R.M. Baumgardner, G. May, R. & Reinke, G. (2008). Engineering Properties, Emissions, and Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies. NCHRP 9-47 Interim Report, Transportation Research Board of the National Academies.
- D'Angelo, J. Harm, E. Bartoszek, J. Baumgardner, G. Corrigan, M. Cowser, J. Harman, T. Jamshidi, M. Jones, W. Newcomb, D. Prowell, B. Sines, R. & Yeaton, B. (2007). Warm-Mix Asphalt: European Practice. International Technology Scanning Program, Federal Highway Administration.
- Devore, J.L. (2000). Probability and Statistics for Engineering and the Sciences. Duxbury Thomson Learning, California.
- Haddock, J.E. Hand, A.J. & Fang, H. (2002). Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements. NCHRP Report 468, National Academy Press, Washington D. C.
- Newcomb, D. (2006). An Introduction to Warm Mix Asphalt. National Asphalt Pavement Association.
- Priest, A.L. & Timm, D.H. (2006). Methodology and Calibration of Fatigue Transfer Functions for Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design. NCAT Report 06-03, National Center for Asphalt Technology, Auburn University.
- Timm, D.H. (2009). Design, Construction and Instrumentation of the 2006 Test Track Structural Study. NCAT Report 09-01, National Center for Asphalt Technology, Auburn University.
- Willis, J.R. & Timm, D.H. (2009). Field-Based Strain Thresholds for Flexible Perpetual Pavement Design. NCAT Report No. 09-09, National Center for Asphalt Technology, Auburn University.