

IAG137-04-2013
SEGREGACIÓN TÉRMICA: CAUSAS Y EFECTOS EN LA DENSIDAD EN SITIO Y LA VIDA DE FATIGA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS
A SEGREGAÇÃO TÉRMICA: CAUSAS E EFEITOS SOBRE A DENSIDADE LOCAL E DESEMPENHO EM FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Ing. Sergio Fernández Cerdas MSc.
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Cartago, Costa Rica
sefernandez@itcr.ac.cr

Ing. Donald Watson P.E
Centro Nacional para la Tecnología del Asfalto NCAT
Auburn, Alabama, Estados Unidos
watsode@auburn.edu

Saeed Maghsoodloo, PhD
Centro Nacional para la Tecnología del Asfalto NCAT
Auburn, Alabama, Estados Unidos
maghssa@auburn.edu

Resumen

Investigaciones previas han demostrado que la pérdida excesiva de la temperatura de las mezclas asfálticas en caliente durante el transporte y las operaciones de pavimentación pueden causar una reducción significativa en su consistencia y por lo tanto, en su habilidad para ser compactada apropiadamente. Este fenómeno ha sido llamado segregación térmica.

Veinte y ocho proyectos de pavimentación fueron evaluados en el estado de Alabama. Perfiles termo-gráficos de la mezcla asfáltica antes de su compactación fueron obtenidos con ayuda de una barra infrarroja. Para cada uno de los proyectos, se registraron aquellas variables relacionadas con el proceso constructivo y con la composición de la mezcla que pudieran tener un efecto significativo en la falta de uniformidad de la temperatura de compactación. De acuerdo a un modelo lineal general desarrollado (GLM), fue posible demostrar que las operaciones de remezclado brindadas por algunos dispositivos de transferencia de mezcla asfáltica durante la construcción son el factor más significativo en la reducción de los altos diferenciales de temperatura.

Varias muestras fueron extraídas de cada una de las divisiones que componen el Departamento de Transportes del estado de Alabama con el fin de evaluar el efecto de la segregación térmica en las densidades en sitio. Núcleos de mezcla asfáltica compactada fueron obtenidos de los puntos donde la mezcla asfáltica fue colocada a temperaturas frías (áreas frías) y a temperaturas normales (áreas normales). Los resultados indicaron un efecto negativo de la segregación térmica

en las densidades en sitio obtenidas. Adicionalmente, se recolectaron muestras en sitio para comparar el desempeño por fatiga en el laboratorio entre las “áreas frías” y “normales”. La rigidez inicial fue el único parámetro afectado por los altos índices de vacíos obtenidos de las áreas frías llevando a la conclusión de que dichas áreas presentan una mayor susceptibilidad a sufrir agrietamientos por fatiga.

Resumo

Estudos anteriores mostraram que a excessiva perda de temperatura da mistura de asfalto a quente durante as operações de transporte e pavimentação pode causar uma redução significativa em sua consistência e, conseqüentemente, em sua capacidade de ser devidamente compactada. Esse fenômeno tem sido chamado de segregação térmica.

Vinte e oito projetos de pavimentação foram avaliados no estado do Alabama. Perfis termográficos da mistura de asfalto antes da compactação foram obtidos utilizando raios infravermelhos. Para cada um dos projetos, foram registradas variáveis relacionadas ao processo de construção e à composição da mistura que pudessem ter um efeito significativo sobre a falta de uniformidade da temperatura de compactação. De acordo com um modelo linear geral desenvolvido (GLM) foi possível demonstrar que as operações de re-mistura proporcionadas por dispositivos de transferência de mistura asfáltica durante a construção são o fator mais importante na redução dos elevados diferenciais de temperatura.

Várias amostras foram extraídas de cada uma das divisões que compõem o Departamento de Transportes do Estado do Alabama, a fim de avaliar o efeito de segregação térmica em densidades em campo. Núcleos de mistura asfáltica compactada foram obtidos nos pontos onde a mistura de asfalto foi colocada em temperaturas frias (áreas frias) e em temperaturas normais (áreas normais). Os resultados indicaram um efeito negativo da segregação térmica nas densidades obtidas em campo. Além disso, foram re-coletadas amostras em campo para comparar o desempenho por fadiga em laboratório entre as "áreas frias" e "áreas normais". Isto em termos de ciclos de fadiga, rigidez inicial e energia de fratura. A rigidez inicial foi o único parâmetro afetado pelos altos índices de vazios obtidos nas áreas frias, o que levou à conclusão de que essas áreas têm uma maior susceptibilidade a sofrer trincas por fadiga.

INTRODUCCION

En 1995, el Centro de Transportes del Estado de Washington en los Estados Unidos desarrollo un proyecto de investigación (Willoughby et al, 2001) enfocado en el estudio de la segregación del agregado en las mezclas asfálticas. Durante el estudio, los investigadores identificaron zonas de baja densidad en puntos donde no se detectó segregación del agregado. Los problemas de densidad fueron atribuidos a la falta de uniformidad de la temperatura del material bituminoso previo a su compactación. Desde entonces, este problema es llamado “segregación térmica”.

Durante los últimos 15 años, varias instituciones dedicadas a la investigación en la temática de mezclas bituminosas han intentado identificar las causas de la segregación térmica y a su vez, recomendar algunas prácticas constructivas que permitan minimizar la pérdida de temperatura de las mezclas durante su transporte y colocación. Además, los efectos negativos de la segregación térmica en la densidad en sitio y en el desempeño de la mezcla asfáltica en campo ha sido una temática propuesta y de interés para algunos investigadores. A pesar de esto, son pocos los

estudios que han reportado resultados sobre las consecuencias de la segregación térmica en el desempeño de la mezcla asfáltica debido a la ausencia de herramientas que permitan localizar las zonas donde la mezcla fue compactada a temperaturas bajas y en donde varios testigos pudieran ser obtenidos para su posterior evaluación volumétrica y mecánica.

ALCANCE DEL PROYECTO

El presente proyecto fue ejecutado en dos etapas. La primera etapa consistió en una evaluación en sitio de 28 proyectos de pavimentación en el estado de Alabama. El estado de Alabama está compuesto por 9 divisiones. Tres proyectos por división fueron seleccionados como parte del presente proyecto (para una de las divisiones, se evaluaron 4 proyectos). Esta primera etapa permitió determinar cuáles factores contribuyeron de forma más significativa con la acelerada pérdida de la temperatura de compactación durante el transporte y la colocación de la mezcla. Un proyecto por división fue seleccionado para realizar el análisis de compactación en campo y el análisis de fatiga en el laboratorio. Para el análisis de compactación, testigos de mezcla asfáltica fueron extraídos de “áreas frías” y “áreas normales” con ayuda de un GPS incorporado a la barra infrarroja utilizada. Las “áreas frías” fueron definidas como aquellas áreas donde la diferencia entre la temperatura medida por la barra infrarroja y la temperatura de compactación objetivo de la mezcla era de 28°C o mayor. Las “áreas normales” fueron definidas como las áreas donde el material era colocado a diferenciales de temperatura menores a 28°C con respecto a la temperatura de compactación objetivo. Hecho esto, fue posible comparar los porcentajes de compactación obtenidos para ambas áreas y así, concluir sobre los efectos reales de las áreas segregadas térmicamente en la densidad en sitio de la mezcla asfáltica.

La segunda etapa consistió en analizar los efectos de los vacíos de aire en el desempeño por fatiga de las mezclas asfálticas en el laboratorio como consecuencia de la compactación de la mezcla asfáltica a bajas temperaturas. Tres parámetros fueron seleccionados para este propósito: el número de ciclos por fatiga, la rigidez inicial y la energía de fractura.

METODOLOGÍA

Recolección de información y evaluación en campo

Los proyectos evaluados fueron seleccionados de manera que se evaluarán diferentes tipos de mezcla asfáltica así como capas superficiales o bases asfálticas con espesores uniformes. De igual forma, se seleccionaron proyectos cuya longitud cubriera un mínimo de aproximadamente 760 m para garantizar representatividad de las lecturas realizadas por la barra infrarroja. Únicamente se evaluó la pavimentación de carriles principales bajo cargas de tráfico constantes. La información recopilada para cada proyecto utilizada en la evaluación en campo se presenta en la Tabla 1.

Una barra infrarroja fue utilizada para obtener perfiles termo-gráficos de la mezcla asfáltica en tiempo real. El equipo está compuesto por una barra la cual cuenta con varios sensores de temperatura espaciados a cada 30 cm. Cada sensor toma una lectura de temperatura sobre la mezcla colocada a cada 1,80 m. Este dispositivo se complementa además por un sistema de posicionamiento global (GPS) el cual permitió ubicar la posición exacta de las “áreas frías” y “normales” para el análisis de compactación en campo.

Una vez que la evaluación era finalizada, fue posible obtener los niveles de segregación térmica para cada proyecto con ayuda de un software diseñado para este propósito. Dicha herramienta reporta el número de perfiles “sin segregación térmica”, “segregación térmica moderada” y “segregación térmica severa” como un porcentaje del número total de perfiles obtenidos según los niveles de segregación establecidos por el Departamento de Transportes de Texas (TxDOT, 2004) de la siguiente manera:

- Sin segregación térmica: áreas donde los diferenciales de temperatura son menores que 14°C.
- Segregación térmica moderada: áreas donde el máximo diferencial de temperatura es mayor a 14°C pero no excede 28°C.
- Segregación térmica severa: áreas que presentan un máximo diferencial de temperatura mayor a 28°C.

Un modelo lineal general (GLM) fue ejecutado a un 95% de confiabilidad (valor $p \leq 0,05$) para identificar los parámetros más significativos en el desarrollo de las áreas térmicamente segregadas durante las operaciones de pavimentación. Para este estudio, se tomó como variable dependiente los diferentes niveles de segregación térmica obtenidos con la barra infrarroja. Por su parte, las variables independientes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Variables independientes Modelo Lineal General

Variables independientes	Categorías	Número de proyectos
Equipo de transferencia MTD / re-mezclado MRD	Dispositivo de re-mezclado “A”	16
	Dispositivo de re-mezclado “B”	2
	Dispositivo de re-mezclado “C”	9
	No MRD/MTD “D”	1
Tipo de mezcla asfáltica	Mezcla asfáltica en caliente de graduación densa	21
	Mezcla asfáltica en tibio	3
	Stone-Matrix Asphalt Graduación intermedia	3
	Mezclas de fricción porosas Graduación abierta	1
Tipo de capa / Tamaño máximo del agregado MAS	Base asfáltica 25,4 mm MAS	3
	Superficial / Base asfáltica 19,0 mm MAS	14
	Superficial 12,5 mm MAS	9
	Superficial 9,5 mm MAS	2
Tiempo de transporte	≤ 20 min	4
	$21 \text{ min} \leq \text{HT} \leq 40 \text{ min}$	10
	$> 40 \text{ min}$	14
Tiempo del día	Diurno	23
	Nocturno	5
Paradas de pavimentadora (*)	Tiempo acumulado en minutos	28
Velocidad de pavimentadora (*)	Velocidad en m/min	28

(*): Medido por el software de la barra infrarroja

Comparaciones múltiples Tukey-Kramer fueron aplicadas a los factores más significativos a un nivel de confiabilidad de 95% para determinar aquellas medias que eran significativamente

diferentes para cada variable. Esto permitiría definir, por ejemplo, cuáles tipos de camión de transferencia o re-mezclado o qué tipos de mezcla asfáltica eran más susceptibles a sufrir de segregación térmica.

Un mínimo de tres testigos por proyecto fueron extraídos de las “áreas frías” y “normales”. Los puntos de extracción fueron identificados con un GPS de uso recreacional (± 3 m de exactitud) basado en la ubicación reportada por el GPS de la barra infrarroja. Los testigos fueron obtenidos durante el primer mes después de colocada la mezcla. La densidad en sitio fue determinada como un porcentaje de la gravedad específica máxima teórica (%Gmm) según AASHTO T-166 y AASHTO T-209. Pruebas t-student de dos muestras (95% de confianza) fueron ejecutadas para examinar si las densidades en sitio obtenidas de las “áreas normales” eran significativamente diferentes que las obtenidas de las “áreas frías”.

Evaluación de desempeño por fatiga en el laboratorio

Muestras de mezcla asfáltica suelta fueron obtenidas de 9 proyectos (un proyecto por cada división) para la ejecución de ensayos de fatiga en vigas según AASHTO T-321. Para cada uno de los proyectos, se compactaron ocho vigas. Cuatro de las ocho vigas fueron compactadas según el porcentaje de vacíos obtenido para las “áreas frías” (± 1.0 % de diferencia) mientras que las cuatro restantes fueron densificadas a un índice de vacíos correspondiente a las “áreas normales”. Cada viga fue compactada a la temperatura de compactación determinada en campo utilizando un compactador de vigas.

Un análisis de regresión fue ejecutado para estudiar la relación entre el número de ciclos de fatiga, la rigidez inicial de la mezcla y el porcentaje de vacíos para cada nivel de deformación ($300\mu\text{m}$ y $600\mu\text{m}$) a un 95% de confianza.

Finalmente, se realizaron ensayos de tensión indirecta según las secciones 7, 8 y 11 del método normalizado AASHTO T-283. Este ensayo fue seleccionado ya que después del análisis de fatiga en vigas de concreto asfáltico realizado para los primeros cuatro proyectos, fue posible concluir que dicho ensayo no era sensible a los cambios en los contenidos de vacíos. Para esto, fue necesario extraer testigos de campo adicionales para los primeros cuatro proyectos. Dichas muestras reportaban edades de 11 a 12 meses, excepto en uno de los proyectos donde se registró 5 meses de edad. Para el resto de los proyectos, los mismos testigos utilizados para el análisis de compactación fueron utilizados para la determinación de la energía de fractura.

Una vez obtenidos los datos de esfuerzo y deflexión por tensión de dicho ensayo, fue posible dibujar la curva esfuerzo-deflexión para determinar la energía de fractura definida como el área bajo la curva esfuerzo-deflexión por tensión y calculada utilizando la ecuación 1.

$$FE = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_f} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

Donde:

FE: energía de fractura (kg/cm^2)

$f(\epsilon)$: función matemática que define la curva esfuerzo-deflexión por tensión asumiendo un coeficiente de Poisson de 0,35 a 25 °C (Huang, 2004)

ϵ_0 : cero o deflexión por tensión donde la línea de tendencia interseca el eje “x” (cm/cm)

ϵ_f : deflexión por tensión correspondiente a la falla del espécimen (cm/cm)

Pruebas t-student de dos muestras fueron utilizadas para comparar la energía de fractura de los testigos extraídos de las “áreas frías” y las “áreas normales” a un 95% de confiabilidad. El objetivo fue determinar si la energía necesaria para fracturar un espécimen era estadísticamente mayor para las “áreas normales” con respecto a las “áreas frías”.

RESULTADOS

Evaluación de campo: Modelo Lineal General (GLM)

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos del modelo lineal general (GLM) para los tres diferentes niveles de segregación térmica. Con base en los resultados, la presencia de equipos de transferencia/re-mezclado constituye el parámetro más significativo en el desarrollo de áreas térmicamente segregadas (valor $p \leq 0,05$) seguido del tipo de mezcla asfáltica colocada y el tipo de capa asfáltica/tamaño máximo del agregado para los niveles “sin segregación” y “segregación térmica severa”, respectivamente.

Equipos de transferencia MTD/re-mezclado MRD

Dos equipos re-mezcladores (A y B) y un equipo de transferencia de mezcla asfáltica (C) fueron considerados en el GLM. Sólo un proyecto no consideró la utilización de estos equipos (D). De acuerdo a las comparaciones múltiples de Tukey (Tabla 3), los efectos de ambos camiones re-mezcladores “A” y “B” fueron estadísticamente diferentes con respecto a los camiones que únicamente transfieren mezcla asfáltica a la pavimentadora. Los altos niveles de segregación térmica severa reportados en la Tabla 3 (84,1%) para los proyectos donde se utilizaron equipos de transferencia de material demuestran los efectos negativos de estos equipos con respecto a los camiones re-mezcladores.

La Figura 1 muestra un perfil termo-gráfico típico de un proyecto donde un equipo de transferencia fue utilizado. El perfil muestra una alta variación en la temperatura la cual es explicada por la alta desviación estándar ($\sigma=12,22^\circ\text{C}$) y el amplio rango de temperaturas. Esta variación fue casi tres veces mayor a la obtenida para las mezclas colocadas con equipos re-mezcladores ($\sigma=4,44^\circ\text{C}$).

Otros factores que hacen que los equipos de transferencia sean más susceptibles a producir segregación térmica son la acumulación de mezcla en las alas de la tolva de recepción de la mezcla por varios minutos y la exposición al ambiente de la banda transportadora que lleva la mezcla asfáltica a la pavimentadora. El proceso de re-mezclado brindado por los “augers” internos de los camiones re-mezcladores reducen significativamente los diferenciales de temperatura, aún en proyectos donde los tiempos de acarreo son prolongados (Amirkhanian y Putman, 2006). Adicionalmente, las bandas transportadoras están protegidas con coberturas metálicas y su tolva de recepción de mezcla asfáltica no posee alas ya que ésta es más ancha y permite el movimiento de un mayor volumen de material. Estos resultados demuestran

claramente la efectividad de los camiones re-mezcladores para minimizar los diferenciales de temperatura y por ende, por para reducir potenciales problemas de compactación asociados a pérdida de consistencia de la mezcla. Los resultados concuerdan con lo reportado por Gilbert (Gilbert, 2005).

Tabla 2: Variables independientes Modelo Lineal General

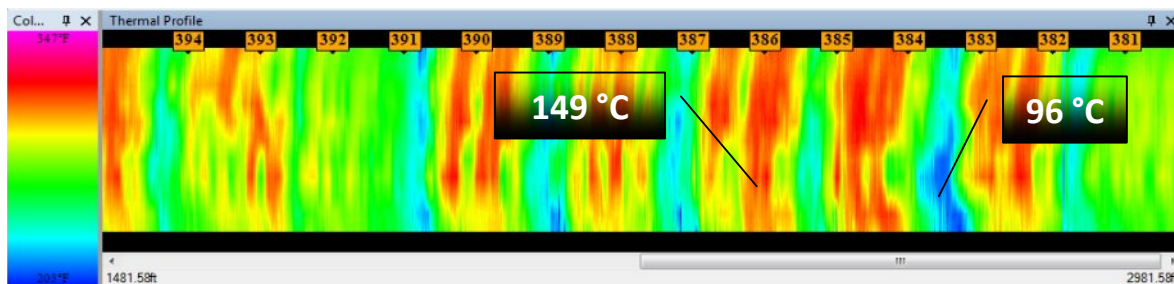
Variables independientes	Grados de libertad	Valor p		
		Sin segregación térmica	Segregación térmica moderada	Segregación térmica severa
		$\Delta T < 14\text{ }^{\circ}\text{C}$	$14\text{ }^{\circ}\text{C} < \Delta T < 28\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T > 28\text{ }^{\circ}\text{C}$
		$R^2 = 66,07\%$	$R^2 = 82,70\%$	$R^2 = 93,40\%$
Velocidad de pavimentadora	1	0,606	0,769	0,296
Paradas de pavimentadora	1	0,887	0,599	0,567
MTD/MRD	3	0,052	0,002	0,000
Tipo de mezcla	3	0,023	0,210	0,114
Tipo de capa-MAS	3	0,131	0,143	0,039
Tiempo de transporte	2	0,246	0,859	0,205
Tiempo del día	1	-	0,816	0,684

Tabla 3: Comparaciones Múltiples de Tukey / MTD-MRD / Segregación térmica severa

Equipos de transferencia/re-mezclado (MTD/MRD)	Media / % Segregación térmica severa	Equipo de re-mezclado A	Equipo de re-mezclado B	Equipo de transferencia C	No MTD / MRD "D"
Equipo de re-mezclado A	22,4		NS	SD	NS
Equipo de re-mezclado B	11,7	NS		SD	SD
Equipo de transferencia C	84,1	SD	SD		NS
No MTD / MRD "D"	69,3	NS	SD	NS	

SD: significativamente diferentes NS: no es significativamente diferente

Figura 1: Perfil termo-gráfico / Equipo de transferencia de mezcla asfáltica $\sigma=12,22^{\circ}\text{C}$



Tipo de capa / Tamaño máximo del agregado MAS / Tipo de mezcla / Tiempo de acarreo

Los resultados obtenidos de las comparaciones múltiples de Tukey para los diferentes tipos de capa y MAS reportaron que los niveles de segregación térmica severa para las bases asfálticas de 25,4 mm colocadas fueron estadísticamente diferentes y mayores que los demás tipos de capa y MAS. Como era esperado, las capas superficiales de 12,5 mm presentaron los niveles más bajos de segregación térmica severa. Estos resultados pueden ser explicados debido a que mezclas

“gruesas” tienden a presentar mayores velocidades de enfriamiento que mezclas “finas” y por lo tanto, son más propensas a la segregación térmica (Gilbert, 2005).

En cuanto al tipo de mezcla asfáltica, la mayor variación de temperatura se presentó para los proyectos donde se colocó mezcla asfáltica en caliente. Esto debido a que en 9 de los 21 proyectos que utilizaron este tipo de mezcla se utilizaron equipos de transferencia. Por otro lado, mezclas asfálticas en tibio y SMA mostraron las menores desviaciones estándar debido a que en la mayoría de estos proyectos se usaron camiones re-mezcladores y que las bajas temperaturas de mezclado de las mezclas asfálticas en tibio ayudan al material a enfriarse más lentamente con respecto a otros tipos. El análisis indica que el tipo de mezcla no es tan significativo como las variables mencionadas anteriormente.

Los tiempos de acarreo fueron arbitrariamente categorizados en tres grupos. Comparando los porcentajes de segregación térmica severa para ambos equipos (MRD y MTD) para tiempos de acarreo mayores a 40 min, se pudo concluir que los porcentajes fueron significativamente más altos para los equipos de transferencia “C” que para los camiones re-mezcladores (65% de diferencia). Por otro lado, los porcentajes de “sin segregación térmica” fueron más altos para aquellos proyectos donde un equipo re-mezclador “A” era utilizado y los tiempos de acarreo eran mayores a 40 min. Esto indica que los camiones re-mezcladores pueden reducir significativamente la segregación térmica, aún en tiempos de acarreo mayores a 40 min.

Análisis de compactación en sitio

De acuerdo a los resultados de las pruebas t-student de dos muestras (Tabla 4), únicamente dos de los proyectos evaluados reportaron una diferencia estadísticamente significativa en la densidad en sitio entre las “áreas frías” y “normales” (valor $p \leq 0,05$). Otros dos proyectos reportaron valores “p” menores a 0,10 lo cual puede ser considerado como una diferencia significativa en densidad entre ambas áreas desde un punto de vista práctico. Otro de los proyectos reportó una diferencia de 2,90% de vacíos de aire lo cual es considerado como una gran diferencia en términos prácticos pero debido a la alta variabilidad de los resultados entre las muestras ensayadas, el valor “p” resultó ser de 0,116. Probablemente, la limitada cantidad de muestras no brindó suficiente evidencia estadística para obtener la diferencia esperada. Además de la falta de uniformidad de la temperatura de la mezcla asfáltica previo a su compactación, se pueden citar otras fuentes de variabilidad tales como la variabilidad durante las actividades de colocación y compactación de las mezclas asfálticas y el grado de exactitud del GPS.

Análisis de fatiga en el laboratorio

Los resultados mostraron una correlación “pobre” entre los vacíos de aire y los ciclos de fatiga obtenidos del ensayo de fatiga en vigas de concreto asfáltico según AASHTO T-321. Esto coincidió con estudios previos (Del Pilar y Haddock, 2006, Mogawer et al, 2010) los cuales demostraron que el número de ciclos de fatiga obtenidos de este ensayo no son afectados significativamente por variaciones en índices de vacíos. Esto puede indicar que existen otros parámetros cuyo efecto es más relevante en la vida de fatiga de una mezcla asfáltica tales como su contenido de asfalto o graduación (Epps y Seeds, 1999). Se cree además que la composición no uniforme de las muestras puede constituir uno de los principales factores que causan una alta variabilidad en los parámetros de fatiga obtenidos (Adedimila y Kennedy, 1995).

Por su parte, la rigidez inicial reportó una relación “estrecha” con los vacíos de aire. Esta relación mostró un incremento en la rigidez de la mezcla asfáltica cuando los vacíos de aire eran disminuidos (Del Pilar y Haddock, 2006, Mogawer et al, 2010). Esto es un indicador de que altos niveles de vacíos causados por la segregación térmica puede reducir significativamente la rigidez de las capas de concreto asfáltico lo que deriva en mayores deformaciones bajo cargas vehiculares con la posterior pérdida de desempeño por fatiga.

Tabla 4: Análisis de compactación de testigos de mezcla asfáltica en sitio

ITEM			Propiedades volumétricas		Resultados estadísticos	
			Áreas frías	Áreas normales	Prueba t-student dos muestras 95% Confianza	
Proyecto	Tipo de mezcla	MAS	% Gmm Promedio	% Gmm Promedio	Valor "p"	Criterio (*)
SR-167	Mezcla asfáltica en caliente	19,0 mm	90,7	92,8	0,027	Diferentes
US-31	Mezcla asfáltica en caliente	19,0 mm	89,3	93,0	0,074	Igual
I-65	SMA Graduación intermedia	12,5 mm	94,9	96,0	0,277	Igual
SR-41	Mezcla asfáltica en caliente	19,0 mm	86,7	90,1	0,089	Igual
SR-10	Mezcla asfáltica en caliente	12,5 mm	90,5	90,6	0,962	Igual
US-35	Mezcla asfáltica en tibio	19,0 mm	91,0	93,9	0,116	Igual
SR-101	Mezcla asfáltica en caliente	12,5 mm	91,3	94,3	0,026	Diferentes
SR-69	Mezcla asfáltica en caliente	9,50 mm	92,6	92,3	0,794	Igual
SR-278	Mezcla asfáltica en caliente	19,0 mm	92,7	93,9	0,165	Igual

(*): las medias son diferentes si valor “p” ≤ 0.05

Era esperado que la energía requerida para fracturar un espécimen extraído de un “área normal” fuera mayor que aquella requerida para fracturar un testigo obtenido de un “área fría”. Aunque este fue el caso en 8 de 9 proyectos, el análisis estadístico reportó que la diferencia entre ambas áreas no era significativa. Las magnitudes y diferencias en densidad reportadas en la Tabla 4 para los primeros cinco proyectos disminuyeron considerablemente. La reducción de las diferencias en densidad es atribuida a la compactación ejercida por el tráfico vehicular. No se encontró ninguna relación entre los diferenciales de temperatura y la energía de fractura a pesar de que algunos proyectos registraron diferencias en densidad mayores a 1,0%.

CONCLUSIONES

Los resultados indican que el uso de equipos re-mezcladores pueden reducir significativamente la presencia de altos diferenciales de temperatura en la mezcla asfáltica previo a su compactación, aún en mezclas que son altamente susceptibles al enfriamiento acelerado así como en proyectos con prolongados tiempos de acarreo. De igual forma, capas asfálticas de 25,4 mm de tamaño máximo de agregado presentaron una susceptibilidad significativa lo cual llevo a concluir que mezclas de graduación “gruesa” tienden a enfriarse más rápidamente que las mezclas “finas” y por lo tanto, son más propensas a sufrir segregación térmica.

Además, el análisis de compactación en sitio demostró que en 7 de los 9 proyectos, los porcentajes de compactación promedio obtenidos de las “áreas frías” eran 1,0% menores que los porcentajes obtenidos para las “áreas normales”, indicando un efecto negativo de la segregación térmica en la compactación de mezclas asfálticas.

Los ensayos de fatiga en vigas resultaron ser insensibles a las variaciones de vacíos de aire utilizados en el estudio. Sin embargo, la rigidez inicial si fue afectada significativamente por los vacíos de aire. Esta afectación resultó en un incremento de la rigidez de la mezcla asfáltica con una disminución de su contenido de aire. A pesar de que la energía de fractura en las “áreas normales” fue ligeramente mayor a las “áreas frías” en 8 de los 9 proyectos, el análisis estadístico no mostro diferencia significativa entre ellas.

En general, los resultados indican que el efecto de los altos diferenciales de temperatura en la vida de fatiga de las mezclas asfálticas no es tan significativo como lo son las propiedades de la mezcla asfáltica.

REFERENCIAS

Alabama Department of Transportation Standard Specifications for Highway Construction 2012

Mogawer, W., J. S. Daniel, and A. Austerman, “Relating Hot-Mix Asphalt Pavement Density to Performance”, University of Massachusetts Dartmouth, April, 2010

Del Pilar Vivar, E., and J. Haddock, “HMA Pavement Performance and Durability”, School of Civil Engineering, Purdue University, Indiana Department of Transportation, April, 2006.

Amirkhanian, S., B. Putman, “Laboratory and Field Investigation of Temperature Differential in HMA Mixtures Using an Infrared Camera”, Civil Engineering Department, Clemson University, August, 2006.

Gilbert, K., “Thermal Segregation”, Colorado Department of Transportation Research Brand, Report No. CDOT-DTD-R-2005-16 Final Report, November, 2005.

Huang, Yang H. “Pavement Analysis and Design”, Pearson Prentice Hall Inc., Second Edition, 2004

Texas Department of Transportation Specifications, 2004, Article 341.4, page 10

Willoughby, K., J. P. Mahoney, “Construction-Related Asphalt Concrete Pavement Temperature Differentials and the Corresponding Density Differentials”, Washington State Transportation Center, University of Washington, Report No. WA-RD 476.1, July, 2001.

Wen, H., “Fatigue Performance Evaluation of Westrack Asphalt Mixtures Based on Viscoelastic Analysis of Indirect Tensile Test”, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, 2001.

Epps, J., S. Seeds, C. Monismith, and C. Ashmore, “Westrack: The Road to Performance – Related Specifications”, Federal Highway Administration, National Cooperative Highway Research Program, October, 1999.

Harvey, J., J. Deacon, Tsai B. Wen, and C. Monismith, “Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and Its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California”, Institute of Transportation Studies, University of California at Berkeley, October, 1995.

Adedimila, A., and T. Kennedy, "Fatigue and Resilient Characteristics of Asphalt Mixtures by Repeater-Load Indirect Tensile Test", Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, Texas State Department of Highways and Public Transportation, August, 1975.