

Determinación rápida de la susceptibilidad térmica del asfalto para el diseño de mezclas asfálticas en caliente*

Setting asphalt temperature viscosity for designing hot-mix asphalt

LUIS GUILLERMO DÍAZ¹ Y ADRIÁN R. ARCHILLA²

1. Profesor asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Profesor asociado de la University of Hawaii at Manoa.

luisg.diaz@escuelaing.edu.co - archilla@hawaii.edu

Recibido: 20/09/2010 Aceptado: 20/10/2010

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

El estándar actual para la determinación de la viscosidad con el viscosímetro rotacional (INV E-717) exige que para cada temperatura a la que se quiera determinar la viscosidad del asfalto se utilicen diferentes muestras de ensayo. Considerando que para la construcción de las curvas de susceptibilidad térmica del asfalto (VTS) es necesario determinar la viscosidad a diferentes temperaturas, se deben ensayar varias muestras.

Para evitar la utilización de muestras diferentes para cada temperatura, se realizó un estudio con el fin de desarrollar una metodología alternativa que permita establecer curvas VTS del asfalto a partir de ensayos de viscosidad efectuados en una sola muestra.

Los resultados indican que las temperaturas de mezcla y compactación estimadas con las curvas VTS, establecidas a partir de la metodología propuesta, son prácticamente iguales a las determinadas siguiendo la normativa vigente, y podrían utilizarse para determinar las características de susceptibilidad térmica de los asfaltos para el diseño de mezclas asfálticas en caliente.

Palabras claves: susceptibilidad térmica, asfalto, viscosidad, viscosímetro, rotacional, mezcla asfáltica.

Abstract

The current test standard for rotational viscosity determination (INV E-717) demands that different test specimens be used to determine viscosity at each temperature of interest. Since the development of the Viscosity-Temperature Susceptibility (VTS) curve of given asphalt binder requires the evaluation of its viscosity at different temperatures, different samples are necessary to gather the required information.

To avoid inconveniences and time losses involved in using different samples for each temperature level, we conducted a study aimed at developing an alternative methodology to determine VTS curves of asphalt binders using only one test specimen.

The results indicate that mixing and compaction temperatures estimated with the VTS curves developed with the proposed methodology yield the same values than those obtained following the current standard. We could use it as an alternative methodology to determine the viscosity-temperature susceptibility characteristics of asphalt binders used for designing hot mix asphalt.

Keywords: thermal susceptibility, asphalt, viscosity, viscometer, rotational asphalt.

* Este trabajo se presentó en inglés durante el 89 Annual Meeting - Transportation Research Board (USA, 2010) y durante las 7 Jornadas Internacionales del Asfalto (Colombia, 2010).

INTRODUCCIÓN

La determinación de la viscosidad de los cementos asfálticos es un componente fundamental dentro de su caracterización. Los resultados de los ensayos de viscosidad se emplean, entre otras cosas, para generar curvas de susceptibilidad térmica del asfalto (VTS), utilizadas dentro de métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente (MAC) para determinar las temperaturas a las que éstas se deben mezclar y compactar para obtener una mezcla homogénea entre el asfalto y los agregados pétreos.

Aunque existen diversos procedimientos para medir la viscosidad de los cementos asfálticos, la utilización del viscosímetro rotacional goza de gran popularidad, principalmente por su aplicabilidad dentro del proceso de clasificación de asfaltos basado en su desempeño (clasificación PG, por su sigla en inglés). El estándar actual para establecer la viscosidad con el viscosímetro rotacional (INV E-717) exige que para cada temperatura a la que se quiera determinar la viscosidad del asfalto se usen varias muestras de ensayo. Teniendo en cuenta que para la construcción de la VTS del asfalto hay que determinar su viscosidad a diferentes temperaturas, se requiere ensayar diversas muestras para recolectar los datos necesarios.

Con el fin de evitar los inconvenientes y la pérdida de tiempo en que se incurre con la utilización de muestras diferentes para cada temperatura evaluada, se realizó un estudio para desarrollar una metodología alternativa con el objeto de establecer curvas VTS de cementos asfálticos a partir de ensayos de viscosidad efectuados en una sola muestra.

ANTECEDENTES

El asfalto es un material viscoelástico, cuyo comportamiento mecánico depende tanto de la temperatura como de la frecuencia de carga. Tomando en cuenta su compleja respuesta ante las cargas y los efectos del medio ambiente, su caracterización requiere la evaluación de diferentes propiedades. En particular la viscosidad, definida como la relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad (o tasa de corte), es una característica muy importante de los asfaltos. La viscosidad tuvo un papel central en los sistemas de clasificación por viscosidad desarrollados a principios de los años sesenta (actualmente ASTM D3381), y se usa en el siste-

ma de clasificación de asfaltos por desempeño utilizado dentro de Superpave (AASHTO MP 1), el método más utilizado para la clasificación de cementos asfálticos en Estados Unidos (1).

En el sistema de clasificación de asfaltos por desempeño, la viscosidad de los cementos asfálticos a altas temperaturas es determinada por medio del viscosímetro rotacional, con el fin de asegurar que el asfalto sea lo suficientemente fluido para su bombeo y mezcla con los agregados. La viscosidad se establece midiendo el torque necesario para mantener una velocidad rotacional constante en una aguja cilíndrica sumergida en una muestra de asfalto a temperatura constante. El torque medido para mantener la velocidad rotacional constante está directamente relacionado con la viscosidad de la muestra de asfalto, la cual aparece en forma automática en la pantalla electrónica del viscosímetro rotacional. La viscosidad medida de esta manera es comúnmente determinada a diferentes temperaturas, con el propósito de establecer la relación entre temperatura y viscosidad mediante parámetros que definen la susceptibilidad térmica del asfalto, utilizada para determinar las temperaturas de mezcla y compactación del asfalto para el diseño de MAC (2), y dentro de la nueva Guía de Diseño Mecanicista-Empírico de Pavimentos de la AASHTO (MEPDG, por su sigla en inglés).

Aunque las características de susceptibilidad térmica del asfalto también pueden estimarse a partir de otros ensayos (como el índice de penetración, determinado a partir de datos del ensayo de penetración [AASHTO T 49] y del ensayo de punto de ablandamiento [AASHTO T 53 - método de anillo y bola]), la naturaleza empírica de estos ensayos hace que sea preferible establecer las características de susceptibilidad térmica de los asfaltos a partir de ensayos de viscosidad.

Dentro de la MEPDG, la curva de susceptibilidad térmica del asfalto está definida por:

$$\log \log \eta = A + VTS \log T_R \quad (1)$$

Donde:

η = viscosidad en centipoises.

T_R = temperatura en Rankine.

A = intercepto de la regresión.

VTS = pendiente de la curva de susceptibilidad de viscosidad vs. temperatura.

Los parámetros A y VTS del modelo de suscep-

tibilidad térmica utilizado dentro de la MEPDG (ecuación 1) pueden emplearse para tener en cuenta el efecto del envejecimiento del asfalto en su rigidez y, en consecuencia, en la rigidez de la mezcla asfáltica a la que pertenece. Esto se logra dentro del *software* de la MEPDG mediante la utilización de un sistema global de envejecimiento (conocido como *Global Aging System*), que modela los efectos del envejecimiento en la viscosidad del asfalto, por medio de la incorporación de una ecuación de curva maestra de módulo dinámico de la mezcla asfáltica, en la que la viscosidad es una de sus variables independientes (3).

Es importante anotar que la nueva ecuación para la predicción del módulo dinámico $|E^*|$ de la mezcla, incorporada en la versión 1.0 del *software* MEPDG (5) (desarrollada por Bari y Witzak (4), y conocida como el modelo mejorado de Witzak), utiliza el módulo dinámico del asfalto ($|G^*b|$) y su ángulo de fase asociado (δ_b) como variables independientes en vez de la viscosidad del asfalto; sin embargo, este hecho no reduce la aplicabilidad de las curvas VTS, teniendo en cuenta que $|G^*b|$ y δ_b para una temperatura y frecuencia de carga específicas se calculan aún a partir de los parámetros A y VTS de la ecuación 1 (6).

La norma de ensayo vigente en Colombia para determinar la viscosidad por medio del viscosímetro rotacional (INV E-717) requiere que se utilicen diferentes muestras para cada una de las temperaturas de ensayo, y que, una vez ensayada, la muestra sea desechada (7). Considerando que el desarrollo de la curva de susceptibilidad térmica del asfalto requiere la determinación de su viscosidad a diferentes temperaturas, se requerirían múltiples muestras de ensayo para recolectar la información necesaria para su construcción. Aun cuando la determinación de la viscosidad con el viscosímetro rotacional es un ensayo relativamente simple, las actividades de preparación de las muestras, que incluyen el vertido del asfalto en los recipientes de ensayo, la limpieza y preparación de éstos para el siguiente ensayo cuando no se dispone de recipientes de aluminio desechables, y la limpieza de la aguja de ensayo después que se ha probado la muestra, pueden consumir tiempo valioso, especialmente cuando el mismo equipo se emplea para evaluar diferentes tipos de asfalto.

Adicionalmente, si los ensayos de viscosidad se van a ejecutar sobre muestras envejecidas en el horno de

envejecimiento rotatorio (RTFO, por su sigla en inglés), hay que envejecer una cantidad suficiente de asfalto que garantice que se dispone de bastante muestra de ensayo para evaluar la viscosidad a las diferentes temperaturas de interés, aumentando así el tiempo invertido en la preparación de las muestras y sumando el tiempo requerido para la limpieza de los recipientes de vidrio utilizados en el ensayo con el RTFO.

A continuación se presentan los resultados de un estudio efectuado con el objetivo específico de desarrollar una metodología alternativa rápida para establecer curvas de susceptibilidad térmica del asfalto mediante la utilización de una sola muestra de ensayo para determinar la viscosidad a diferentes temperaturas, evitando las inconveniencias y la pérdida de tiempo incurrida cuando se utiliza una muestra de ensayo distinta para cada temperatura (actualmente requerido según la norma de ensayo INV E-717). La metodología propuesta se considera principalmente apropiada para establecer las temperaturas que definen los rangos de temperatura de mezcla y compactación utilizados para actividades de diseño de MAC, teniendo en cuenta los relativamente bajos niveles de precisión utilizados cuando éstas son reportadas (por lo general nunca más allá de una décima de grado centígrado). Los autores consideran que cualquier esfuerzo para reducir el tiempo y recursos necesarios para determinar estos rangos de temperatura será de utilidad para los interesados en el tema.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Con el objetivo específico de investigar si se podía establecer un procedimiento más práctico para determinar las temperaturas de mezcla y compactación para el diseño de MAC, las curvas de susceptibilidad térmica de cinco asfaltos diferentes (incluyendo uno modificado con polímeros) se establecieron a partir de resultados de viscosidad obtenidos con el viscosímetro rotacional con cinco temperaturas diferentes (entre 60 y 165 °C), y con dos protocolos de ensayo, descritos más adelante.

A continuación se registran los resultados de los ensayos de penetración realizados a los asfaltos evaluados según la norma de ensayo INV E 706 (tabla 1).

Las temperaturas de ensayo utilizadas para determinar la viscosidad de los cuatro asfaltos no modificados fueron 60, 90, 115, 135 y 165 °C. A causa de la alta viscosidad del asfalto modificado a 60 °C, para este

Tabla 1
Resultados del ensayo de penetración en los asfaltos evaluados

ID asfalto	Penetración @ 25 °C
AC2	60
AC5	46**
AC6	66
AC7	83
AC9*	63

* AC9 es un asfalto modificado con polímeros.

** Es posible que el asfalto identificado como AC5 haya sido envejecido antes de ser recibido, explicando el bajo valor de penetración.

asfalto la temperatura más baja de ensayo se fijó en 70 °C, con el propósito de no exceder el torque máximo permitido por el viscosímetro rotacional. Las velocidades de rotación de la aguja se cambiaron a las diferentes temperaturas evaluadas con el fin de obtener torques por debajo del límite máximo del viscosímetro, pero lo suficientemente altas como para obtener lecturas de torque representativas. La utilización de diversos gradientes de velocidad a distintas temperaturas no es un problema cuando se ensayan asfaltos no modificados, debido a su comportamiento de flujo newtoniano. Aunque vale la pena reconocer que dicho factor es relevante para el asfalto modificado, este hecho no altera las conclusiones del presente estudio, como se explicará después.

En el primer protocolo de ensayo (escenario 1), las muestras de asfalto se ensayaron siguiendo el procedimiento descrito en la norma de ensayo INV E-717 (es decir, usando una muestra de ensayo para establecer la viscosidad del asfalto a una determinada temperatura, y desechando dicha muestra una vez que el ensayo terminaba [7]). Después que se recolectaban los datos para todas las temperaturas de ensayo, éstos se ajustaban al modelo de susceptibilidad térmica (VTS) establecido por la ecuación:

$$\log \log \eta = A + \text{VTS} \log T_R \quad (1)$$

Donde:

η = viscosidad (centipoises).

T_R = temperatura (Rankine).

A = intercepto de la curva VTS.

VTS = pendiente de la curva VTS.

En total se evaluaron cinco muestras idénticas (réplicas) a cada temperatura para cada asfalto (es decir, el modelo de la ecuación 1 se estimó con un total de 25 muestras para cada asfalto), generando así un valor para el parámetro A y un valor para el parámetro VTS

para cada uno de los cinco asfaltos evaluados; el coeficiente de determinación (R^2) en todos los casos fue mayor de 0,99.

Los resultados obtenidos en el escenario 1, así como los rangos de viscosidad recomendados en el protocolo de diseño de mezcla establecido en el manual Superpave de diseño de MAC - Nivel I (2), se pueden ver más adelante (figura 1). Como era de esperarse, las medidas de viscosidad para los cuatro asfaltos no modificados muestran claramente una tendencia lineal en el espacio $\log \log \eta$ vs. $\log T$, mientras que los datos para el asfalto modificado, también como era de esperarse, indican cierto grado de no linealidad.

Para el segundo protocolo de ensayo considerado (escenario 2), se evaluó la viscosidad de una misma muestra de ensayo en todo el rango de temperaturas considerado, y los datos obtenidos se ajustaron al modelo indicado en la ecuación 1, generando así parámetros A y VTS basados en una sola muestra de ensayo. Con el fin de considerar la variabilidad de los datos obtenidos para diferentes muestras del mismo asfalto (es decir, entre muestras réplica), se determinaron los parámetros A y VTS para cinco muestras idénticas, y sus resultados promediados para obtener valores únicos de A y VTS para cada uno de los asfaltos evaluados. Las curvas VTS obtenidas al utilizar los valores A y VTS promedio en el escenario 2, incluyendo los rangos de temperatura de mezcla y compactación recomendados en (2), se incluyen en la figura 2 (en esta figura no se grafican datos puntuales, ya que las curvas VTS allí mostradas se obtuvieron al promediar los parámetros A y VTS conseguidos para cada una de las muestras ensayadas).

Con el propósito de comparar los resultados obtenidos en los dos protocolos de ensayo, en la figura 3 se muestran el promedio de las viscosidades obtenidas a las diferentes temperaturas para cada uno de los asfaltos evaluados en el escenario 1 y las curvas VTS promedio obtenidas en el escenario 2. Los sufijos S1 y S2 luego de la identificación del asfalto indican que la serie de datos en cuestión se alcanzó siguiendo los procedimientos correspondientes a los escenarios 1 y 2, en ese orden.

Los parámetros A y VTS de las curvas de susceptibilidad térmica (es decir, de la ecuación 1) en los dos escenarios evaluados, así como también otra información estadística de interés, se resumen posteriormente (tabla 2).

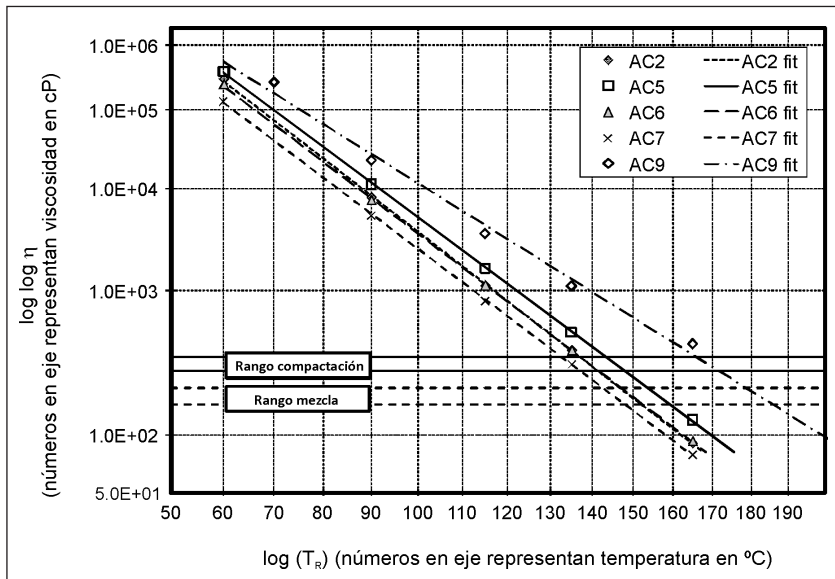


Figura 1. Curvas VTS - escenario 1.

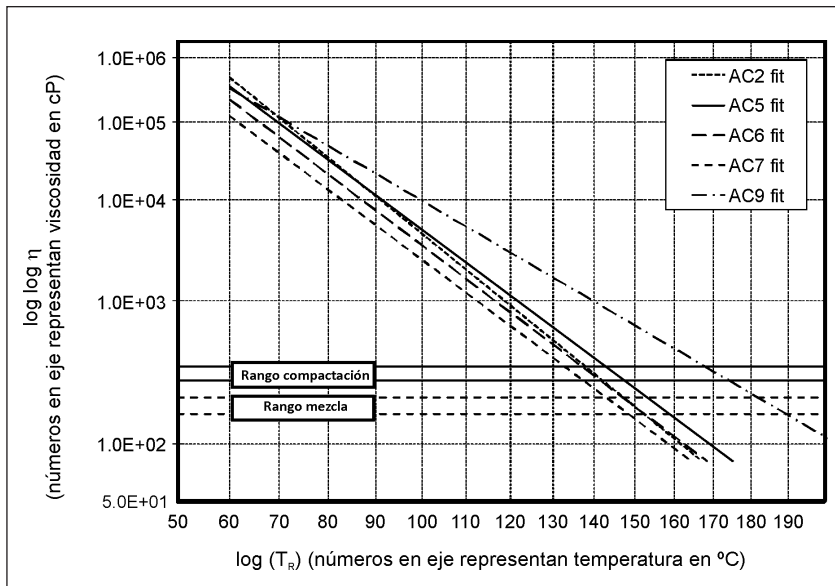


Figura 2. Curvas VTS - escenario 2.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como era de esperarse, el comportamiento de los asfaltos no modificados es lineal dentro del rango de temperaturas evaluado (figura 1). La susceptibilidad térmica de los asfaltos AC5, AC6 y AC7 es muy similar, tal como lo indican las pendientes de las curvas correspondientes a estos asfaltos (figura 2), mientras que el asfalto AC2 presenta una mayor pendiente, sugiriendo que la viscosidad de este asfalto tiene una mayor vulnerabilidad a los cambios de temperatura. Es importante anotar que se presenta una notable diferencia en la pendiente de la curva VTS para el asfalto AC2 en los escenarios 1 y 2, si se observa que la línea de tendencia para AC2 es casi idéntica a la del asfalto AC6 (figura 1), mientras que la tendencia para el asfalto AC2 se cruza con la de los asfaltos AC6 y AC5 (figura 2). No es claro si la divergencia en las tendencias observadas para bajas temperaturas se debe a diferencias durante la preparación de las muestras, realizada con algunos días de diferencia, o a posibles limitaciones del equipo cuando se hacen lecturas de viscosidad a bajas temperaturas y bajos gradientes de velocidad.

Teniendo en cuenta esta anomalía, se efectuaron dos regresiones descartando las temperaturas más bajas (es decir, una regresión descartando

Tabla 2
Parámetros A y VTS de la ecuación 1 para los escenarios 1 y 2

ID asfalto	Escenario 1			Escenario 2					
	A	VTS	R ²	A			VTS		
				Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.
AC2	11,106	-3,7339	0,999	11,634	11,664	11,650	-3,9274	-3,9172	-3,9224
AC5	10,735	-3,5963	1,000	10,713	10,730	10,718	-3,5951	-3,589	-3,5909
AC6	10,917	-3,6680	1,000	10,871	10,888	10,878	-3,6582	-3,6521	-3,6545
AC7	10,791	-3,6299	1,000	10,745	10,758	10,751	-3,6181	-3,6133	-3,6157
AC9	9,130	-3,0140	0,990	8,2046	8,9935	8,600	-2,9705	-2,6867	-2,8290

Tamaño de la muestra para cada regresión en el escenario 1 es $n = 25$; prom. es el promedio aritmético de cinco valores de A y VTS, respectivamente; y R^2 = coeficiente de determinación; para cada uno de los asfaltos evaluados en el escenario 2: Mín. = mínimo; Máx. = máximo; Prom. = promedio.

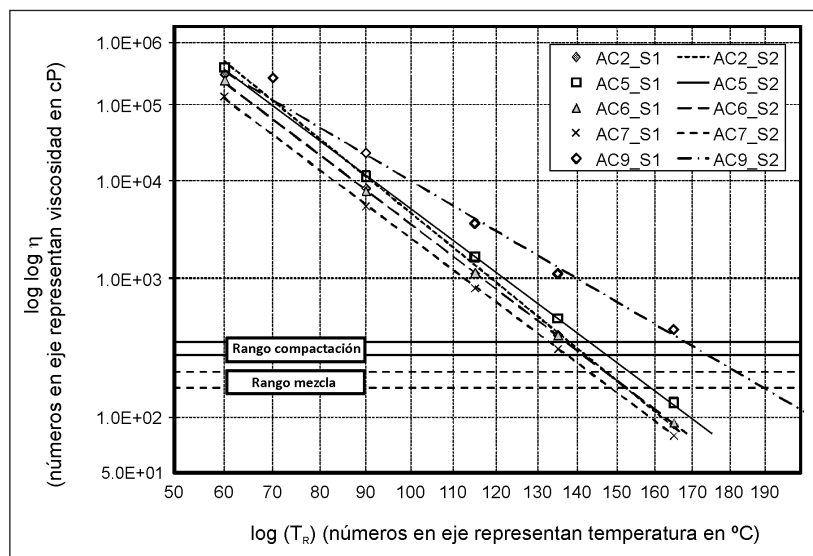


Figura 3. Comparación de curvas VTS en los escenarios 1 y 2.

las lecturas realizadas a 60 °C, y otra descartando las lecturas hechas a 60 y 90 °C). Más adelante se puede apreciar el cambio en los valores mínimo, máximo y promedio de A y VTS para las diferentes regresiones utilizando 5, 4 y 3 temperaturas (tabla 3).

Se observa una clara tendencia de incremento de VTS y disminución de A, lo que hace que los resultados entre los escenarios 1 y 2 para AC2 sean más consistentes a altas temperaturas (para los otros tres asfaltos no modificados la relación $\log \log \eta$ vs. $\log T$ es claramente lineal en los dos escenarios, al igual que la existente para el asfalto AC2 en el escenario 1). Esta observación es clave si se toma en cuenta que las temperaturas típicas de mezcla y compactación en MAC sobrepasan por lo general los 120 °C (frecuentemente los 130 °C), lo que valida la metodología rápida propuesta si el objetivo de los ensayos de viscosidad es desarrollar curvas de susceptibilidad térmica para determinar los rangos de temperatura para mezcla y compactación.

Tabla 3

Tendencia de A y VTS para el asfalto AC2, descartando las bajas temperaturas

N.º de niveles de temperatura	A			VTS		
	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.
5	11,634	11,664	11,650	-3,9274	-3,9172	-3,9224
4	11,486	11,515	11,500	-3,8756	-3,8657	-3,8701
3	11,381	11,440	11,411	-3,8496	-3,8291	-3,8393

El comportamiento del asfalto modificado (AC9) difiere significativamente del comportamiento de los asfaltos no modificados. Como era de esperarse para este tipo de asfaltos, la pendiente de la curva VTS para AC9 evidencia la menor susceptibilidad térmica entre los asfaltos evaluados. Además, mientras que los asfaltos no modificados tienen un buen ajuste al modelo de la ecuación 1, los resultados obtenidos para el asfalto modificado sugieren que la relación entre el doble logaritmo de la viscosidad y el logaritmo de la temperatura no es lineal (figura 1). Esto se veía venir, teniendo en cuenta que la composición de este tipo de asfaltos hace que modelar su comportamiento sea más complejo.

La recomendación general es que cuando se utilicen asfaltos modificados, y las curvas VTS sean desarrolladas con modelos similares a los descritos en la ecuación 1, las temperaturas de mezcla y compactación no sean determinadas a partir de dichas curvas, ya que los rangos de temperatura obtenidos de este modo tienden a ser mucho más altos de lo que se requerirían en realidad. Esta situación se ilustra en la figura 2, si se observan las altas temperaturas que se necesitarían para mezclar y compactar una mezcla asfáltica elaborada con el asfalto AC9, si se siguieran rigurosamente las recomendaciones de viscosidad establecidas (2).

Motivados por observaciones similares, varios investigadores han estudiado metodologías apropiadas para el establecimiento de rangos de temperatura de mezcla y compactación cuando se utilizan asfaltos modificados. Aunque la descripción de los detalles de dichos estudios va más allá del alcance del presente artículo, se recomienda al lector interesado leer reportes publicados en la literatura (8, 9).

Con excepción de la anomalía descrita anteriormente para el asfalto AC2, los resultados obtenidos en los dos protocolos de ensayo (escenarios 1 y 2) parecen proveer resultados muy similares (en particular para las más altas temperaturas), y sugieren que las curvas VTS obtenidas a partir de ensayos de viscosidad, siguiendo cualquiera de los dos protocolos son equivalentes; sin embargo, hay que confirmar o rechazar esta hipótesis

por medios diferentes de una simple inspección visual de los resultados.

Con el fin de establecer si en realidad existe una diferencia significativa entre los parámetros A y VTS del modelo de susceptibilidad térmica (ecuación 1) cuando éstos se determinan en los escenarios 1 y 2, se ejecutó un análisis estadístico no paramétrico. Es importante anotar que, teniendo en cuenta que A y VTS son parámetros de una regresión, su variabilidad está correlacionada, y por esta razón las conclusiones obtenidas para uno de estos parámetros son altamente aplicables al otro (no obstante, el análisis no paramétrico se hizo individualmente para los dos parámetros). El objetivo de este análisis fue probar la hipótesis de que los valores de los parámetros A y VTS obtenidos en los dos protocolos de ensayo eran iguales (o más estrictamente hablando, no diferían mucho entre sí).

La razón principal para realizar la comparación mediante un análisis no paramétrico fue el limitado número de cementos asfálticos evaluados, lo que impide verificar de manera apropiada las suposiciones implícitas en un análisis estadístico paramétrico. Contrario a las pruebas paramétricas –como por ejemplo la prueba t (t-test), que requiere que las poblaciones por comparar tengan una distribución normal–, los métodos de análisis no paramétricos no se basan en suposiciones específicas sobre la normalidad en la distribución de los datos.

En el presente estudio se utilizó la prueba estadística de Wilcoxon (*Wilcoxon Rank Sum Test*, WRST), en la que se evalúa si dos conjuntos de observaciones que se van a comparar provienen de la misma población. Para aplicar este procedimiento, es necesario que las poblaciones que se van a analizar sean continuas y sus distribuciones probabilísticas idénticas en forma y tamaño, pero no necesariamente en ubicación. La prueba consiste en primero combinar las muestras, para luego ordenar las observaciones jerárquicamente (es decir, de menor a mayor, o viceversa) y asignarles posiciones 1, 2, etc., dentro de dicho conjunto. La variable estadística evaluada en la prueba WRST, identificada con la letra T, es la suma de las posiciones correspondientes a una de las muestras, y es una medida de la diferencia jerárquica entre las dos muestras comparadas. El valor obtenido de T calculado de esta manera se utiliza luego para entrar a una tabla y establecer si la hipótesis nula (esto es, la hipótesis de que las muestras pertenecen a la misma distribución poblacional) debe ser o no rechazada para

un grado de confiabilidad determinado. El valor de T y su probabilidad asociada (*p-value*) también se pueden calcular mediante el uso de *software* especializado (S-Plus, en el caso específico del presente estudio).

Como se dijo anteriormente, los parámetros A y VTS provienen de una regresión, su variabilidad está correlacionada, y por tal razón las conclusiones obtenidas para uno de estos parámetros son altamente aplicables al otro. Teniendo en cuenta esta situación, y en aras de la brevedad, en la tabla siguiente se incluyen únicamente los resultados correspondientes al parámetro VTS (tabla 4).

Como se puede observar, el análisis no paramétrico indica que no existe una diferencia significativa entre el valor del parámetro VTS determinado en el escenario 1 y en el escenario 2. Un análisis análogo se hizo para el parámetro A con exactamente el mismo resultado y conclusión.

Determinación de las temperaturas de mezcla y compactación

Cabe recalcar que el estudio efectuado busca establecer una metodología para la construcción de curvas de susceptibilidad térmica de asfaltos que reduzca el tiempo y costo actualmente incurridos para tal fin, y que al mismo

Tabla 4
Análisis no paramétrico para el parámetro VTS
(*Wilcoxon Rank Sum Test*)

ID asfalto	Protocolo ensayo	VTS	Orden jerárquico (Rank)
AC9	Escenario 2	-2,8290	1
AC9	Escenario 1	-3,0140	2
AC5	Escenario 2	-3,5909	3
AC5	Escenario 1	-3,5963	4
AC7	Escenario 2	-3,6157	5
AC7	Escenario 1	-3,6299	6
AC6	Escenario 2	-3,6545	7
AC6	Escenario 1	-3,6680	8
AC2	Escenario 1	-3,7339	9
AC2	Escenario 2	-3,9224	10

Ho: Las dos poblaciones son idénticas (VTS esc1 = VTS esc2)
 Tup = (2+4+6+8+9) = 29 (suma de orden jerárquico para el escenario 1)
 Tlow = (1+3+5+7+10) = 26 (suma de orden jerárquico para el escenario 2)
 p-value = 0,841 (utilizando S-Plus) → Fail to Reject Ho. No hay evidencia de que VTS esc1 es diferente de VTS esc2.

tiempo pueda proveer, en la práctica, la misma información que sería obtenida si se utiliza la norma de ensayo vigente. En otras palabras, si el objetivo principal de la construcción de una curva de susceptibilidad térmica es determinar los rangos de temperatura de mezcla y compactación a ser utilizados durante el diseño de una MAC, y para efectos prácticos los mismos rangos de temperatura son obtenidos a partir de curvas VTS construidas en los escenarios 1 y 2, sería válido argumentar que la utilización de una sola muestra para determinar la viscosidad con el viscosímetro rotacional a diferentes temperaturas sería apropiada, y se justificaría una modificación a la norma de ensayo vigente (INV E-717).

Más adelante se resumen las temperaturas de mezcla y compactación determinadas para cada uno de los asfaltos evaluados en los dos protocolos de ensayo considerados (escenarios 1 y 2) (tabla 5). Los rangos de temperatura reportados se calcularon teniendo en cuenta los rangos de viscosidad recomendados en (2):

$$\text{Rango de viscosidad para mezclado} = 0,17 \pm 0,02 \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad (170 \pm 20\text{cP}) \quad (2)$$

$$\text{Rango de viscosidad para compactación} = 0,28 \pm 0,03 \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad (280 \pm 30\text{cP}) \quad (3)$$

Los resultados en la tabla 5 sugieren que, para efectos prácticos, no hay diferencia entre las temperaturas obtenidas a partir de los dos escenarios evaluados. Vale la pena anotar que aunque las temperaturas de mezcla y compactación necesarias para los asfaltos modificados son generalmente mayores que las requeridas para asfaltos no modificados, los resultados obtenidos para el asfalto AC9 (el asfalto modificado incluido en el estudio) son extremadamente altas (por ejemplo, temperaturas de mezcla alrededor de 180 °C). Como ya se discutió, las

temperaturas de mezcla y compactación para este tipo de asfaltos no deben determinarse a partir de curvas VTS como las descritas en el presente artículo (para recomendaciones específicas sobre la determinación de estas temperaturas para asfaltos modificados, el lector es referido a (8, 9)). No obstante, la comparación relativa de las temperaturas obtenidas en los escenarios 1 y 2 se considera válida, ya que muestra que los valores estimados en los dos protocolos de ensayo son similares (aunque mayores de los que realmente se requerirían en el caso del asfalto modificado).

Con el fin de visualizar el efecto de determinar las temperaturas de mezcla y compactación en los dos escenarios considerados de una manera más clara, las diferencias entre las estimaciones en la tabla 5 se incluyen en la tabla 6.

Como lo indican los resultados en la tabla 6, en términos prácticos las temperaturas de mezcla y compactación calculadas con las curvas de susceptibilidad térmica generadas a partir de los dos protocolos de ensayo (escenarios 1 y 2) son iguales. La mayor diferencia observada en los asfaltos no modificados es pequeña (máximo de 1° C), y aún menor (0,4 °C) si la anomalía presentada en la curva VTS del asfalto AC2 a bajas temperaturas es tenida en cuenta. La mayor diferencia observada para el asfalto modificado (AC9) fue de 3,8 °C, resultante de la diferencia entre los límites superiores de las temperaturas de mezcla estimadas para este asfalto en los escenarios 1 y 2 (185,9 °C y 189,7 °C, respectivamente). Es importante resaltar nuevamente que la determinación de las temperaturas de mezcla y compactación reales para asfaltos modificados no debe hacerse utilizando la metodología presentada aquí. Adicionalmente, las diferencias observadas entre los escenarios 1 y 2 para AC9 se podrían reducir en forma sustancial si los ensayos de viscosidad se realizan a los

Tabla 5
Temperaturas de mezcla y compactación en los escenarios 1 y 2

ID asfalto	Temperatura mezcla (°C)				Temperatura compactación (°C)			
	Mín.		Máx.		Mín.		Máx.	
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2
AC2	146,9	147,3	152,1	152,3	136,9	137,9	141,2	141,9
AC5	153,6	153,3	159,1	158,9	143,1	142,9	147,6	147,3
AC6	147,2	147,0	152,5	152,3	137,1	136,8	141,4	141,1
AC7	142,6	143,0	148,0	148,3	132,6	132,9	136,8	137,2
AC9	178,9	182,0	185,9	189,7	165,8	168,0	171,4	174,0

Tabla 6

Diferencias entre las temperaturas de mezcla y compactación en los escenarios 1 y 2

ID asfalto	Temperatura Mezcla (°C)		Temperatura Compactación (°C)	
	Mín ₂ - Mín ₁	Máx ₂ - Máx ₁	Mín ₂ - Mín ₁	Máx ₂ - Máx ₁
AC2	0,4	0,2	1,0	0,7
AC5	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3
AC6	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3
AC7	0,4	0,3	0,3	0,4
AC9	3,1	3,8	2,2	2,6

niveles más altos de temperatura, ya que es aparente en la figura 3 que las diferencias observadas obedecen principalmente a la medida de viscosidad a 70 °C en el escenario 1 (nótese cómo la curva VTS en el escenario 2 se ajusta bastante bien a las otras cuatro observaciones en el escenario 1).

RESUMEN DE CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Aunque en realidad existen algunas diferencias entre las curvas de susceptibilidad térmica generadas usando datos de viscosidad obtenidos siguiendo estrictamente la norma de ensayo establecida (INV E-717) y la metodología rápida propuesta en el presente artículo, éstas pueden considerarse insignificantes si el propósito de dichas curvas es la determinación de temperaturas de mezcla y compactación de MAC. Esto es particularmente relevante si se considera que las temperaturas de mezcla y compactación son casi siempre (si no siempre) superiores a 125 °C. Cabe anotar que, como ya se mencionó y se encuentra extensamente reportado en la literatura, el modelo descrito en la ecuación 1 no es apropiado para determinar las temperaturas de mezcla y compactación en MAC cuando se utilizan asfaltos modificados.

Los resultados aquí presentados sustentan la hipótesis de que no existe una diferencia significativa entre las curvas de susceptibilidad térmica desarrolladas con base en datos de viscosidad obtenidos en una misma muestra de ensayo a diferentes temperaturas, y las desarrolladas obteniendo los datos de viscosidad como lo sugiere la norma de ensayo actual (INV E-717), y sugieren que no es necesario entonces desechar la muestra de asfalto una vez que su viscosidad ha sido determinada a una temperatura con el viscosímetro rotacional. La conclusión anterior sustenta también la hipótesis de que no es

necesario desechar la muestra de ensayo si un esfuerzo cortante apropiado no es obtenido en el viscosímetro rotacional en el primer intento de ensayo (o dicho de otra manera, si la lectura de torque en el viscosímetro no es apropiada para obtener lecturas de viscosidad de acuerdo con las recomendaciones establecidas por el fabricante del equipo), lo que potencialmente puede reducir el tiempo y los recursos necesarios para determinar la viscosidad del asfalto por medio del viscosímetro rotacional, siguiendo la normativa vigente.

Finalmente, se recomienda que si el único propósito de establecer la curva de susceptibilidad térmica para un asfalto no modificado es la determinación de los rangos de temperatura para mezcla y compactación dentro del diseño de MAC, la mínima temperatura para los ensayos de viscosidad se fije en 115 °C si la metodología en el escenario 2 anteriormente descrita es utilizada (es decir, si se usa una sola muestra de ensayo para construir la curva VTS), con el fin de evitar posibles inconsistencias en las medidas de viscosidad a bajas temperaturas.

RECONOCIMIENTOS

Los autores reconocen y agradecen el apoyo financiero prestado por la Escuela Colombiana de Ingeniería para la realización de este estudio. El contenido del artículo refleja el punto de vista de los autores, quienes se hacen responsables por la precisión y validez de los datos presentados. El artículo no refleja necesariamente la postura oficial ni las políticas de la Escuela Colombiana de Ingeniería, ni constituye norma, reglamentación o especificación alguna.

REFERENCIAS

1. *Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing* (2003). Superpave Series N.º 1 (SP-1), 3rd rev. Lexington, KY: Asphalt Institute.
2. *Superpave Mix Design*, 3rd ed. (2001). Superpave Series N.º 2 (SP-2). Lexington, KY: Asphalt Institute.
3. ARA, Inc. (2004). Eres Consultant Division. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Final Report, NCHRP Project 1-37A, Washington D.C.: Transportation Research Board of the National Academies. www.trn.org/mepdg/guide.htm.
4. Bari, J. & Witczak, M. (2006). Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 75, pp. 381-424.
5. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - A Manual of Practice, Interim Edition* (2008, July). American Association of State Highway and Transportation Officials.

6. Bari, J. & Witczak, M. (2007). New Predictive Models for Viscosity and Complex Shear Modulus of Asphalt Binders: For Use with Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (2007). *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2001. Washington, D.C.: Transportation Research Board of the National Academies, pp. 9-19.
7. Invías Norma E-717-07 (2007). Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras*. Instituto Nacional de Vías.
8. Bahia, H.U., Hanson, D.I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M.A. & Anderson, R.M. (2001). *Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, NCHRP Report 459. Washington, D.C.: National Academy Press.
9. Yildirim, Y., Ideker, J. & Hazlett, D. (2006). Evaluation of Viscosity Values for Mixing and Compaction Temperatures. *J. Mat. in Civ. Engrg*, vol. 18, issue 4, pp. 545-553.