



---

---

# **Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas con la rueda cargada de Hamburgo**

0

Mayra Flores Flores  
Horacio Delgado Alamilla  
José A. Gómez López

**Publicación Técnica No. 568  
Sanfandila, Qro, 2018**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Evaluación del desempeño de mezclas con la rueda  
cargada de Hamburgo**

**Publicación Técnica No. 568**  
**Sanfandila, Qro, 2018**

---



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por la M. en C. Mayra Flores F., el Dr. Horacio Delgado Alamilla y el M. en I. José Antonio Gómez López.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna II 04/18 “Evaluación de mezclas asfálticas con la rueda cargada de Hamburgo”.

Se agradece la colaboración de Alfonso Galicia por la realización de los ensayos de laboratorio.



# Contenido

---

Índice de figuras .....	v
Índice de tablas .....	vii
Sinopsis.....	ix
Abstract .....	xi
Resumen ejecutivo .....	xiii
Introducción.....	1
1 Prueba de la rueda cargada de Hamburgo.....	5
1.1 Equipo.....	5
1.2 Temperatura de prueba de la rueda cargada de Hamburgo. ....	6
1.3 Resultados de la prueba. ....	6
1.4 Especificaciones de deformación permanente para la prueba de la rueda cargada de Hamburgo. ....	7
2 Trabajo de laboratorio.....	11
3 Resultados y análisis .....	13
3.1 Análisis en condiciones estandarizadas.....	13
3.2 Efecto de la temperatura de prueba.....	14
3.3 Determinación de la temperatura de prueba de la rueda cargada de Hamburgo.....	20
4 Conclusiones .....	25
Bibliografía .....	27
Anexo 1. Resultados de las pruebas realizadas al asfalto .....	29

Anexo 2. Resultados de barrido de temperaturas al residuo de RTFO en el reómetro de corte dinámico. .... 31

# Índice de figuras

---

Figura 1.1	Equipo de rueda cargada de Hamburgo propiedad del IMT. ....	5
Figura 1.2	Esquema de los resultados de un ensayo en la rueda cargada de Hamburgo. Fuente: <a href="http://pavementinteractive.org">pavementinteractive.org</a> .....	7
Figura 2.1	Granulometrías utilizadas .....	12
Figura 3.1	Gráfica de deformación permanente para el criterio de aceptación estándar en México .....	13
Figura 3.2	Gráfica de deformación permanente a 30 000 pasadas.....	14
Figura 3.3	Grafica de deformación permanente de las mezclas T.N 19 mm (3/4”) y asfalto PG 64-16.....	16
Figura 3.4	Grafica de deformación permanente de las mezclas T.N 19 mm (3/4”) y asfalto PG 76-16.....	16
Figura 3.5	Grafica de deformación permanente de las mezclas T.N 12.5 mm (1/2”) y asfalto PG 64-16 .....	17
Figura 3.6	Grafica de deformación permanente de las mezclas T.N 12.5 mm (1/2”) y asfalto PG 76-16 .....	17
Figura 3.7	Efecto de la temperatura de prueba en la deformación permanente de la mezcla a 20 000 repeticiones de carga.....	18
Figura 3.8	Grafica de parámetro $G^*/\sin \delta$ del residuo de asfalto PG 64-16 .....	22
Figura 3.9	Grafica de parámetro $G^*/\sin \delta$ del residuo de asfalto PG 76-16 .....	22
Figura 3.10	Relación entre la temperatura crítica de desgranamiento de la mezcla y la temperatura crítica del asfalto.....	23



# Índice de tablas

---

Tabla 1.1	Especificaciones de deformación permanente para la rueda cargada de Hamburgo.....	9
Tabla 2.1	Contenido óptimo de asfalto .....	11
Tabla 3.1	Resultados de las pruebas en la rueda cargada de Hamburgo.....	20
Tabla 3.2	Temperaturas críticas de desgranamiento de las mezclas.....	21
Tabla 3.3	Temperaturas críticas del asfalto.....	23



## **Sinopsis**

---

La prueba de la rueda cargada de Hamburgo es muy utilizada en México para complementar el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño y como un ensayo de control de calidad en campo para verificar el desempeño de la mezcla asfáltica a la deformación permanente y susceptibilidad a la humedad. La temperatura de prueba utilizada es 50 °C y la cantidad mínima de pasadas especificadas para una deformación máxima de 10 mm depende del nivel de tránsito de diseño.

En el presente estudio se evaluó el efecto de la temperatura de prueba y la granulometría en los resultados de la rueda cargada de Hamburgo. Los resultados indican que las mezclas asfálticas fabricadas con asfalto sin modificar y modificado presentan un desempeño similar cuando se someten a un ensayo a 50 °C de temperatura, pero si la temperatura de prueba se incrementa se detectan diferencias en el desempeño entre mezclas con diferentes granulometrías y rigideces de asfalto.



# Abstract

---

The Hamburg wheel test is widely used in Mexico to complement the design of high performance dense grain size asphalt mixtures and as a quality control test in the field to verify the performance of the mixture under permanent deformation and susceptibility to humidity. The test temperature used is 50 °C and the minimum number of passes specified for a maximum deformation of 10 mm depends on the design transit level.

The present study evaluated the effect of the test temperature and grain size on the results of the Hamburg loaded wheel. The results indicate that the asphalt mixtures manufactured with unmodified and modified asphalt have a similar performance when tested at a temperature of 50 °C, but if the test temperature is increased, differences in the performance between mixtures with different grain size and rigidities asphalt are detected.



## Resumen ejecutivo

---

La deformación permanente en mezclas asfálticas puede evaluarse a través de pruebas que simulan el paso de los vehículos esperados en el campo, como la rueda cargada de Hamburgo.

La prueba de la rueda cargada de Hamburgo es un indicador de la susceptibilidad a la falla prematura de mezclas asfálticas en caliente debido a una estructura granular débil, rigidez inadecuada de asfalto, daño por humedad y falta de adherencia entre el agregado y el asfalto (Farhana R. *et al.*, 2014)

Esta prueba es muy utilizada por numerosos departamentos de transporte en Estados Unidos, y cada instancia establece la temperatura de prueba que mejor refleje las condiciones ambientales locales. Algunos departamentos de transporte realizan la prueba a una sola temperatura, independientemente del grado PG del asfalto utilizado para fabricar la mezcla y otros a diferentes temperaturas dependiendo del grado PG del asfalto. En México, en cambio, la prueba se ejecuta a una temperatura de 50 °C; sin embargo, en algunos estados del norte la temperatura ambiente en época de verano alcanza hasta los 47 °C, lo que permite que la temperatura del pavimento sea superior a los 55 °C. Si la prueba se ejecuta a una temperatura no representativa de las condiciones de campo, entonces es posible que el desempeño de la mezcla no se esté evaluando de manera adecuada.

En el presente estudio se evaluó el efecto de la temperatura de prueba y la granulometría en los resultados de la rueda cargada de Hamburgo para determinar si es necesario realizar la prueba a diferentes temperaturas dependiendo del grado PG de asfalto utilizado en la mezcla asfáltica.

Se utilizaron dos tipos de asfalto (PG 64-16 y 76-16), un agregado producto de la trituración de roca (andesita) y dos granulometrías (de 12.5 mm y 19 mm de tamaño máximo nominal). Se compactaron especímenes cilíndricos en el compactador giratorio con un porcentaje de  $7 \pm 0.5$  % vacíos de aire y se sometieron a ensayos en la rueda cargada de Hamburgo a 50, 55 y 60 °C.

Se observó que la temperatura de prueba tiene un efecto importante en los resultados de la rueda cargada de Hamburgo. Cuando las mezclas se ensayaron a 50 °C de temperatura, todas presentaron un desempeño similar, pero si la temperatura de prueba se incrementaba, se detectaron diferencias en el desempeño. Para temperaturas de hasta 50 °C, el desempeño a la deformación permanente de la mezcla puede mejorarse incrementando el grado PG del asfalto, pero para temperaturas mayores a 50 °C, un cambio en la granulometría contribuye

en mayor medida a mejorar el desempeño de la mezcla a la deformación permanente que un incremento del grado PG del asfalto.

Los datos recabados en este estudio no son suficientes para determinar las temperaturas de prueba para la rueda cargada de Hamburgo, además de que se utilizó un solo tipo de agregado con un buen desempeño ya conocido. Asimismo, es necesario continuar la investigación en agregados con un desempeño pobre, como los empleados en la zona sureste y norte del país, y con asfaltos modificados con otros aditivos.

# Introducción

---

La deformación permanente en la capa de rodamiento es debida a la baja resistencia al corte de la mezcla asfáltica para soportar las cargas repetidas aplicadas por los vehículos, y se manifiesta como una depresión longitudinal con ligero levantamiento lateral de la mezcla asfáltica.

La deformación permanente en mezclas asfálticas puede evaluarse a través de pruebas, que simulan el paso de los vehículos esperados en el campo, como la rueda cargada de Hamburgo.

La rueda cargada de Hamburgo es un equipo de laboratorio usado para medir la susceptibilidad a la deformación permanente y el daño por humedad de mezclas asfálticas. La prueba es un indicador de la susceptibilidad a la falla prematura de mezclas asfálticas en caliente debida a una estructura granular débil, rigidez inadecuada de asfalto, daño por humedad y falta de adherencia entre el agregado y el asfalto (Farhana R. *et al.*, 2014)

Este equipo fue desarrollado en 1970 en Alemania por Esso A.G de Helmut-Wind Inc., y se introdujo en Estados Unidos de América en los noventa con el objetivo de detectar mezclas propensas a la deformación permanente.

Aschenbrener *et al.*, (1993) fueron los pioneros en realizar estudios con la rueda cargada de Hamburgo: evaluaron los factores que influyen los resultados de la rueda cargada de Hamburgo (HWTD, por sus siglas en inglés), en 20 mezclas cuyo desempeño al desgranamiento era conocido. Las pruebas se realizaron en un rango de temperaturas de 35 a 65 °C. Los resultados obtenidos en laboratorio se compararon con el desempeño en campo y se obtuvo una excelente correlación entre los datos de campo y de laboratorio. En estos estudios se encontró que los resultados de la prueba son sensibles a la calidad del agregado, rigidez del asfalto, duración del envejecimiento a corto plazo, procesos de refinamiento del asfalto, aditivos antidesprendimiento, cal hidratada y temperatura de compactación. Se concluyó que la temperatura de prueba de la rueda cargada de Hamburgo debe seleccionarse con base en la temperatura del sitio y se sugiere realizar el ensayo para un asfalto con un PG 70 a 55 °C, PG 64 a 50 °C, PG 58 a 45 °C y PG 52 a 40 °C.

Romero *et al.* (2008) evaluaron en un agregado calizo, con un desempeño al desgranamiento conocido, el efecto de la temperatura de prueba, la relación rigidez-temperatura en los asfaltos modificados a través de barridos de temperatura en el reómetro y el ensayo de recuperación elástica por esfuerzo múltiple (MSCR, por sus

siglas en inglés), así como el efecto del ácido poli fosfórico (PPA, por sus siglas en inglés) en el desempeño de la mezcla asfáltica.

En este estudio se utilizaron cuatro tipos de asfalto (PG 58-28, PG 64-28, PG 70-28 modificado con polímero y un PG 70-28 modificado con polímero y ácido poli fosfórico) y se concluyó que hay una pendiente crítica de desgranamiento (CST, por sus siglas en inglés) que produce energía, en forma de calor, la cual reduce la rigidez, y provoca el desprendimiento del asfalto del agregado, lo que da paso al desgranamiento. En las mezclas preparadas con asfaltos modificados (PG-70) y ensayadas a una temperatura de 50 °C, no se presenta la pendiente crítica de desgranamiento, por lo que se recomienda realizar el ensayo de la rueda cargada de Hamburgo a una temperatura de 54 °C para mezclas con asfaltos modificados (PG 70), a 50 °C para mezclas con asfalto PG 64 y a 46 °C o menos para mezclas con asfaltos PG 58. En lo que respecta a la relación rigidez-temperatura, se encontró que, para asfaltos con el mismo grado de desempeño (PG), esta relación es diferente y, por lo tanto, el barrido de temperatura en el reómetro de corte dinámico (DSR, por sus siglas en inglés) y la prueba de recuperación elástica por esfuerzo múltiple (MSCR) no permiten determinar la susceptibilidad a la humedad de la mezcla, de la misma manera que lo hace la prueba de la rueda cargada de Hamburgo. En cuanto al efecto del PPA, no se observó una mejora en el desempeño de la mezcla asfáltica.

Recientemente, Walubita *et al.* (2016) estudiaron el efecto del tiempo de maduración en muestras de mezcla asfáltica y la variación de la temperatura de prueba en la rueda cargada de Hamburgo. Cinco tipos de mezclas asfálticas usadas comúnmente en el estado de Texas se ensayaron a diferentes tiempos de maduración (1, 3, 5, 7 y 14 días) y a tres temperaturas de prueba (50, 60 y 70 °C) siguiendo el procedimiento del Departamento de Transporte de Texas. Los hallazgos encontrados fueron que la resistencia a la deformación permanente de las mezclas mejora al incrementar el tiempo de maduración de la mezcla y que la deformación permanente se incrementa de manera importante con el incremento de la temperatura, por lo que proponen ensayar los especímenes compactados en el laboratorio después de cinco días de fabricados y realizar la prueba de la rueda cargada de Hamburgo a una temperatura más alta (> 50 °C) o a diferentes temperaturas (50, 55 y 60 °C), especialmente en mezclas que van a estar sujetas a temperaturas altas y esfuerzos cortantes altos.

En México esta prueba se comenzó a utilizar en 2008 para complementar el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño. La prueba se ejecuta a una temperatura de 50 °C y la cantidad mínima de pasadas especificadas para una deformación máxima de 10 mm depende del nivel de tránsito (para un nivel bajo, medio, alto y muy alto, el número de pasadas especificado es de 10000, 15 000 y 20 000, respectivamente) (Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013). Es importante mencionar que no existe ninguna investigación que respalde estas especificaciones, por lo que se considera de suma importancia realizar un estudio en el que se evalúe el desempeño de la mezcla asfáltica en la rueda cargada de Hamburgo a diferentes

temperaturas de prueba para identificar apropiadamente si la mezcla asfáltica es susceptible a la deformación permanente y al daño por humedad.

Esta investigación permitirá contribuir al cumplimiento del objetivo 6 “Desarrollar integralmente y a largo plazo al sector con la creación y adaptación de tecnología y la generación de capacidades nacionales”, del Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes<sup>1</sup>, mismo que se encuentra alineado a los objetivos 3.5 “Hacer del desarrollo científico, tecnológico y la innovación pilares para el progreso económico y social sostenible” y 4.9 “Contar con una infraestructura de transporte que se refleje en menores costos para realizar actividad económica” del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018<sup>2</sup>.

### **Objetivos**

El presente estudio tuvo por objetivos evaluar el efecto de la temperatura de prueba y la granulometría en los resultados de la rueda cargada de Hamburgo para determinar si es necesario realizar el ensayo a diferentes temperaturas dependiendo del grado PG de asfalto utilizado en la mezcla asfáltica.



# **1 Prueba de la rueda cargada de Hamburgo**

## **1.1 Equipo**

El equipo de la rueda cargada de Hamburgo consiste en dos ruedas de acero de 47 mm de ancho y 203.2 mm de diámetro que se mueven axialmente sobre un espécimen fabricado en el laboratorio o extraído en campo. La carga en cada rueda es de  $71.6 \pm 0.45$  kg ( $705 \pm 4.5$  N) y su velocidad es de 30.5 cm/s aproximadamente, medida en el punto central, para generar  $52 \pm 2$  pasadas por minuto. Tiene un baño de agua que controla la temperatura con una variación de  $\pm 1^\circ\text{C}$ , en un rango de 25 a  $70^\circ\text{C}$ . La deformación se mide con transductores (LVDT), con un rango de medición de 0 a 20 mm y una precisión de 0.01 mm (figura 1.1). Los especímenes pueden ser cilíndricos —de 150 mm de diámetro y 60 mm de espesor— o prismáticos —de 260 mm de ancho, 320 mm de largo y 40 mm de espesor—. Los especímenes fabricados en laboratorio se compactan típicamente a un porcentaje de vacíos de aire de  $7 \pm 1\%$ , además de sumergirse en el baño con agua y ensayarse a la temperatura indicada en la norma o procedimiento utilizado.



**Figura 1.1** Equipo de rueda cargada de Hamburgo propiedad del IMT.

## 1.2 Temperatura de prueba de la rueda cargada de Hamburgo

Uno de los factores que influye en los resultados de la prueba en la rueda cargada de Hamburgo es la temperatura. Algunos departamentos de transporte en Estados Unidos y también en México ejecutan la prueba a una temperatura de 50 °C; sin embargo, varios investigadores han realizado estudios para evaluar el efecto de la temperatura de prueba en los resultados y coinciden en que la prueba debe ejecutarse a diferentes temperaturas dependiendo del grado PG del asfalto utilizado.

## 1.3 Resultados de la prueba

La figura 1.2 muestra un esquema de los resultados de la prueba de la rueda cargada de Hamburgo. Los parámetros obtenidos del ensayo son la consolidación post compactación, pendiente del *creep*, pendiente de desgranamiento y punto de inflexión. La consolidación post compactación es la deformación en mm a 1000 pasadas; se presume que la rueda densifica la mezcla en las primeras 1000 pasadas (Farahana Rhaman *et al.*, 2007). La pendiente del *creep* es el inverso de la tasa de deformación en la región lineal de la curva de deformación, después de que los efectos de post compactación finalizan y antes del inicio del desgranamiento (si éste ocurre), y sirve para evaluar la acumulación de la deformación permanente debido al flujo plástico. La pendiente de desgranamiento es el inverso de la tasa de deformación en la región lineal de la curva de deformación, después de comenzar el desgranamiento y hasta que finaliza el ensayo (Aschenbrener T. *et al.*, 1993). La pendiente de desgranamiento mide la acumulación de la deformación permanente debido al daño por humedad. El punto de inflexión del desgranamiento es la intersección de la pendiente de *creep* y la pendiente de desgranamiento, y corresponde al número de pasadas que una mezcla asfáltica puede soportar a una temperatura determinada antes de que el agregado y el asfalto comiencen a separarse (Romero P. *et al.*, 2008). El punto de inflexión y la pendiente de desgranamiento están relacionados con la resistencia a la humedad de la mezcla asfáltica.

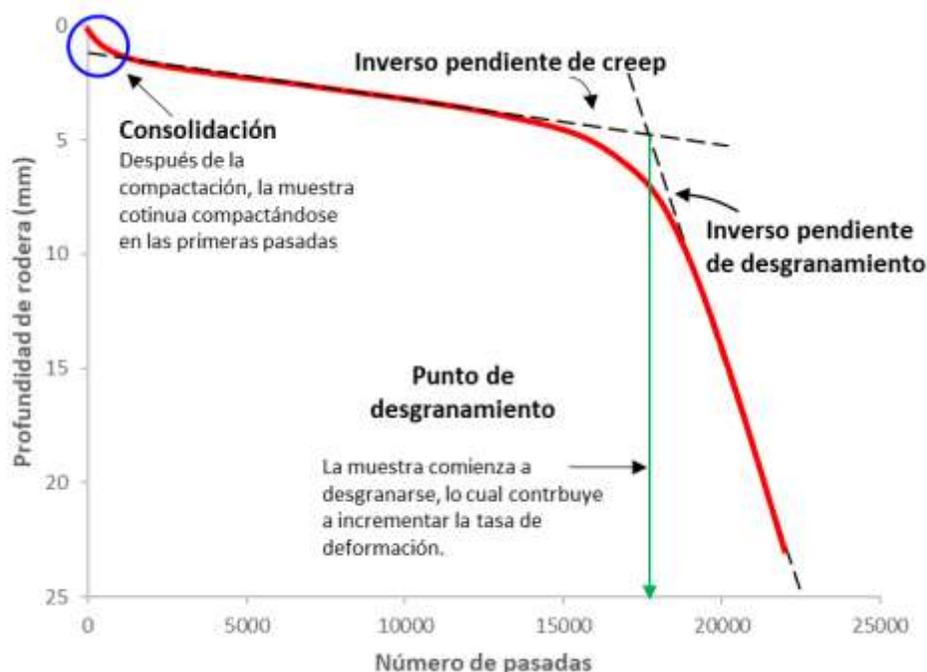


Figura 1.2 Esquema de los resultados de un ensayo en la rueda cargada de Hamburgo. Fuente: pavementinteractive.org

## 1.4 Especificaciones de deformación permanente para la prueba de la rueda cargada de Hamburgo

En Estados Unidos, gracias a la facilidad para ejecutar la prueba y la buena correlación entre los resultados de campo y de laboratorio, numerosos departamentos de transporte utilizan la prueba de la rueda cargada de Hamburgo para complementar el diseño de mezclas asfálticas. Los estados que actualmente usan esta prueba como criterio de aceptación o rechazo de mezclas asfálticas son California, Colorado, Illinois, Iowa, Luisiana, Massachusetts, Montana, Oklahoma, Texas, Utah, Washington y Wisconsin.

Debido a que la norma AASHTO T 324 no especifica una temperatura de prueba, todos los estados modificaron dicho método para reflejar las condiciones ambientales locales. Los estados de Texas, Colorado y Montana usan su propia norma —Tex -242F, CP-L 5112 y MT-334, respectivamente—; los demás estados mencionados recurren a la norma AASHTO T 324 o AASHTO T 324 modificada, como su procedimiento de prueba.

En cuanto a las especificaciones o criterios de aceptación de la mezcla, la ciudad de Hamburgo en Alemania especifica una deformación permanente de 4 mm y 20 000 pasadas.

En Estados Unidos, las especificaciones varían de un estado a otro. A continuación, se mencionan los criterios adoptados en algunos de los estados

- California, Wisconsin y Iowa: usan la deformación permanente y el punto de inflexión como criterio de aceptación y los demás estados únicamente la deformación permanente.
- California especifica el número de pasadas del punto de inflexión para diferentes grados PG.
- Iowa y Wisconsin especifican que la relación de la pendiente de desgranamiento con respecto a la pendiente del *creep* debe ser igual o mayor que 2.
- Illinois señala que “puede ser útil ejecutar cada prueba hasta 20 000 pasadas para recolectar datos adicionales sobre la susceptibilidad a la humedad”.
- Oklahoma indica que el punto de inflexión puede calcularse y reportarse opcionalmente para información.
- Entre las especificaciones estatales, California, Colorado, Texas, Luisiana, Iowa, Montana, Wisconsin e Illinois enumeran claramente el requisito de la cantidad mínima de pasadas a una profundidad de rodera específica o la profundidad máxima de rodera para un número específico de pasadas.
- Otras especificaciones de estado solo mencionan que los criterios se seleccionarán basándose en el grado PG o con base en las especificaciones, pero no enumeran una profundidad de rodera específica (Mohammad L. *et al.*, 2015).

En la tabla 1.1 se presentan las especificaciones de los departamentos de transporte en Estados Unidos que utilizan la prueba como criterio de aceptación o rechazo de mezclas asfálticas.

**Tabla 1.1 Especificaciones de deformación permanente para la rueda cargada de Hamburgo**

Departamento de Transporte	Temperatura de prueba (°C)	Grado de desempeño (PG)	Especificación	
			Núm. de pasadas	Deformación permanente (mm)
Texas	50	64	10 000	12.5
		70	15 000	
		76	20 000	
Colorado	45	58	20 000 10 000	10.0 4.0 <sup>c</sup>
	50	64		
	55	70		
	55	76		
California	45	58	10 000	12.5
	50	64	15 000	
	55	70	20 000	
		76 o >	25 000	
Montana	44	58	10 000 <sup>a</sup>	12.5
	50	64	15 000 <sup>b</sup>	
	56	70		
Luisiana	50	58	12 000	12.5
		64	20 000	
		70 (OGFC)	7 500	
Illinois	50	58 o <	5 000	12.5
		64	7 500	
		70	15 000	
		76 o >	20 000	
Utah	46	58	20 000	20.0
	50	64		
	54	70		

a. Mezcla producida en planta

b. Mezcla de diseño

c. Profundidad de rodera >4 mm antes de 10 000 pasadas se considera que no pasa

Fuente: Reporte 219, NCHRP.



## 2 Trabajo de laboratorio

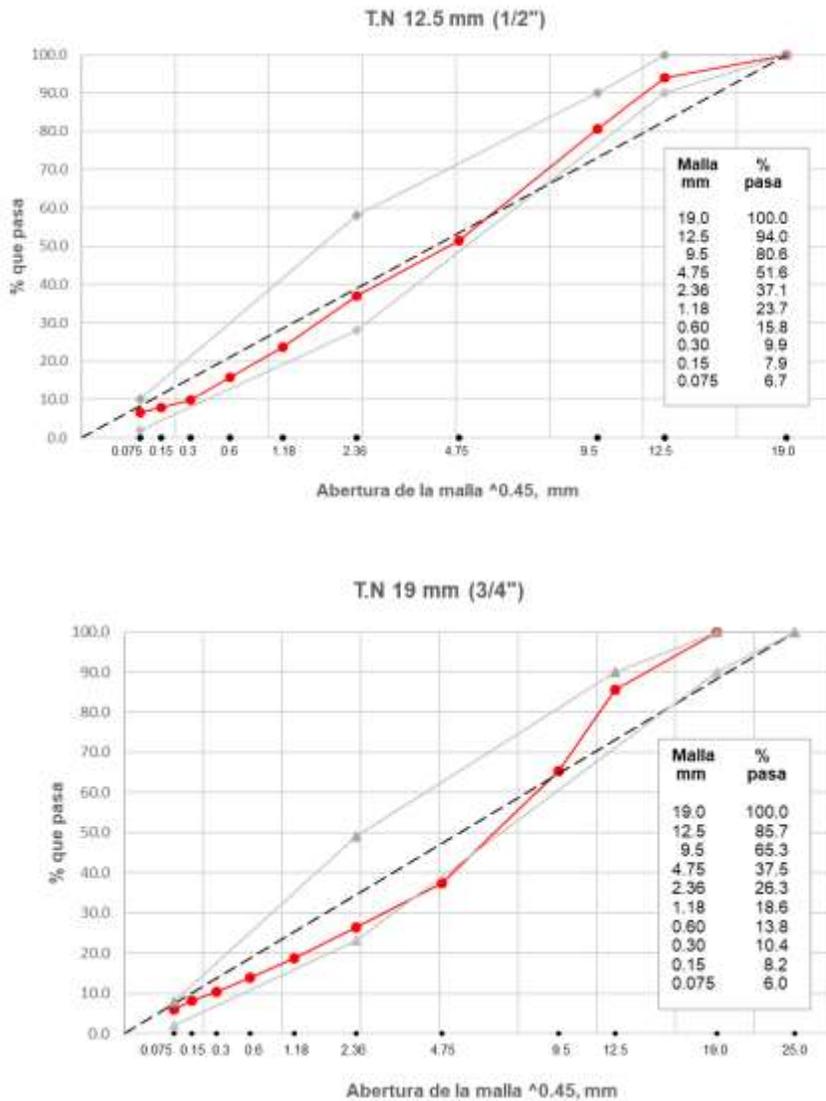
---

Para fines del presente estudio, se utilizó un agregado basáltico, de buena calidad y buen desempeño, y dos granulometrías —una con tamaño nominal de 12.5 mm ( $\frac{1}{2}$ " ) y otra de 19.0 mm ( $\frac{3}{4}$ " )— (figura 1). En lo que se refiere al material asfáltico, se utilizó PG 64-16 con promotor de adherencia (PA) y PG 76-16 modificado con ELVALOY (0.75%) y 0.1 % de ácido poli fosfórico (APP). A efectos de determinar el grado de desempeño del asfalto (PG), se realizaron las pruebas de viscosidad (ASTM D4402-15), reómetro de corte dinámico (ASTM D7175-15) y reómetro de viga a flexión (ASTM 6648-08); así mismo, se determinó la densidad relativa (ASTM D70-09), el punto de reblandecimiento (ASTM D36-14) y la recuperación elástica por torsión (M MMP-4-05-024-02). Los resultados de las pruebas realizadas al asfalto pueden consultarse en el anexo 1.

El diseño de cada una de las mezclas asfálticas se definió para un nivel de tránsito alto ( $\geq 30 \times 10^6$  ESAL) conforme al protocolo AMAAC PA-MA 01/2103 "Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño". El contenido de asfalto óptimo para las cuatro mezclas estudiadas se indica en la tabla 2.1

**Tabla 2.1 Contenido óptimo de asfalto**

Mezcla T.N (mm)	C.A.O.	
	PG 76-16	PG 64-16
19.00	5.4%	5.4%
12.5	5.5%	5.5%



**Figura 2.1 Granulometrías utilizadas**

Para la prueba de la rueda cargada de Hamburgo, se compactaron especímenes cilíndricos en el compactador giratorio de 15.24 cm de diámetro (6") y 63 mm de altura con un porcentaje de vacíos de aire de  $7 \pm 0.5\%$ .

Para cada una de las mezclas asfálticas, se ejecutaron ensayos a 50, 55 y 60 °C, siguiendo el procedimiento de prueba MAC V "Método de prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad en una mezcla asfáltica en caliente compactada mediante la rueda cargada de Hamburgo" del *Manual de ensayos para laboratorio* (Ayala del Toro *et al.*, 2018). Los ensayos se ejecutaron hasta 30 000 pasadas de la rueda de carga, con la finalidad de observar si se presentaba el desgranamiento de la mezcla.

### 3 Resultados y análisis

#### 3.1 Análisis en condiciones estandarizadas

Para cada mezcla evaluada se determinó la deformación permanente máxima y el número de repeticiones de carga con el fin de alcanzar la falla del espécimen (número de pasadas del punto de inflexión), si ésta se presentó.

El primer análisis se realizó en las condiciones establecidas para la prueba en México (50 °C y deformación máxima de 10 mm a 20 000 repeticiones de carga) (figura 3.1). Lo primero que se pudo observar de los resultados es que todas las mezclas cumplen con el criterio de aceptación establecido. Sin embargo, no se pudo establecer una tendencia sobre el efecto del tamaño nominal de la mezcla. En lo que respecta al tipo de asfalto, como se esperaba, las mezclas con asfalto PG 76-16 tuvieron mejor desempeño que las mezclas con asfalto PG 64-16.

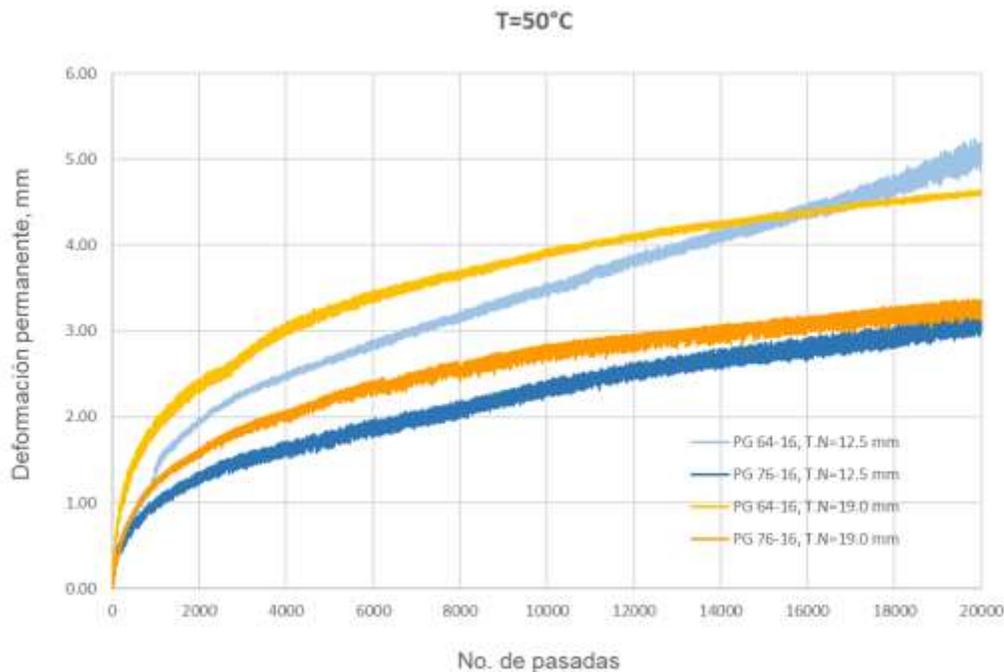


Figura 3.1 Gráfica de deformación permanente para el criterio de aceptación estándar en México

La figura 3.2 presenta la deformación permanente hasta 30 000 pasadas: en ésta se nota que a más repeticiones de carga existe una mayor deformación en las mezclas con tamaño nominal de 12.5 mm, lo que coincide con la tendencia esperada para este deterioro y que no se pudo observar a 20 000 pasadas.

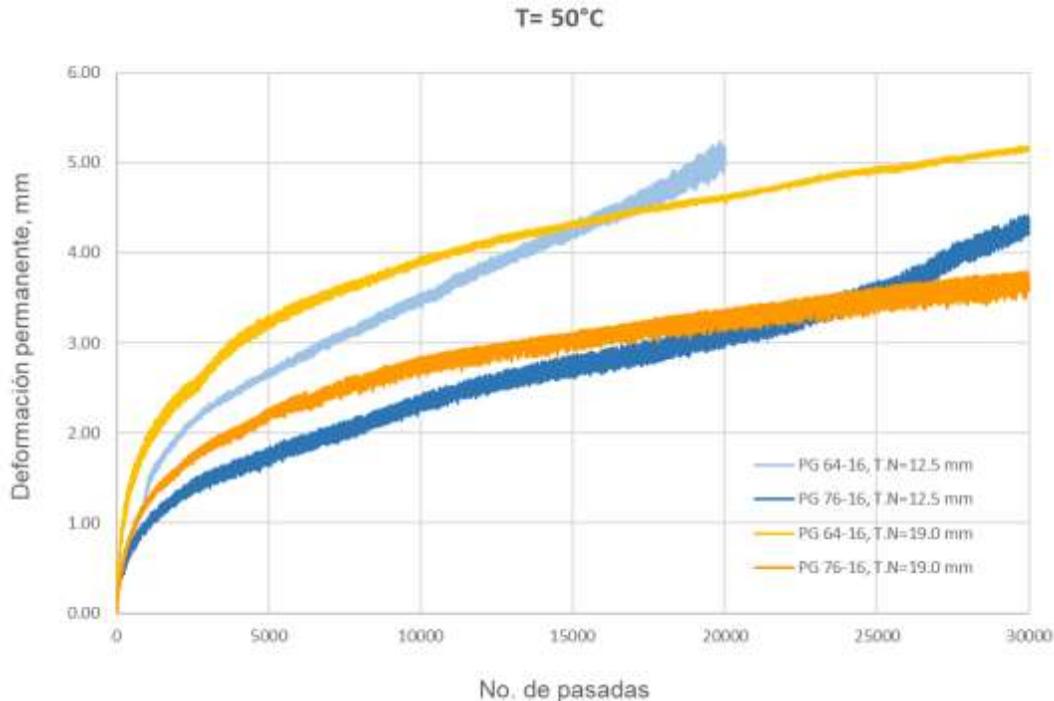


Figura 3.2 Gráfica de deformación permanente a 30 000 pasadas

Debido a que no se presentan diferencias importantes en la deformación permanente y a que se ensayaron pocas mezclas, no se puede establecer la influencia del número de pasadas en la evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente de las mezclas evaluadas.

### 3.2 Efecto de la temperatura de prueba

Como se mencionó anteriormente, para evaluar el efecto de la temperatura de prueba se realizaron ensayos a 50, 55 y 60 °C. Los resultados de las pruebas presentados en las figuras 3.3 a 3.6. En estas figuras se ve claramente el efecto de la temperatura para cada una de las mezclas evaluadas, presentándose un incremento en la deformación permanente con el aumento de la temperatura, la cual está en función del tipo de granulometría y asfalto.

A las diferentes temperaturas de prueba se nota la influencia del tamaño nominal de la mezcla asfáltica: las mezclas de 19.0 mm presentan menor deformación permanente en todas las temperaturas con los dos asfaltos utilizados.

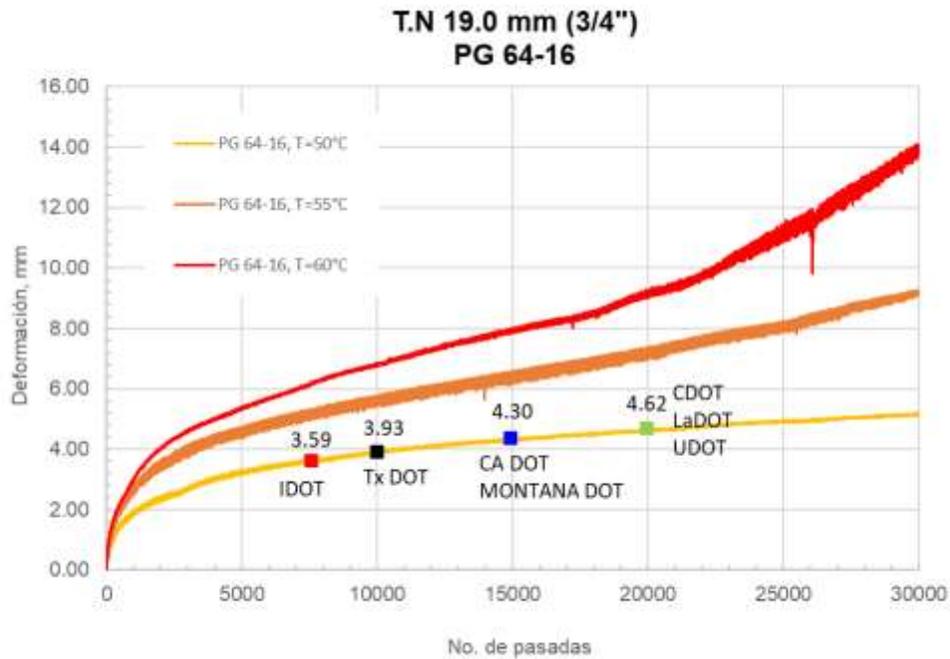
En las mezclas con el mismo tamaño nominal y diferente asfalto, se verificó que la inclusión del polímero en el asfalto mejoró las propiedades mecánicas de la mezcla

en todas las temperaturas de prueba, amén de que estas mezclas no sufrieron desgranamiento. En las mezclas fabricadas con tamaño nominal de 12.5 mm y asfalto PG 64-16, se presentó desgranamiento a temperaturas de 55 y 60 °C (figura 3.5 y 3.6).

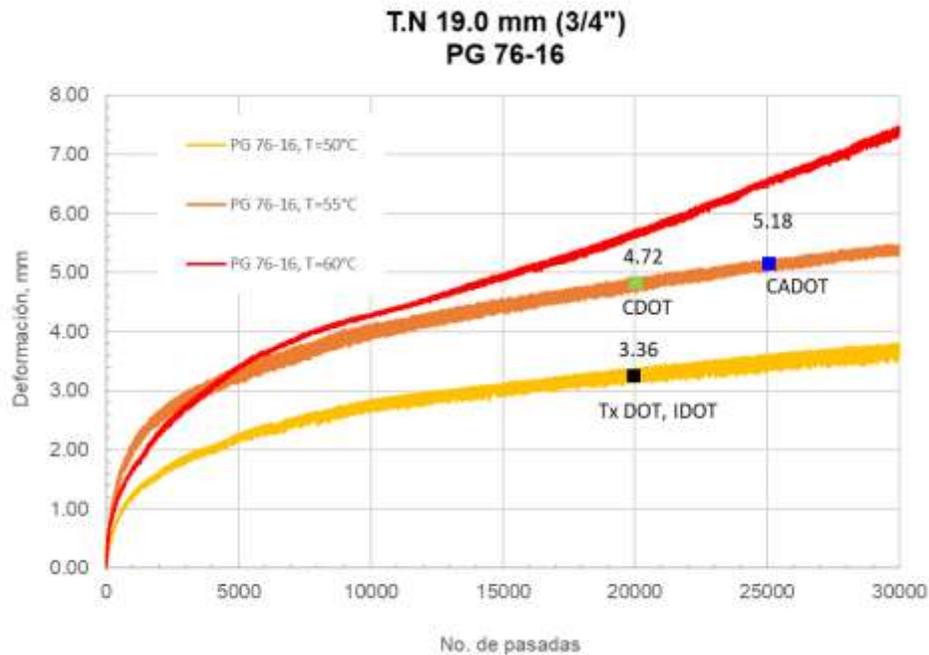
Las figuras 3.3 a 3.6 muestran la evolución de la deformación permanente de todas las mezclas ensayadas. Si se compara la deformación permanente a 20 000 pasadas, de la mezcla de 19.0 mm ( $\frac{3}{4}$ " ) y asfalto PG 64 -16, en comparación con la mezcla de 12.5 mm ( $\frac{1}{2}$ " ) y asfalto PG 76 -16, se puede apreciar que, conforme aumenta la temperatura de prueba, la tendencia en el comportamiento va cambiando; a 50 °C la mezcla con asfalto modificado tiene el mejor desempeño, mientras que a 60 °C la mezcla con tamaño nominal más grande y asfalto convencional presenta mejor desempeño. Si se realiza la misma comparación a 30 000 pasadas, se observa que, a 50 °C ambas mezclas presentan una deformación permanente similar, pero ligeramente inferior con asfalto modificado. Sin embargo, para las otras temperaturas el desempeño cambia y la mezcla con asfalto convencional presenta menor deformación permanente.

Esto deja ver dos puntos importantes: el primero es que para algunas condiciones el tamaño nominal de la mezcla tiene mayor efecto que el uso de un asfalto modificado con polímero y, por tanto, la mejor solución para optimizar el desempeño a la deformación permanente no siempre es incrementar la calidad del asfalto. El segundo punto es que el número de pasadas tiene una influencia en la clasificación del desempeño de la mezcla asfáltica y un valor fijo no es propiamente lo más adecuado.

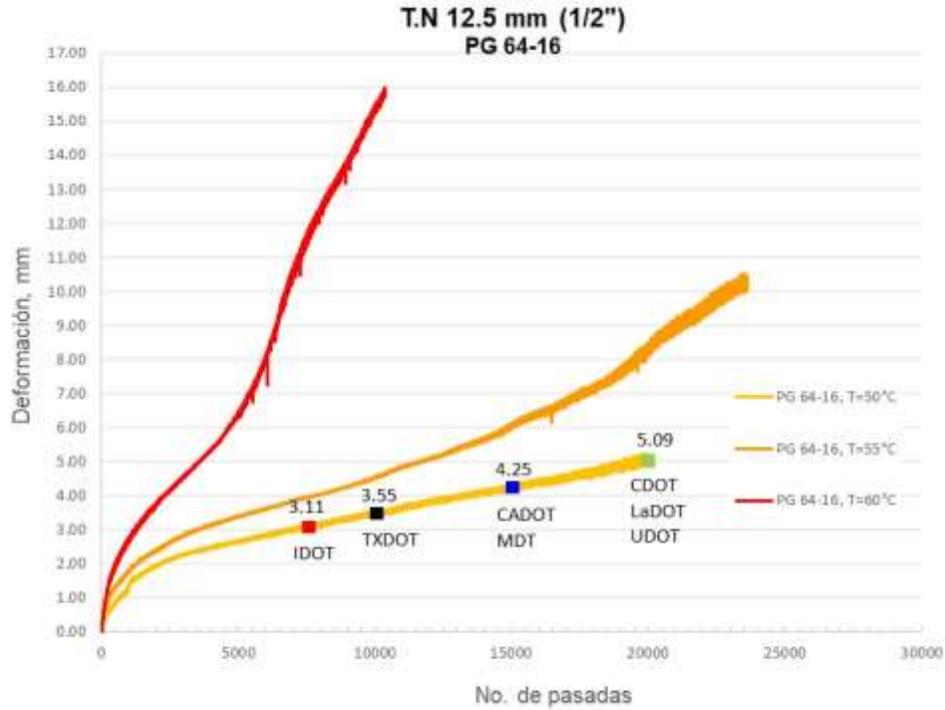
Estos resultados muestran que la deformación permanente está en función de dos factores: la temperatura de prueba y el número de pasadas. Por lo tanto, es conveniente hacer una reflexión sobre la condición de ensayo establecida en México (50 °C y 20 000 pasadas), la cual es única para cualquier tipo de ligante asfáltico, mientras que las especificaciones de diferentes departamentos de transporte en Estados Unidos varían de acuerdo con el grado PG de asfalto. Para ilustrar este punto, en cada una de las gráficas se agregó el criterio de clasificación de distintos departamentos de transporte en Estados Unidos (ver tabla 1.1).



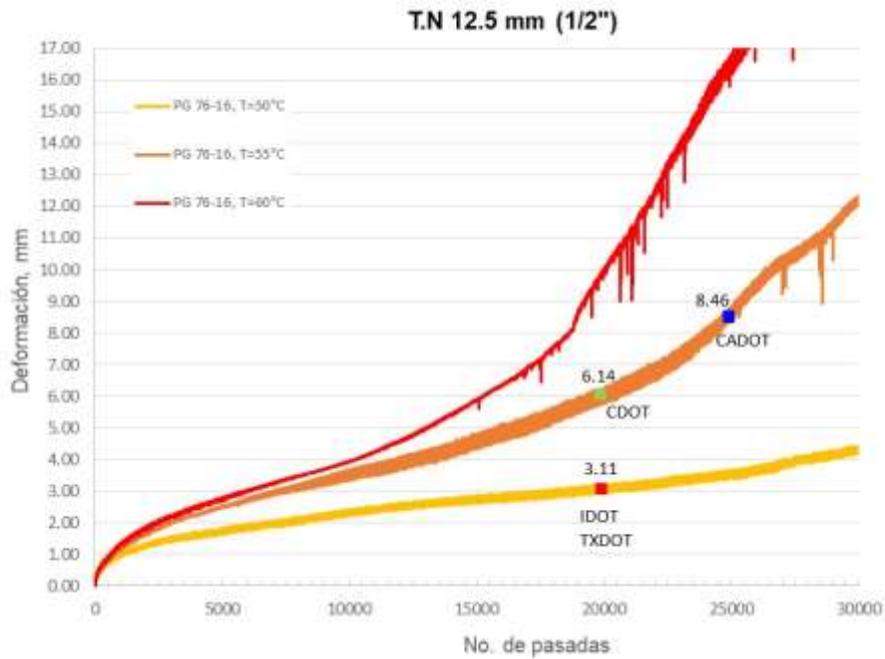
**Figura 3.3 Grafica de deformación permanente de las mezclas T.N 19 mm (3/4") y asfalto PG 64-16**



**Figura 3.4 Grafica de deformación permanente de las mezclas T.N 19 mm (3/4") y asfalto PG 76-16**



**Figura 3.5 Grafica de deformación permanente de las mezclas T.N 12.5 mm (1/2'') y asfalto PG 64-16**

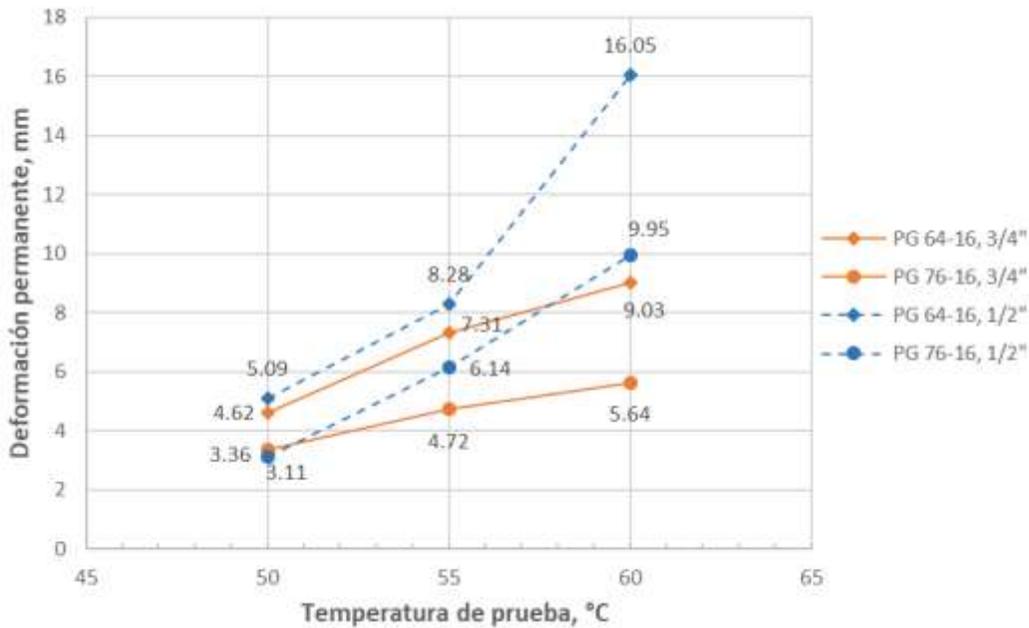


**Figura 3.6 Grafica de deformación permanente de las mezclas T.N 12.5 mm (1/2'') y asfalto PG 76-16**

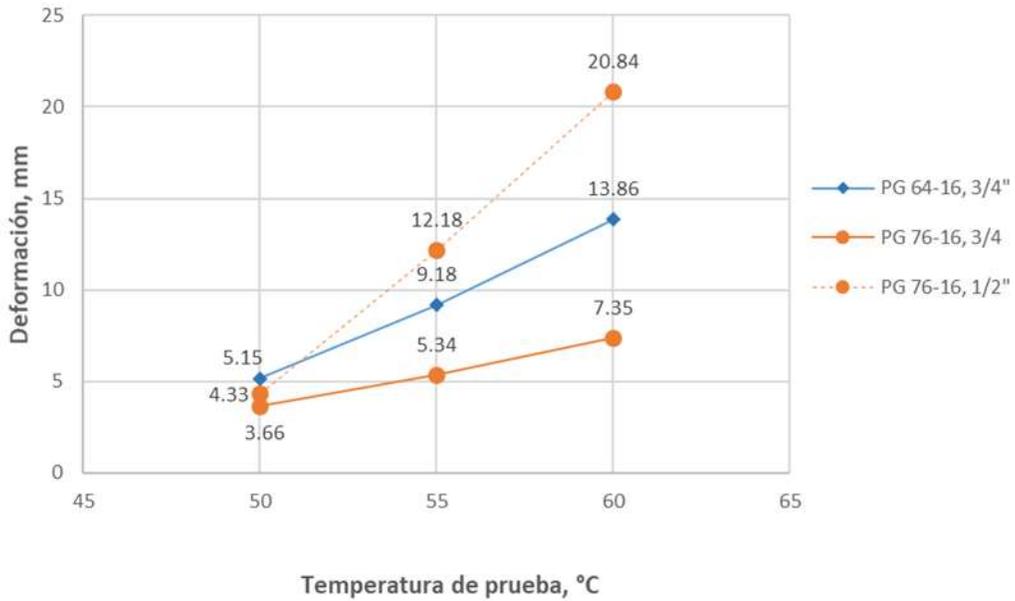
En la figura 3.7 se presenta el resumen de las deformaciones permanentes máximas de las mezclas ensayadas a 20 000 pasadas. Para la temperatura de 50 °C, se observa que las mezclas con el mismo tipo de asfalto tienen un desempeño similar sin importar el tamaño nominal de la mezcla (diferencia menor que 0.5 mm), lo que muestra que, a esta temperatura y número de pasadas, el desempeño depende principalmente del grado PG del asfalto más que del tamaño nominal de la mezcla.

Al aumentar la temperatura de prueba, se observa que el tamaño nominal de la mezcla tiene una influencia importante en la deformación permanente, lo que indica que a condiciones extremas es más importante el tamaño nominal de la mezcla que el uso de un asfalto modificado.

Otro punto importante que cabe señalar es la pendiente de evolución de la deformación permanente con la temperatura de prueba. Las mezclas con tamaño nominal de 12.5 mm ( $\frac{1}{2}$ " ) son más sensibles a la temperatura de prueba (mayor pendiente) que las mezclas con tamaño nominal de 19.0 mm ( $\frac{3}{4}$ " ), lo que indica que el incremento del tamaño nominal de la mezcla mejora la estabilidad estructural.



**Figura 3.7 Efecto de la temperatura de prueba en la deformación permanente de la mezcla a 20 000 repeticiones de carga**



**Figura 3.8 Efecto de la temperatura de prueba en la deformación permanente de la mezcla a 30 000 repeticiones de carga**

En la tabla 3.1 se indican los resultados de las pruebas: solo dos mezclas fabricadas con asfalto PG 64 y una con PG 76 presentaron punto de inflexión.

**Tabla 3.1 Resultados de las pruebas en la rueda cargada de Hamburgo**

T.N	Grado (PG)	Temp. de prueba (°C)	Núm. de pasadas del punto de inflexión	Pendiente de desgranamiento	Deformación máxima (mm) Número de pasadas		
					15 000	20 000	30 000
¾"	64-16 PA	50	> 20 000		4.30	4.62	5.15
¾"	64-16 PA	55	>20 000		6.56	7.31	9.18
¾"	64-16 PA	60	> 20 000		7.97	9.03	13.86
¾"	76-16 APP	50	> 20 000		3.05	3.36	3.66
¾"	76-16 APP	55	>20 000		4.49	4.72	5.34
¾"	76-16 APP	60	>20 000	0.0005	4.91	5.64	7.35
½"	64-16 PA	50	>20 000		4.25	5.09	
½"	64-16 PA	55	16 200	0.0006	6.12	8.28	
½"	64-16 PA	60	5050	0.002	21.11	16.05	
½"	76-16 APP	50	>20 000	0.00007	2.66	3.11	4.33
½"	76-16 APP	55	>20 000	0.0005	4.53	6.14	12.18
½"	76-16 APP	60	16 900	0.001	5.91	9.95	20.84

\*APP ácido poli fosfórico

\*\*PA promotor de adherencia

### 3.3 Determinación de la temperatura de prueba de la rueda cargada de Hamburgo

En México la prueba de la rueda cargada de Hamburgo se realiza a 50 °C, independientemente del grado PG del asfalto. Ante las distintas zonas climáticas observadas en el país, se utilizan diferentes tipos de asfalto, siendo los más usados el PG 64 y 76. En algunos estados del noreste, la temperatura ambiente en época de verano alcanza hasta los 47 °C, lo que facilita que la temperatura del pavimento alcance temperaturas superiores a los 55 °C. Si la prueba se ejecuta a una temperatura inferior a las registradas en campo, entonces no se está evaluando de manera adecuada el desempeño de la mezcla no se está evaluando de manera adecuada.

Los resultados de este estudio demuestran que las mezclas asfálticas fabricadas con asfalto sin modificar y modificado presentan un desempeño similar cuando se

someten a ensayos a 50 °C de temperatura, pero si la temperatura de prueba se incrementa, se detectan diferencias en el desempeño entre mezclas con diferentes granulometrías y rigideces de asfalto.

Por lo anterior, se considera conveniente modificar la temperatura de prueba considerando el criterio de temperatura crítica de desgranamiento (CST, del inglés: *Critical Stripping Temperatura*). Por debajo de esta temperatura crítica, el material responde deformándose con base en su estabilidad estructural, pero no se desgrana. Por arriba de esta temperatura, el material cambia, el asfalto se desprende del agregado y el material literalmente se desintegra mostrando fallas catastróficas (Romero *et al.*, 2008).

A efectos de determinar la temperatura de prueba de la rueda cargada de Hamburgo, es necesario establecer la temperatura crítica de desgranamiento de la mezcla y la temperatura crítica del asfalto.

La temperatura crítica de desgranamiento de la mezcla se determina realizando ensayos en la rueda cargada de Hamburgo a diferentes temperaturas de prueba. En el asfalto, la temperatura crítica se determina efectuando ensayos en el reómetro de corte dinámico a diferentes temperaturas al residuo de asfalto del horno rotatorio de película delgada (RTFO, por sus siglas en inglés). La temperatura crítica del asfalto es aquella donde el parámetro  $G^*/\sin \delta$  tiene un valor de 2.2 kPa.

De los resultados obtenidos a las diferentes temperaturas de prueba en la rueda cargada de Hamburgo, se determinó la temperatura crítica de desgranamiento de cada una de las mezclas ensayadas. La tabla 3.4 indica las temperaturas críticas de desgranamiento determinadas.

**Tabla 3.2 Temperaturas críticas de desgranamiento de las mezclas**

Grado de desempeño del asfalto (PG)	Temperatura crítica de desgranamiento (°C)	
	T.N 12.5 mm	T.N 19.0 mm
64-16	50	55
76-16	55	60

En cuanto a los resultados de los ensayos al asfalto, las figuras 3.9 y 3.10 muestran las curvas del parámetro  $G^*/\sin \delta$  (anexo 2). La temperatura crítica del asfalto se calcula con la ecuación de regresión de la gráfica temperatura versus el parámetro  $G^*/\sin \delta$ , evaluado en el residuo del RTFO con el reómetro de corte dinámico a diferentes temperaturas.

Las temperaturas críticas calculadas para ambos asfaltos utilizados se indican en la tabla 3.3.

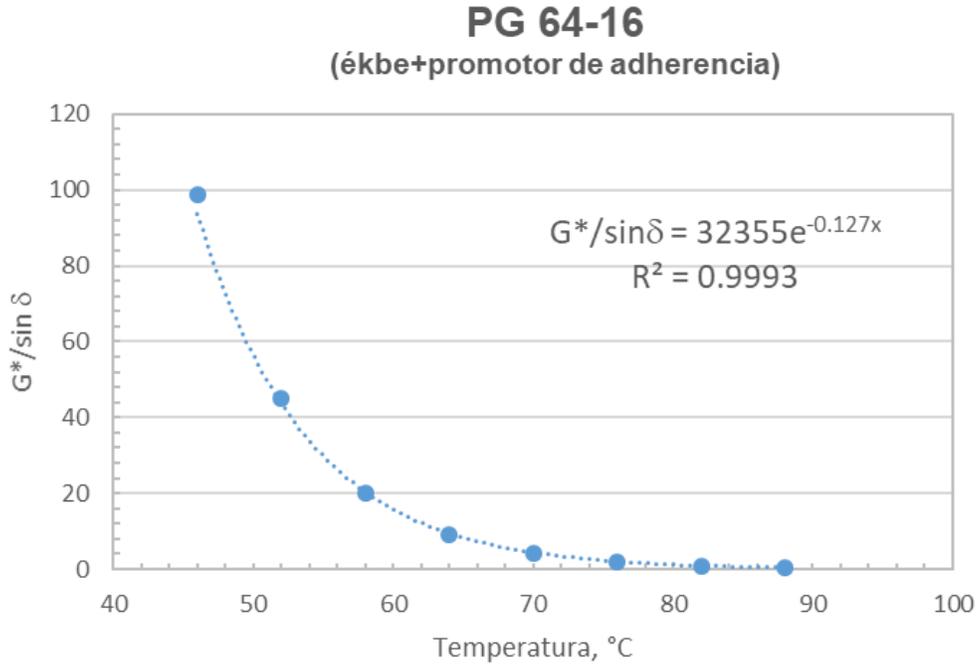


Figura 3.8 Grafica de parámetro  $G^*/\sin \delta$  del residuo de asfalto PG 64-16

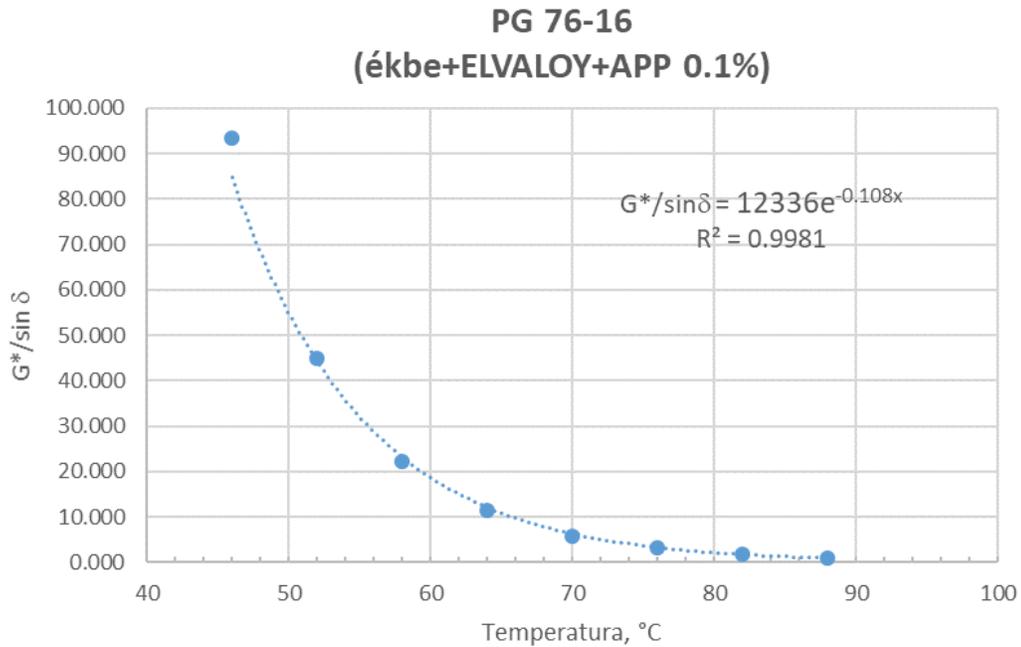


Figura 3.9 Grafica de parámetro  $G^*/\sin \delta$  del residuo de asfalto PG 76-16

Tabla 3.3 Temperaturas críticas del asfalto

Grado PG	T <sub>crítica</sub>
64-16	75.5
76-16	79.9

La figura 3.6 muestra la relación de la temperatura crítica de desgranamiento de la mezcla y la temperatura crítica del asfalto para determinar la temperatura de prueba de la rueda cargada de Hamburgo. Los datos recabados en este estudio son muy pocos y el coeficiente de determinación obtenido es muy bajo, de modo que no se pueden determinar de manera confiable las temperaturas de prueba para la rueda cargada de Hamburgo. Por ello, es necesario continuar con la investigación en agregado con un desempeño pobre a la deformación permanente, como los empleados en la zona del sureste y norte del país, y con asfaltos modificados con otros aditivos.

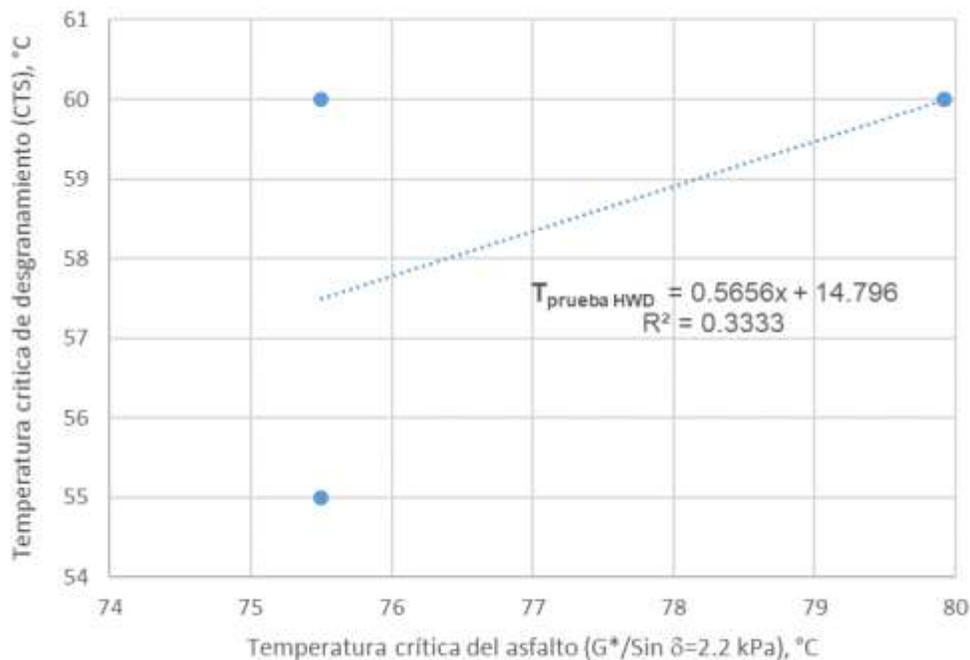


Figura 3.10 Relación entre la temperatura crítica de desgranamiento de la mezcla y la temperatura crítica del asfalto



## 4 Conclusiones

---

En este estudio se evaluaron mezclas con asfalto PG 64-16 y PG 76-16, y granulometrías de 12.5 y 19.0 mm de tamaño nominal a diferentes temperaturas de prueba en la rueda cargada de Hamburgo. Las mezclas asfálticas de 19.00 mm presentaron un buen desempeño, mientras que las mezclas de 12.5 mm son más susceptibles a la deformación permanente y el daño por humedad.

Se observó que la temperatura de prueba tiene un efecto importante en los resultados de la rueda cargada de Hamburgo. Cuando las mezclas se ensayaron a 50 °C de temperatura, todas presentaron un desempeño similar, pero si la temperatura de prueba se incrementa, se detectan diferencias en el desempeño. Para temperaturas de hasta 50 °C, el desempeño a la deformación permanente de la mezcla puede mejorarse incrementando el grado PG del asfalto, pero para temperaturas mayores a 50 °C, un cambio en la granulometría contribuye en mayor medida a mejorar el desempeño de la mezcla a la deformación permanente que un incremento del grado PG del asfalto.

Los datos recabados en este estudio son muy pocos y, por lo tanto, no se pueden determinar las temperaturas de prueba para la rueda cargada de Hamburgo, además de que se utilizó un solo tipo de agregado con un buen desempeño ya conocido. Por ello, se concluye que es necesario continuar la investigación en agregados con un desempeño pobre, como los empleados en la zona sureste y norte del país, y con asfaltos modificados con otros aditivos.



## Bibliografía

---

- Aschenbrener, Timothy y Currier Gray. *Influence of testing variables on the results from the Hamburg Wheel Tracking Device*. Report No. CDOT-DTD-R-93-22. Colorado Department of Transportation, 1993.
- Aschenbrener, Timothy. "Evaluation of Hamburg Wheel Tracking Device to Predict Moisture Damage in Hot Mix Asphalt". Transportation Research Record 1492: *Hot Mix Asphalt Design, Testing, Evaluation and Performance*. pp. 193-201, 1995.
- Ayala del Toro, Yelitza; Delgado Alamilla, Horacio; Guzmán Ortiz, Dulce Valeria, y Salazar Rivera, Aldo. *Manual de ensayos para laboratorio, "Mezclas asfálticas en caliente (MAC) Parte I para el cálculo de volumetría y ensayos de desempeño"*. Publicación técnica núm. 516. San fanfila, Qro., 2018, pp 41-48.
- Mohammad, Louay N.; Elseifi Mostafa A.; Raghavendra, Amar, y Ye Menggiu. *Hamburg Wheel-Track Test Equipment Requirements and Improvements to AASHTO T 324*. Report 219. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), September de 2015, pp. 27-29.
- Rahman, Farhana y Mustaque, Hossain. *Review and Analysis of Hamburg Wheel Tracking Device Test Data*. Report No. KS 14-1, Final Report. Kansas State University Transportation Center, 2014.
- Romero, Pedro; Vanfrank Kevin, y Nielson Jason N. *Analysis of the Hamburg wheel-tracking device to predict behavior of asphalt mixtures at different test temperatures*. Report No. UT-08.29. Utah Department of Transportation, 2008.
- Texas Department of Transportation (Tx DOT). *Hamburg Wheel Test, Technical Advisory*, 2006.
- Walubita Lubinda F.; Faruk Abu N. M.; Zhang Jun; Hu Xiaodi, y Lee Sag Ick. "The Hamburg rutting test – Effects of HMA sample sitting time and test temperature variation". *Journal Construction and Building Materials*, 2016, vol. 108, pp. 22-28.
- Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC, A.C). "Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013: Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño". Julio de 2013.



# Anexo 1. Resultados de las pruebas realizadas al asfalto

RESULTADOS			Muestra: EKBÉ		
Propiedades Físicas					
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024-02	25 °C	Re	8.0 %	N/A
Punto de reblandecimiento	ASTM D36-14	N/A	Pr	50.5 °C	N/A
Densidad relativa	ASTM D70-09	25 °C	G <sub>b</sub>	1.031	N/A
Grado PG - ASTM D6373-16					
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	η	0.497 Pa·s	≤ 3 Pa·s
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	64 °C	G*/senδ	1.980 kPa	≥ 1 kPa
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12					
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.442 %	≤ 1.0%
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	64 °C	G*/senδ	9.070 kPa	≥ 2.2 kPa
Después de envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-13					
Envejecimiento PAV	ASTM D6521-13	100 °C	N/A		
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	28 °C	G*(senδ)	2609.5 kPa	≤ 5,000 kPa
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-6 °C	S	75.5 MPa	≤ 300 MPa
			m	0.328	≥ 0.300

Esta muestra de ligante asfáltico se clasifica como un:

**PG 64 - 16**

RESULTADOS			Muestra: Ekbé+Elvaloy0.75%+PPA0.1%		
Propiedades Físicas					
Ensayo	Norma	Temperatura de ensayo	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024-02	25 °C	Re	36.50 %	N/A
Punto de reblandecimiento	ASTM D36-14	N/A	Pr	60.870 °C	N/A
Densidad relativa	ASTM D70-09	25 °C	G <sub>b</sub>	-	N/A
Grado PG - ASTM D6373-15					
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	η	0.871 Pa·s	≤ 3 Pa·s
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	76 °C	G*/senδ	1.450 kPa	≥ 1 kPa
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12					
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.312%	≤ 1.0%
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	76 °C	G*/senδ	3.139 kPa	≥ 2.2 kPa
Después de envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-13					
Envejecimiento PAV	ASTM D6521-13	100 °C	N/A		
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	31 °C	G*(senδ)	1718 kPa	≤ 5,000 kPa
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-6 °C	S	76.40 MPa	≤ 300 MPa
			m	0.3250	≥ 0.300
<p>Esta muestra de ligante asfáltico se clasifica como un:</p> <p style="text-align: center;"><b>PG 76 - 16</b></p>					

## Anexo 2. Resultados de barrido de temperaturas al residuo de RTFO en el reómetro de corte dinámico

---

Asfalto PG 64-16			
Temperatura °C	G* (kPa)	$\delta$	G*/sin $\delta$ (kPa)
46	88.795	64.0	98.83
52	41.220	66.6	44.90
58	18.710	69.8	19.93
64	8.679	73.1	9.07
70	4.067	76.5	4.19
76	1.969	79.5	2.00
82	0.949	82.3	0.96
88	0.492	84.5	0.49

Asfalto PG 76-16			
Temperatura (°C)	G* (kPa)	$\delta$	G*/sin $\delta$ (kPa)
46	80.800	59.99	93.310
52	39.380	60.98	45.035
58	19.715	61.99	22.330
64	10.072	63.08	11.295
70	5.261	64.39	5.834
76	2.869	66.03	3.139
82	1.625	67.93	1.753
88	0.936	70.08	0.996



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”  
Parque Tecnológico San Fandila  
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México  
CP 76703  
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610  
Fax +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad  
certificada bajo la norma ISO 9001:2015