



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTA EVALUADAS PARA DIFERENTES NIVELES DE DENSIFICACIÓN

Carlos Humberto Fonseca Rodríguez¹, Rodolfo Villalobos Dávila², Juan Carlos Prieto Cadena³

¹ Maestro Emérito Tecnológico de Monterrey, México, carlos.fonseca@tec.mx

² Empresa PETROTEKNO, S.A. de C.V., México, rvd@petrotekno.com.mx

³ Empresa PETROTEKNO, S.A. de C.V., México, prietomec@hotmail.com

Resumen

Empleando dos tipos de cementos asfálticos grado PG64-22 y PG76-22, agregado pétreos de procedencia caliza y granito, se realizó un estudio que da lugar a este trabajo técnico, el cual evalúa en la mezcla asfáltica compacta propiedades mecánicas como, la resistencia a tensión indirecta, Indirect Tensile Strength, ITS, (ASTM D6931), la capacidad o resistencia al agrietamiento, IDEAL-CT, (ASTM D8225), y la resistencia a deformaciones plásticas permanentes, Hamburg Wheel Tracking, HWT, (AASHTO T 324). Reproducir en el sitio de trabajo las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica, evaluadas en un proceso de diseño en el laboratorio es un proceso que contribuye a lograr un buen comportamiento de la capa asfáltica del pavimento. La normativa de diseño de mezclas asfálticas densas de alto desempeño en México considera el diseño para cuatro (4) niveles, Nivel I, II, III y IV, en función del número de ejes equivalentes, W_{18} , y para cada nivel de diseño, se considera un número de giros de diseño, N_{dis} , 50, 75, 100 y 125 giros, respectivamente, en el compactador giratorio. Para mezclas asfálticas bajo los cuatro niveles de compactación, se evaluaron las propiedades mecánicas descritas y se obtuvieron resultados que indican la importancia que tiene una buena consolidación en los procesos de compactación, para que las mezclas asfálticas tengan propiedades mecánicas apropiadas.

Palabras clave: Diseño balanceado de mezclas asfálticas. Resistencia a deformaciones plásticas permanentes. Resistencia al agrietamiento. Método IDEAL CT_{index}. Hamburgo Wheel Tracking, HWT.

1 Introducción

El proceso de construcción de una capa de mezcla asfáltica, es un sistema que de manera jerárquica se divide en ocho etapas, las cuales son: acopio de agregados pétreos (Etapa 1); abastecimiento de agregados pétreos (Etapa 2); calentamiento del agregado pétreo (Etapa 3); calentamiento del cemento asfáltico (Etapa 4); manufactura de la mezcla asfáltica (Etapa 5); transporte de la mezcla asfáltica (Etapa 6); extendido de la mezcla asfáltica (Etapa 7) y compactación de mezcla asfáltica (Etapa 8). [1, 2].

Al ser un sistema, las ocho etapas tienen que realizarse de manera eficiente y con alta calidad, ya que, si falla una de ellas el sistema no funciona. La Etapa 8, compactación o densificación, consiste en un proceso de densificar o reducir el volumen de la masa de mezcla asfáltica tendido empleando equipos o maquinaria que aplican presión, amasado y vibración a la capa en el lugar. Lograr una buena compactación es de suma importancia para que la capa en sí, y el pavimento, tengan un adecuado comportamiento durante su vida útil.

La calidad final de la capa depende del procedimiento de compactación, tipo y número de compactador, número de pasadas, temperatura de compactación y patrón de compactación, calidad que se ve reflejada en el módulo, en la rigidez o resistencia considerada de la mezcla asfáltica. Otros factores

que intervienen en la densificación son el tipo o propiedades de la capa con mezcla asfáltica, el tipo y propiedades de las capas subyacentes, el espesor de la capa y la temperatura del medio ambiente del sitio.

Entre el espesor de la capa, la temperatura de la mezcla asfáltica y la temperatura al aire, juegan a tres bandas en el proceso de densificación, en cual hay que tener claro que entre mayor es el gradiente de temperatura, ΔT , entre mezcla asfáltica y temperatura al aire, mayor será el flujo o transferencia de calor. Este fenómeno físico se da mediante un traspaso de energía calorífica de la mezcla asfáltica en caliente hacia el medio ambiente, conocido como radiación, hasta lograrse un equilibrio térmico tipo exotérmico. Una mezcla asfáltica en caliente, 150°C , en una capa gruesa de 10.0 centímetros, para llegar a la temperatura de compactación de 120°C requiere de más tiempo que una capa delgada de 3.0 centímetros en las mismas condiciones. Este tiempo es función de flujo de calor neto el cual se determina considerando la diferencia de temperaturas a la cuarta potencia de la temperatura absoluta, de acuerdo al enunciado Kelvin-Planck.

2 Antecedentes

Para el diseño volumétrico de mezclas asfálticas, muchas de las instituciones municipales y estatales responsables de estos procesos en México, especifican para proyectos de estudios de materiales, diseño, construcción y conservación de pavimentos, las normas de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, SICT. Específicamente en el Estado de Nuevo León, la Ley para la Construcción y Rehabilitación de Pavimentos del Estado, permiten que se especifique de la misma forma.

En los procesos de diseño de mezclas asfálticas, para capas intermedias y de rodamiento de pavimentos flexibles, en México se suele emplear el método Marshall, cuya norma SICT M-MMP-4-05-034-23, fue actualizada el 31 de octubre 2023. [3-5].

Adicionalmente, en muchos proyectos de pavimentos para vialidades de alto tránsito, las dependencias diseñan las mezclas asfálticas mediante la metodología conocida como Protocolo AMAAC, desarrollado en 2008 y con revisiones y/o actualizaciones en 2011 y 2013. [6-8]. Este Protocolo recoge experiencias y buenas prácticas para el diseño de metodologías desarrolladas en Estados Unidos (SUPERPAVE), España, Francia y México.

3 Objetivo

Siguiendo la metodología de diseño Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013 [6], para el diseño de la mezcla asfáltica, mediante el diseño volumétrico se obtuvo el contenido de cemento asfáltico óptimo, CCA_{opt} , en este trabajo técnico se tiene como objetivo evaluar las propiedades de comportamiento de la mezcla asfáltica mediante la resistencia a tensión indirecta, Indirect Tensile Strength, ITS, (ASTM D6931), [9], la capacidad o resistencia al agrietamiento, IDEAL-CT, (ASTM D8225), [10] y la resistencia a deformaciones plásticas permanentes, Hamburg Wheel Tracking Test, HWTT, (AASHTO T 324), [11], para cuatro diferentes niveles de densificación de la mezcla asfáltica, empleando el compactador giratorio, $N_{\text{dis}}/N_{\text{máx}}$: 50/75, 75/115, 100/160 y 125/205 giros.

4 Metodología y planeación

La evaluación de los valores de propiedades volumétricas y de propiedades de comportamiento de la mezcla asfáltica, para los dos tipos de cementos asfálticos, PG76-22 y PG64-22 se realizó mediante la elaboración de un total de 96 probetas, densificadas mediante el compactador giratorio con una presión de 600 ± 18 kPa perpendicular al eje del molde cilíndrico de 150 mm de diámetro, un ángulo de giro externo de $1.25^{\circ} \pm 0.02^{\circ}$ con respecto al plano horizontal y una velocidad rotacional de 30 ± 0.5 revoluciones por minuto.

De las 96 probetas, la mitad se manufacturaron con cemento asfáltico PG76-22 y la otra mitad con el cemento asfáltico PG64-22, y en cada tipo se logró una densificación con diferentes niveles de energía y de acuerdo a lo establecido en la Tabla 1, número de giros $N_{dis}/N_{máx}$: 50/70; 75/115; 100/160 y 125/205. Para cada número de giro se evaluó la resistencia a tensión indirecta, la resistencia al agrietamiento y la resistencia a deformaciones plásticas permanentes.

Tabla 1. Niveles de compactación considerados.

ESALs de diseño (millones)	Números de Giros para Compactación			Aplicaciones típicas
	$N_{inicial}$	$N_{diseño}$	$N_{máximo}$	
< 0.3	6	50	75	Tránsito muy ligero (caminos locales, calles de ciudades donde los camiones están prohibidos)
de 0.3 a 3.0	7	75	115	Tránsito medio (carreteras alimentadoras, libramientos)
de 3.0 a 30.0	8	100	160	Tránsito medio a alto (calles de ciudades, caminos estatales, interestatales)
> 30.0	9	125	205	Alto tránsito (intersecciones, subidas, estacionamientos de camiones)

Fuente: Protocolo AMAACPA-MA-01/2013

4.1 Propiedades volumétricas para diseño de la mezcla asfáltica.

La mezcla asfáltica se diseñó de acuerdo a las especificaciones definidas en el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013, [6], y para un número de ejes equivalentes de diseño entre 3.0 y 30.0 millones. Estas especificaciones se muestran en la Tabla 2 a continuación.

Tabla 2. Especificaciones Protocolo AMAAC.

ESALs de diseño (millones)	Densidad de Mezcla Asfáltica, G_{mb} , como porcentaje de G_{mm}			Tamaño Máximo Nominal de Agregado	% VAM Mínimo	ESALs de diseño (millones)	Porcentaje de Vacío Llenos de Asfalto VAF
	$N_{inicial}$	$N_{diseño}$	$N_{máximo}$				
< 0.3	≤ 91.5			9.5 mm	15.0	< 0.3	70 - 80
de 0.3 a 3.0	≤ 90.5			12.5 mm	14.0	de 0.3 a 3.0	65 - 78
de 3.0 a 30.0	≤ 89.0	96	98	19.0 mm	13.0	de 3.0 a 30.0	
> 30.0	≤ 89.0			25.0 mm	12.0		
				37.5 mm	11.0	> 30.0	65 - 75

Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA-01/2013

Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA-01/2013

Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA-01/2013

Los agregados pétreos son de procedencia mineralógica calizo y granito, cumpliendo con las propiedades mecánicas, de origen y de consenso, y con ellas poder garantizar un excelente comportamiento en la vida de servicio de la mezcla asfáltica densa, en el pavimento. Los materiales muestreados y caracterizados en sus diferentes fracciones fueron los siguientes:

- Grava de procedencia caliza de ¾" a ¼".
- Sello de procedencia caliza de 3/8" a ¼".
- Grava de procedencia granito de ¾" a ¼".
- Sello de procedencia granito de 3/8" a ¼".
- Arena No.4 de procedencia caliza de ¼" a Malla No. 200.

- Rellenador (Filler) de procedencia caliza, pasa 100% Malla No. 200.

La granulometría empleada en la mezcla asfáltica se muestra en la Tabla 3 y Figura 1 a continuación. Se proporcionan los límites granulométricos de la mezcla asfáltica, así como las tolerancias en cada malla. Se integró una mezcla asfáltica de tamaño máximo nominal de 1/2" (12.5 mm) y tamaño máximo de 3/4" (19.0 mm).

Tabla 3. Granulometría de la mezcla asfáltica.

Mallas	3/4" (19.0 mm)	1/2" (12.5 mm)	3/8" (9.5 mm)	1/4" (6.3 mm)	No. 4 (4.75 mm)	No. 8 (2.36 mm)	No. 16 (1.18 mm)	No. 30 (600 µm)	No. 50 (300 µm)	No. 100 (150 µm)	No. 200 (75 µm)
Límites (%)	100	90-100	72-90	58-78	48-72	30-58	20-46	14-34	10-24	6-16	2-10
Granulometría (%)	100.0	95.0	82.0	65.1	57.5	40.0	28.0	20.0	13.0	8.0	6.0
Tolerancia (%)	+/- 2.0	+/- 2.0	+/- 2.0	+/- 2.0	+/- 2.0	+/- 1.5	+/- 1.5	+/- 1.5	+/- 1.5	+/- 1.5	+/- 1.0

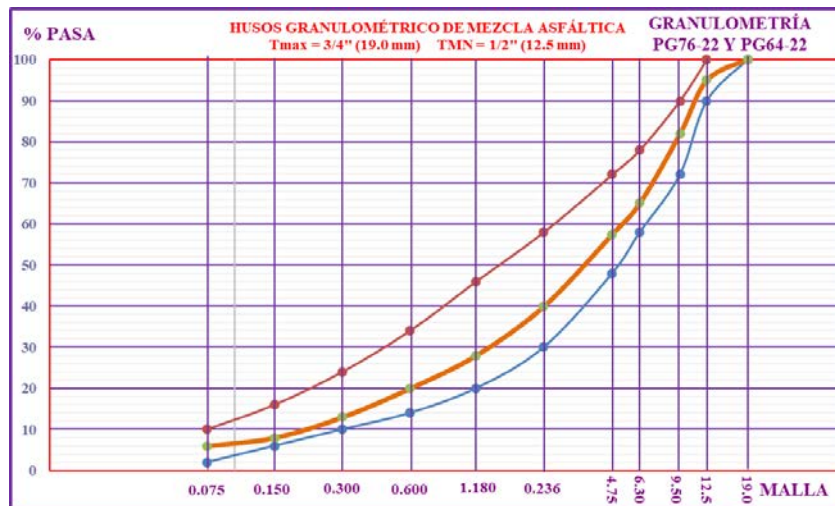


Figura 1. Granulometría de la mezcla asfáltica.

Los cementos asfálticos vírgenes empleados en el estudio, uno es modificado con polímero tipo SBS, PG76-22, y el otro convencional, PG64-22. La viscosidad dinámica por el equipo rotacional, a una temperatura de 135°C es igual a 1.133 y 0.521 Pa.s, para los cementos asfálticos PG76-22 y PG64-22, respectivamente, y ambos cumplen con valores menores al máximo especificado, 3.0 Pa.s, ASTM D4402.

Los valores de recuperación elástica por torsión para el PG76-22 y PG64-22, están en valores de 63.5% y 8.6, NLT-329, recuperación elástica por ductilómetro 68.3% y 11.5%, AASHTO T301, y son valores típicos de cementos asfálticos modificado con polímero y convencionales, respectivamente. De igual forma, para ambos cementos asfálticos el valor del índice de penetración, NLT-181, es de 1.885 y 0.833, respectivamente.

El contenido de cemento asfáltico óptimo, CCA_{opt} , se define para un porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica, $V_a = 4.0\%$. A continuación, en la Figura 2 se muestran las gráficas obtenidas del proceso de diseño y evaluación de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.

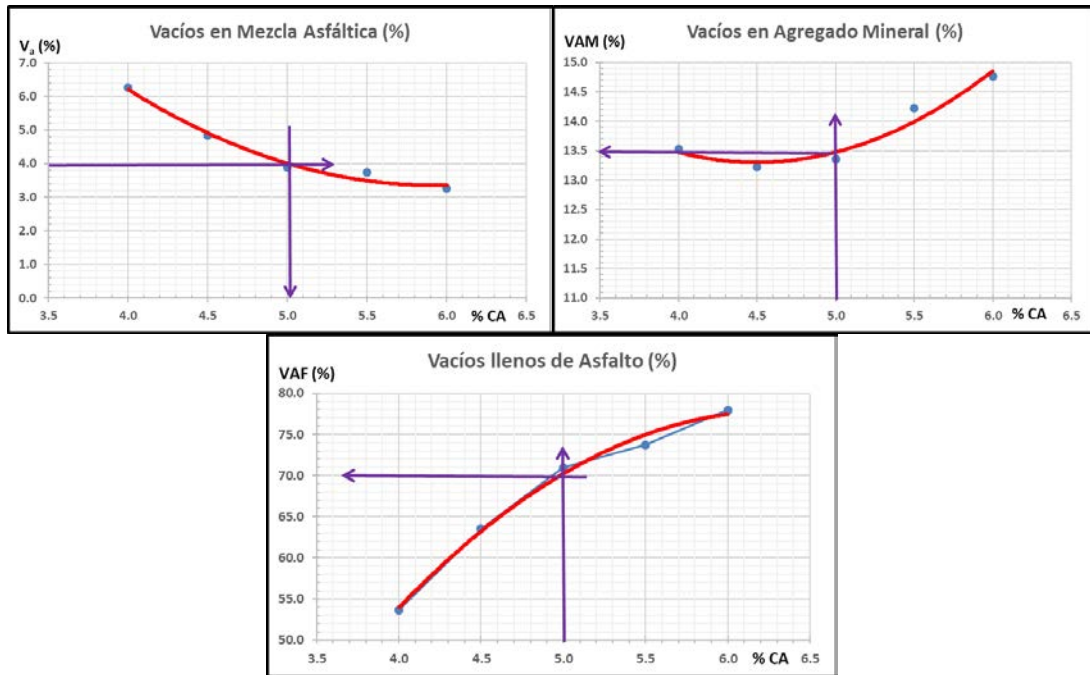


Figura 2. Propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.

Con este valor de CCA_{opt} de 5.0% en peso de agregado pétreo se determina el porcentaje de vacíos en el agregado mineral, VAM, resultando un valor de 13.5%, y el valor de vacíos llenos de cemento asfáltico, VFA, resultando ser de 70.0%. A manera de resumen o conclusión de este diseño se tienen las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica:

- Densidad, $G_{mb} = 2.388$
- Vacíos en la mezcla asfáltica, $V_a = 4.0 \%$
- Vacíos en el agregado pétreo, $VAM = 13.5\%$
- Vacíos llenos de cemento asfáltico, $VAF = 70.0$

4.2 Propiedades volumétricas del estudio de la mezcla asfáltica.

Para cada uno de los niveles de energía de compactación, número de giros $N_{dis}/N_{máx}$: 50/70; 75/115; 100/160 y 125/205, en ambos tipos de cemento asfáltico, se elaboraron 12 probetas, y en la Figura 3, se aprecian los promedios de los 12 valores de vacíos. Las tendencias mostradas es la esperada, ya que, a mayor energía de compactación existe una reducción de los vacíos en la mezcla asfáltica.

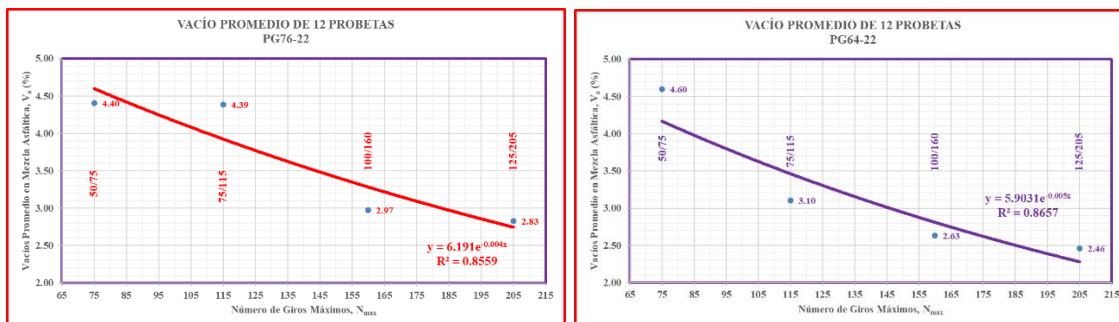


Figura 3. Valores de vacíos en la mezcla asfáltica.

Este es en si el principio del estudio realizado, y que es el objetivo del mismo, evaluar las tendencias de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica a medida que se tienen una mayor densificación. Evaluar cómo cambia la resistencia a tensión indirecta, ITS, (por sus siglas en inglés Indirect Tensile Strength), la resistencia al agrietamiento, IDEAL-CT y la resistencia a deformaciones plásticas permanentes, Hamburg Wheel Tracking, HWT, para cuatro diferentes niveles de densificación de la mezcla asfáltica.

4.2.1 Método Resistencia a Tensión Indirecta, ITS.

Este método para evaluar la resistencia a la tensión indirecta de una mezcla asfáltica, ITS, coadyuva a predecir posibles fallas del pavimento asfáltico como son deformaciones plásticas permanente o daños por humedad. Los dispositivos empleados son los cabezales de rotura Lottman, un marco de carga de estabilidad Marshall, en el cual se pueden ensayar núcleos de pavimento de 101.6 y 150.0 mm de diámetro. Se aplica una carga monótona con velocidad de 50 mm/minuto de desplazamiento, y las temperaturas de prueba pueden ser variables, de acuerdo a las condiciones a estudiar. Se aplica la prueba de resistencia a tensión indirecta descritas en ASTM D6931 y AASHTO T283. [12].

La resistencia a tensión indirecta es la máxima resistencia calculada a partir de la carga máxima aplicada para llegar a rotura y las dimensiones del espécimen, de acuerdo con lo siguiente:

$$ITS = 2P/\pi DH \quad (1)$$

donde:

ITS es la resistencia a la tracción indirecta, en N/mm².

P es la carga máxima, en newtons, N.

D es el diámetro de la muestra, en milímetros, mm.

H es la altura del espécimen, en milímetros, mm.

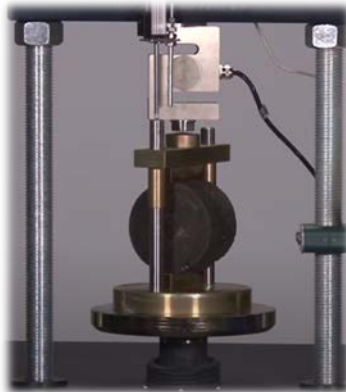


Figura 4. Estabilómetro Marshall y cabezal Lottman.

4.2.2 Método IDEAL-CT.

Este método de prueba, determina el potencial agrietamiento de mezclas asfálticas empleando teoría de un mecanismo de fractura basado en el parámetro Índice de tolerancia al agrietamiento IDEAL CT_{Index}, Cracking Test Index, (por su nombre en inglés, **ind**irect **t**ensile **a**sphalt **c**racking **t**est). [13, 19].

En el procedimiento, se manufactura, se ensayan y se mide la resistencia al agrietamiento de la mezcla de asfalto utilizando muestras cilíndricas de mezcla de asfalto preparadas en laboratorio o núcleos de pavimento de 150 mm de diámetro y 62 mm de altura, con 7.0 ± 0.5 por ciento de huecos

de aire, sin entallas o cortes. La prueba se realiza a temperatura de 25°C, con una carga monótona con velocidad del actuador de 50 mm/minuto de desplazamiento. El método de prueba describe la determinación del índice de tolerancia al agrietamiento, CT_{Index} y otros parámetros determinados a partir de la curva de carga-desplazamiento. Ver Figura 5. Estos parámetros se pueden utilizar para evaluar la resistencia de las mezclas asfálticas al agrietamiento.

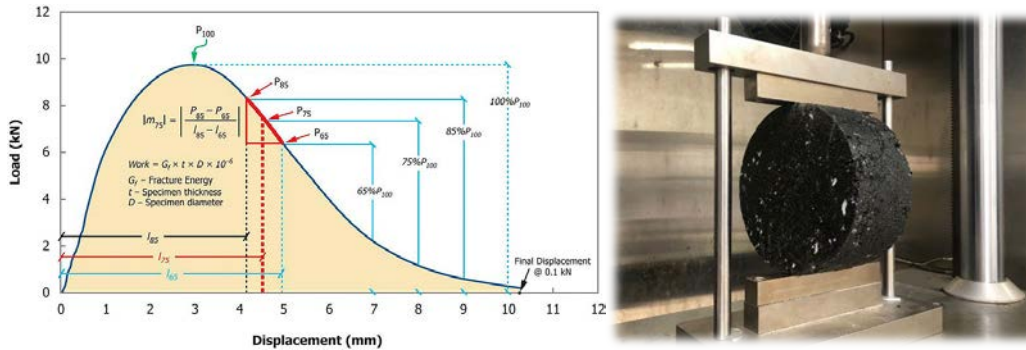


Figura 5. Esquema de dispositivo Tensión Indirecta para ensayo de probetas.

4.3.2 Deformaciones Plásticas Permanentes, DP .

Se empleó el ensayo descrito el procedimiento Susceptibilidad a la Humedad y a las Deformaciones Permanentes por Rodera de una Mezcla Asfáltica por medio de la Rueda Cargada de Hamburgo, o el procedimiento Tex-242-F Hamburg Wheel-Tracking Tests, HWTT, para evaluar la resistencia a deformaciones de mezclas asfálticas compactas. [14, 15].

Este método de prueba determina la susceptibilidad a fallas prematuras de las mezclas bituminosas debido a la debilidad en la estructura del agregado pétreo, rigidez inadecuada del cemento asfáltico o daño inducido por la humedad, y otros factores que influyen en una inadecuada adhesión pasiva entre el cemento asfáltico y el agregado pétreo. Ver Figura 6.



Figura 6. Esquema de dispositivo Rueda Cargada para ensayo de probetas. HWTT.

5 Análisis de resultados

Los especímenes de mezclas asfálticas ensayados en el laboratorio de la empresa PETROTEKNO en Monterrey, como se mencionó en el acápite 4 de este escrito técnico, se manufacturaron con un contenido de cemento asfálticos, PG76-22 y PG64-22, del 5.0% en peso del agregado pétreo.

5.1 Resultados de la resistencia a tensión indirecta, ITS.

En la Figura 7 se presentan los resultados de la resistencia a tensión indirecta evaluada para ambos tipos de cementos asfálticos a una temperatura de 25°C, siguiendo los estándares de la norma ASTM D6931. En ambos casos se evaluó el valor de ITS para los 4 niveles de compactación y en la misma mezcla asfáltica.

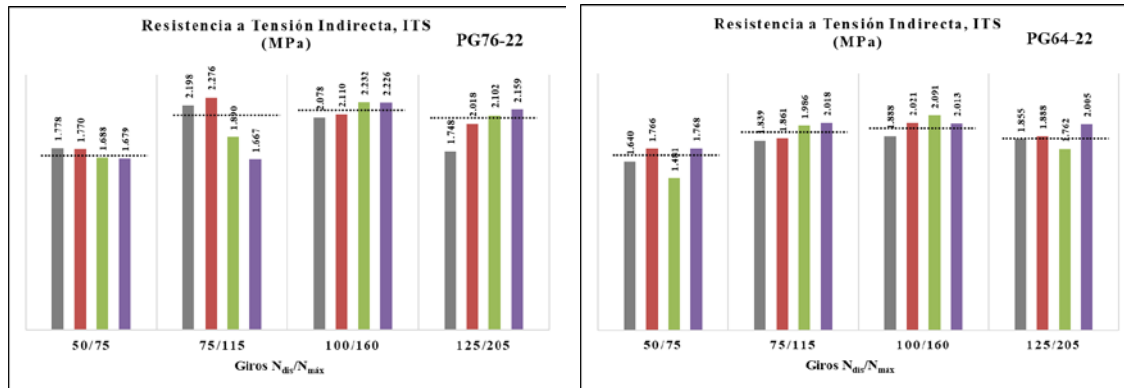


Figura 7. Resistencia a tensión indirecta, ITS, para ambos cementos asfálticos.

Para el cemento asfáltico tipo PG76-22, el promedio de los cuatros especímenes son igual a 1.729; 2.008; 2.162 y 2.007 MPa, para los niveles de compactación, número de giros $N_{dis}/N_{máx}$: 50/70; 75/115; 100/160 y 125/205, respectivamente. Para el cemento asfáltico tipo PG64-22, el promedio de los cuatros especímenes ensayados es igual a 1.664; 1.926; 2.003 y 1.877 MPa, para los mismos niveles de energía de densificación.

Como era de esperar, con el uso del cemento asfáltico modificado con polímero tipo SBS, PG76-22, la resistencia a tensión indirecta es mayor que al emplear un cemento asfáltico convencional, PG64-22, y el porcentaje de incremento para cada nivel de densificación es del 3.91; 4.25; 7.90 y 6.91%, respectivamente. En ambos tipos de cementos asfálticos, la tendencia en los resultados es la misma, a medida que es mayor el nivel de energía de densificación, mayor es la resistencia a tensión indirecta en los tres primeros niveles, sin embargo, en el último nivel la resistencia baja.

Tomando como referencia la resistencia a tensión indirecta inicial, al número de giros $N_{dis}/N_{máx}$ 50/70, este valor se incrementa en porcentaje, para los tres últimos niveles de densificación 75/115; 100/160 y 125/205, un 16.15; 25.04 y 16.10% para el cemento asfáltico modificado PG76-22, y un 15.77; 20.42 y 12.84% para el cemento asfáltico convencional PG64-22.

5.2 Resultados del índice de tolerancia al agrietamiento IDEAL CT_{Index} , Cracking Test Index.

Mediante este ensayo, para cada uno de los dos tipos de cementos asfálticos, PG76-22 y PG64-22, para la misma mezcla asfáltica, sin envejecer, y con un CCA_{opt} igual al 5.0% en peso del agregado pétreo, y para los cuatro niveles de consolidación, se evaluó mediante este ensayo: CT_{Index} ; energía disipada por área, G_f (joules/m²) pendiente de descarga, m_{75} (kN/mm) y Módulo Secante en zona de ascenso, MS (kN/mm). Ver Figura 8 y 9.

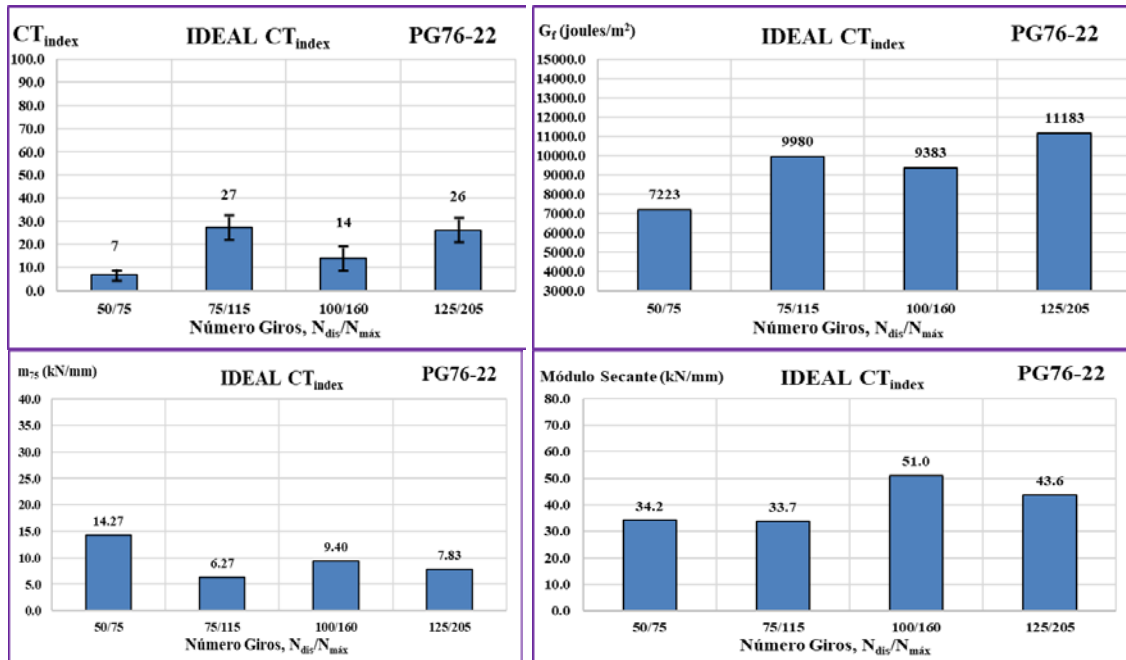


Figura 8. Valores de CT_{index} , G_r , m_{75} y Módulo Secante de mezcla asfáltica con PG76-22.

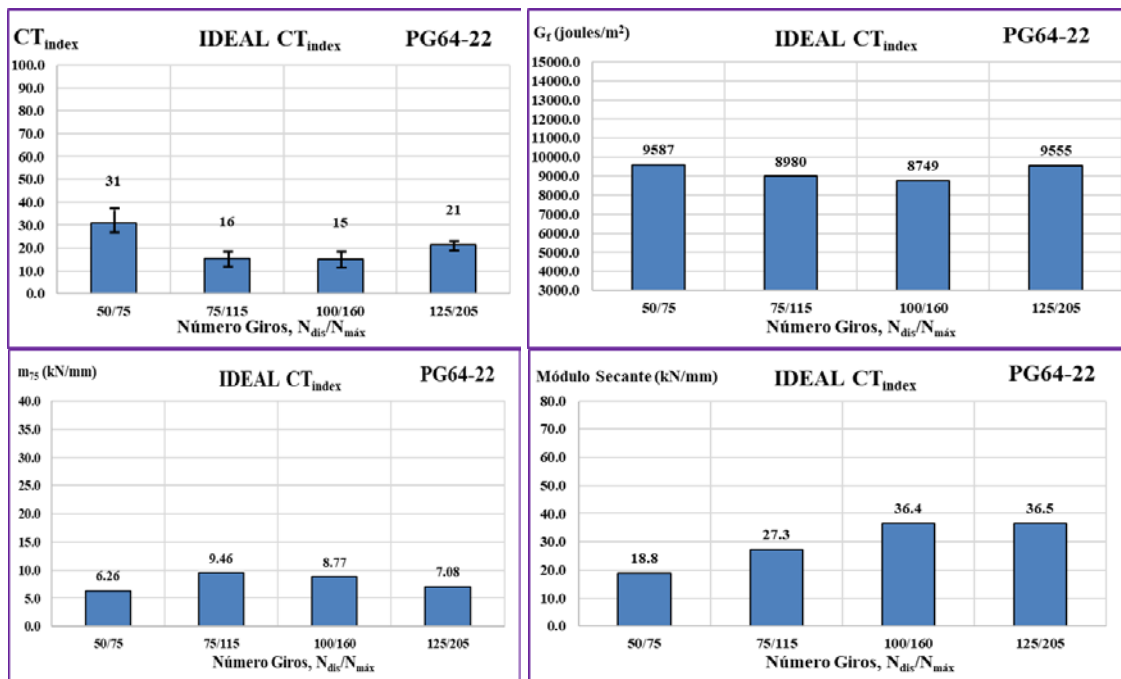


Figura 9. Valores de CT_{index} , G_r y m_{75} y Módulo Secante de mezcla asfáltica con PG64-22.

Evaluar la capacidad al agrietamiento es uno de los principales problemas del pavimento asfáltico. En la actualidad, pocos estudios se han realizado sobre el comportamiento a la fisuración de mezclas asfálticas del campo debido a la dificultad de recogida de muestras. [16]. Conociendo que el agrietamiento es un deterioro que afecta de manera importante el comportamiento del pavimento, hay

que evaluar propiedades mecánicas, cuyos valores indiquen que este deterioro se presentará en un lapso de tiempo mayor.

Entre otros ensayos y diferentes versiones, la prueba del Índice de Flexibilidad de Illinois, I-FIT, es un ensayo simple, rápido, repetible y rentable, que se utiliza para evaluar el potencial de agrietamiento del concreto asfáltico. El Índice de Flexibilidad, FI, es el principal parámetro que aporta el ensayo I-FIT. [17].

Otro ensayo es el FÉNIX, que proporciona de la mezcla asfáltica su curva carga-desplazamiento, la cual, inicialmente provee de un aumento casi lineal del esfuerzo aplicado, que depende de la rigidez de la mezcla. En el ensayo FÉNIX, “se determina un índice de rigidez a tracción, IRT, que es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación entre el 25 y el 50% de la carga máxima. Este parámetro se relaciona muy bien con el módulo dinámico de la mezcla, cuando se aplica este ensayo y el de fatiga de tres puntos en probetas fabricadas con el mismo tipo de mezcla”. [18].

En la Figuras 8 y 9, para los dos tipos de cementos asfálticos, se puede observar que el módulo secante tiene valores de 34.2; 33.7; 51.0 y 43.6 kN/mm para los niveles de compactación, niveles de giros $N_{dis}/N_{máx}$ de 50/75; 75/115; 100/160 y 125/205, respectivamente, para el cemento asfáltico modificado PG76-22. De igual forma, para el cemento asfáltico convencional, PG64-22, se tiene valores de 18.8; 27.3; 36.4 y 36.5 kN/mm, respectivamente. Para ambos cementos asfálticos la tendencia del módulo secante es crecer a medida que es mayor la energía de compactación. Sin embargo, se observa que influencia del cemento asfáltico modificado presenta rango de mayor magnitud que el cemento asfáltico convencional.

Una tendencia similar se presenta en los resultados de la energía disipada por unidad de área de la mezcla asfáltica compacta, G_f , donde los rangos de valores están entre 7223 y 11183 joules/m² y 8749 y 9587 joules/m², para el PG76-22 y PG64-22, respectivamente.

Los valores de CT_{index} se muestran en la Figuras 8 y 9, y las barras representan de variación de valores, o un más/menos de la desviación estándar. Estos valores son 1.4; 5.0; 6.1 y 5.2% para los niveles de compactación considerados respectivamente, para el cemento asfáltico PG76-22. De igual forma, estos valores para el cemento asfáltico PG64-22 son 16.5; 7.0; 8.4 y 4.5%, respectivamente.

En todos los casos el rango de valores de CT_{index} está entre 7 y 31, valores que están muy abajo del valor de 70.0 que la bibliografía define para tener un buen comportamiento al agrietamiento de las mezclas asfálticas. Esto se debe a la estructura granulométrica de la mezcla asfáltica, la cual se empleó con poco contenido de arena, de textura abierta.

5.3 Resultados de las deformaciones plásticas permanentes, *DP*.

De acuerdo a lo especificado por el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013, [6], para los niveles de tránsito bajo, medio, alto y muy alto, se debe cumplir con una deformación máxima de 10.0 mm a las 10,000; 15,000, 20,000 y 20,000, respectivamente. Adicionalmente, los valores de CT_{index} mayores de 70.0, es lo deseable para garantizar un buen comportamiento a la fisuración de la mezcla asfálticas por la acción del tránsito.

Los valores de las deformaciones plásticas permanentes se aprecian en las Figuras 10 y 11, y éstos son menores a medida que se incrementan los niveles de consolidación. Para el cemento asfáltico modificado tipo PG76-22, se tienen valores promedios de 6.73; 3.75; 1.10 y 0.50 mm a las 20,000 pasadas (10,000 ciclos), para niveles de giros $N_{dis}/N_{máx}$ de 50/75; 75/115; 100/160 y 125/205, respectivamente. Para el cemento asfáltico convencional tipo PG64-22, los valores promedios son igual a 11.26; 8.15; 4.63 y 3.13 mm, respectivamente.

Para las deformaciones plásticas permanentes, en todas evaluaciones se cumplen con el mayor máximo en México de 10.0 mm a las 20,000 pasadas, excepto para la primera condición de compactación de $N_{dis}/N_{máx}$ de 50/75 para el PG64-22. La influencia del cemento asfáltico modificado

es clara, se tiene un mínimo del 67.2% de reducción de la deformación plástica permanente empleando cemento asfáltico convencional que el modificado.

Para ambos cementos asfálticos, los valores de CT_{index} y HWTT ubican a la mezcla asfáltica en la zona donde el comportamiento a deformaciones plásticas permanente es muy bueno, sin embargo, son ambas mezclas asfálticas que, al incrementarse el nivel de consolidación, no se logra un comportamiento adecuado al agrietamiento.

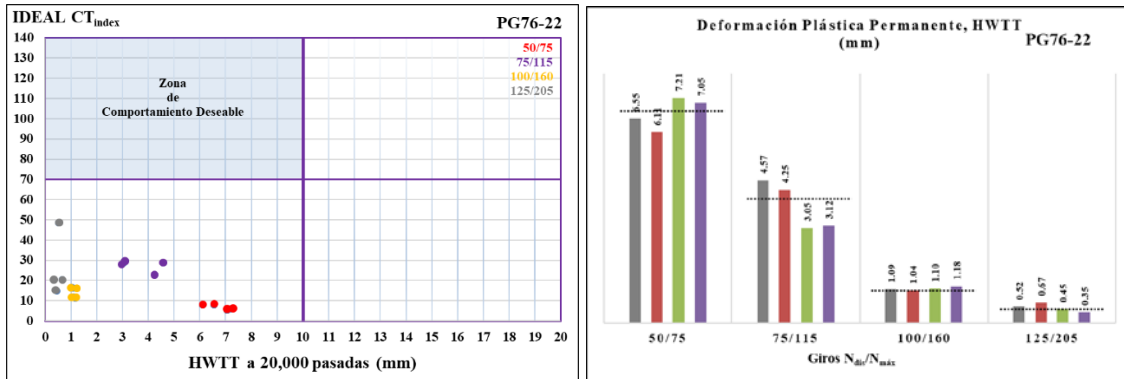


Figura 10. Valores de CT_{index} y deformación HWTT de la mezcla asfáltica con PG76-22.

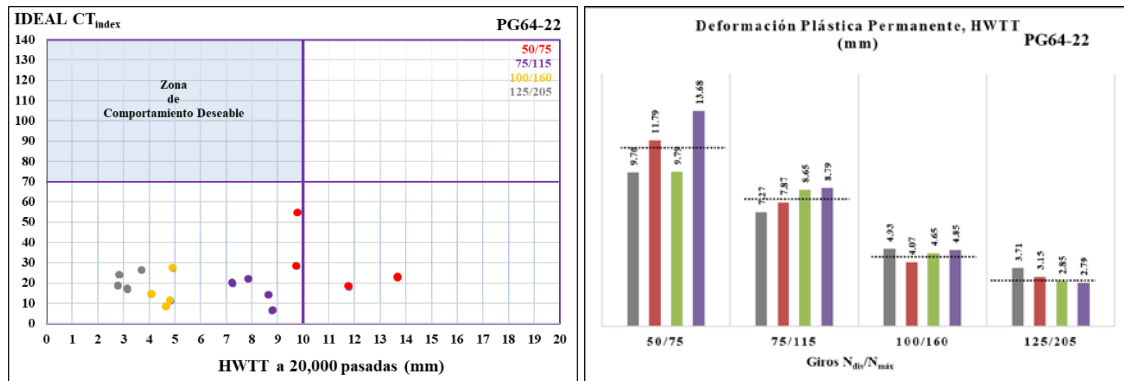


Figura 11. Valores de CT_{index} y deformación HWTT de la mezcla asfáltica con PG64-22.

6 Conclusiones

De acuerdo a los hallazgos de este estudio de investigación, con soporte en los resultados obtenidos en los ensayos practicados a los diferentes materiales, a manera de conclusión se puede mencionar lo siguiente.

La resistencia a tensión indirecta de una mezcla asfáltica compacta, se incrementa a medida que se incrementa el nivel de densificación, sin embargo, llega a un valor máximo, y a mayor densificación se da un decremento de resistencia.

Para ambos cementos asfálticos la tendencia del módulo secante es crecer a medida que es mayor la energía de compactación. Sin embargo, se observa que influencia del cemento asfáltico modificado presenta rango de mayor magnitud que el cemento asfáltico convencional.

Una tendencia similar se presenta en los resultados de la energía disipada por unidad de área de la mezcla asfáltica compacta, G_f , donde los valores se incrementan con el nivel de energía de densificación para ambos cementos asfálticos PG76-22, modificado, y PG64-22, convencional.

En todos los casos el rango de valores de CT_{index} está entre 7 y 31, valores que están muy abajo del valor de 70.0 que la bibliografía define para tener un buen comportamiento al agrietamiento de las mezclas asfálticas. La granulometría interviene mucho en estos resultados.

A medida que se incrementa el nivel de compactación, la mezcla asfáltica evaluada si presenta un buen comportamiento a las deformaciones plásticas permanentes, pero no es así cuando se evalúa el comportamiento al agrietamiento medido mediante el CT_{index} . Esto es producto del tipo de granulometría. La mezcla asfáltica evaluada tiene una granulometría abierta, poca arena, y no se logra una consolidación como las mezclas asfálticas densas convencionales.

7 Referencias

- [1] Bo Peng, Xiaoying Tong, Shijiang Cao, Wenying Li, and Gui Xu. (2020). *Carbon Emission Calculation Method and Low-Carbon Technology for Use in Expressway Construction*. Sustainability 2020, 12, 3219; doi:10.3390/su12083219. www.mdpi.com/journal/sustainability. China.
- [2] Peng, B., Cai, C., Yin, G., Li, W., Zhan, Y. (2015). *Evaluation system for CO₂ emission of hot asphalt mixture*. Journal of traffic and transportation engineering, pp 2(2): 116-124 www.elsevier.com/locate/jtte. China.
- [3] M-MMP-4-05-034/23: Método Marshall para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa. Norma SICT Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. México, Octubre 2023.
- [4] ASTM D6927. (2022). Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures.
- [5] ASTM D5581-07A. (2021) e1. Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (6 in. Diameter Specimen).
- [6] Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013. (2013). Diseño de Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa de Alto Desempeño. CDMX. Julio 2013. 2011. ISBN 978-607-8134-19-9.
- [7] Protocolo AMAAC PA-MA 01/2011. (2011). Diseño de Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa de Alto Desempeño. CDMX. 2011. ISBN 978-607-8134-02-1.
- [8] Protocolo AMAAC 00/2008. (2008). Diseño de Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa de Alto Desempeño. CDMX. Agosto 2008.
- [9] ASTM D6931. (2017). Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures.
- [10] ASTM D8225. (2019). Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature.
- [11] AASHTO Designation: T 324. (2019). Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures.
- [12] ASTM D6931. (2012). Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures.
- [13] ASTM D8225. (2019). Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature.
- [14] TxDOT Designation: Tex-242-F. (2021). HAMBURG WHEEL-TRACKING TEST. Texas Department of Transportation, TxDOT. Austin, Texas.
- [15] AASHTO T 324. (2023). Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures.
- [16] Duo Xu, Fujian Ni, Hui Du, Zili Zhao, Jingling Wang and Sheng Chen. (2023). Investigation of Factors Affecting the Intermediate-Temperature Cracking Resistance of In-Situ Asphalt Mixtures Based on Semi-Circular Bending Test. Coatings 2023, 13, 384. <https://doi.org/10.3390/coatings13020384> <https://www.mdpi.com/journal/coatings>.
- [17] Uthman Mohamed Ali, Imad L. Al-Qadi, and Hassan Ozer. (2020). Flexibility Index Threshold Optimization for Various Asphalt Concrete Mixes and Climatic Conditions. Transportation Research Record 2020, Vol. 2674(1) 104–112.

[18] Pérez-Jiménez, F.E., Valdés Vidal, G., Muñoz Olive, M., Riró Recasens, R., Martínez Reguero, A.H., Botella Nieto, R. y Amorós Parras, J. (2014). Criterios y Especificaciones para el Uso del Ensayo FÉMIX en el Diseño de Mezclas Bituminosas Tipo AC, Comunicación 27, IX Jornada Nacional ASEFMA.

[19] TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR Number E-C251. (2019). Relationship Between Laboratory Cracking Tests and Field Performance of Asphalt Mixtures. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 2019 EXECUTIVE COMMITTEE OFFICERS. Transportation Research Board 500 Fifth Street, NW Washington, D.C. 20001.