



MANUAL DE ENSAYOS PARA LABORATORIO

MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE (MAC) PARTE 1

PARA EL CÁLCULO DE VOLUMETRÍA Y ENSAYOS DE DESEMPEÑO

Yelitza Ayala del Toro
Horacio Delgado Alamilla
Dulce Valeria Guzmán Ortiz
Aldo Zayd Salazar Rivera

**Publicación Técnica No. 516
Sanfandila, Qro, 2018**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Manual de Ensayos para Laboratorio
Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC) - Parte 1
Para el cálculo de volumetría y ensayos de
desempeño

Publicación Técnica No. 516
Sanfandila, Qro, 2018

Esta investigación fue realizada en la Coordinación Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por la M.I. Yelitza Ayala del Toro, el Dr. Horacio Delgado Alamilla y los Ingenieros Dulce Valeria Guzmán Ortiz y Aldo Zayd Salazar Rivera.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna IE-08/17 Evaluación inter-laboratorios de ensayos en materiales pétreos y asfálticos para su uso en mezclas asfálticas 2017.

Se agradece la colaboración del Dr. Rosemberg Reyes Ramírez de la Universidad de las Américas de Puebla en la revisión del documento.

Contenido

Índice de tablas	vii
Índice de figuras	ix
Sinopsis.....	xi
Abstract	xiii
Resumen ejecutivo	xv
Introducción.....	1
1 MAC-I Método de prueba para la preparación y compactación de especímenes de mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador giratorio	3
1.1 Objetivo	3
1.2 Equipo y herramientas	3
1.3 Calibraciones y/o verificaciones	4
1.4 Método de prueba	4
1.4.1 Preparación del equipo.....	4
1.4.2 Preparación de la muestra.....	5
1.4.3 Ejecución de la prueba	7
1.5 Cálculos	8
1.5.1 Determinación de la gravedad específica bruta G_{mb}	8
1.5.2 Determinación de la gravedad específica teórica máxima G_{mm}	8
1.5.3 Cálculo del grado de compactación ($\%G_{mm}$) para especímenes de diseño al número de giros inicial (N_{ini}) y de diseño (N_{dis})	8
1.6 Registro de resultados	9
1.7 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados .	9

2	MAC-II. Método de prueba para determinar la gravedad específica bruta y densidad de la mezcla asfáltica compactada	11
2.1	Objetivo	11
2.2	Equipo y herramientas	11
2.3	Calibraciones y/o verificaciones	12
2.4	Método de prueba	12
2.4.1	Preparación del equipo	12
2.4.2	Preparación del espécimen	12
2.4.3	Ejecución de la prueba	13
2.5	Cálculos (especímenes no absorbentes)	15
2.5.1	Cálculo de gravedad específica bruta de la mezcla compactada	15
2.5.2	Cálculo de densidad de la mezcla compactada	15
2.5.3	Cálculo del porcentaje de agua absorbida de la mezcla compactada	16
2.6	Método de prueba (especímenes absorbentes)	16
2.6.1	Preparación del equipo	16
2.6.2	Ejecución de la prueba	16
2.6.3	Gravedad específica del Parafilm	18
2.7	Cálculos (especímenes absorbentes)	20
2.7.1	Cálculo de la gravedad específica bruta de la mezcla compactada ..	20
2.7.2	Cálculo de la densidad de la mezcla compactada	20
2.8	Registro de resultados	21
2.9	Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados	22
3	MAC-III. Método de prueba para determinar la gravedad específica teórica máxima y densidad de la mezcla asfáltica	23
3.1	Objetivo	23
3.2	Equipo y herramientas	23

3.3	Calibraciones y/o verificaciones	24
3.4	Método de prueba	24
3.4.1	Preparación del equipo	24
3.4.2	Preparación de la muestra	25
3.4.3	Ejecución de la prueba	26
3.5	Cálculos	27
3.5.1	Cálculo de gravedad específica teórica máxima de la mezcla	27
3.5.2	Cálculo de la densidad teórica máxima de la mezcla	27
3.6	Registro de resultados	27
3.7	Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad de los resultados	28
4	MAC-IV. Método de prueba para determinar la resistencia de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido por humedad por medio de la Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR)	29
4.1	Objetivo	29
4.2	Equipo y herramientas	29
4.3	Calibraciones y/o verificaciones	31
4.4	Método de prueba	31
4.4.1	Preparación del espécimen	31
4.4.2	Ejecución de la prueba	32
4.5	Cálculos	36
4.5.1	Cálculo de la resistencia a la tensión indirecta del espécimen acondicionado	36
4.5.2	Cálculo de la resistencia a la tensión indirecta del espécimen no acondicionado	36
4.5.3	Cálculo de la relación de resistencia a la tensión indirecta	37
4.6	Registro de resultados	38

4.7	Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad de los resultados	39
5	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	41
5.1	Objetivo	41
5.2	Equipo y herramientas	41
5.3	Calibraciones y/o verificaciones	42
5.4	Método de prueba	43
5.4.1	Preparación del equipo	43
5.4.2	Preparación del espécimen	43
5.4.3	Ejecución de la prueba	45
5.5	Cálculos	47
5.5.1	Definición de un “ensayo”	47
5.5.2	Cálculos de los parámetros de prueba	48
5.6	Registro de resultados	49
5.7	Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados	49
6	Bibliografía	51
	Anexos	53

Índice de tablas

Tabla 1.1 Recomendación de masas para especímenes.....	5
Tabla 1.2 Ecuaciones para determinación del contenido de asfalto.....	6
Tabla 1.3 Parámetros de compactación.....	7
Tabla 1.4 Registro de resultados de Compactación (%G _{mm}).....	9
Tabla 1.5 Criterios r&R para el ensayo de compactación (%G _{mm}).....	9
Tabla 2.1 Dimensiones recomendadas de Parafilm.....	17
Tabla 2.2 Registro de resultados de G _{mb} en especímenes no absorbentes.....	21
Tabla 2.3 Registro de resultados de G _{mb} en especímenes absorbentes.....	21
Tabla 2.4 Criterios r&R para el ensayo de G _{mb}	22
Tabla 3.1 Capacidad mínima de la balanza.....	24
Tabla 3.2 Cantidad de muestra a ensayar.....	25
Tabla 3.3 Registro de resultados de G _{mm}	27
Tabla 3.4 Criterios r&R para el ensayo de G _{mm}	28
Tabla 4.1 Registro de resultados de TSR.....	38
Tabla 4.2 Criterios r&R para el ensayo de TSR.....	39
Tabla 5.1 Registro de resultados de Rueda Cargada de Hamburgo.....	49

Índice de figuras

Figura 2.1 Baño de agua equipado	12
Figura 2.2 Espécimen en condición saturada superficialmente seca	14
Figura 2.3 Espécimen en condición saturada superficialmente seca	14
Figura 3.4 Dimensiones de Parafilm cortado y alargado	17
Figura 3.5 Colocación de Parafilm	18
Figura 4.1 Diagrama de mordaza para tensión indirecta.....	30
Figura 5.1 Dimensiones de moldes de polietileno de alta densidad.....	46
Figura 5.2 Gráfica de profundidad de rodera	48

Sinopsis

En el presente documento se presenta la recopilación de ensayos de laboratorio utilizados para la evaluación de mezclas asfálticas, los cuales están basados en normas de la ASTM las cuales fueron adecuadas y ejemplificadas de acuerdo con la experiencia recabada durante 8 años durante el Programa de Laboratorio con Reconocimiento AMAAC-IMT.

Los ensayos presentados se dividen en dos tipos, los que son utilizados para el cálculo de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica (MAC-I, MAC-II y MAC-III), y dos ensayos para la evaluación del desempeño como son la susceptibilidad a la humedad mediante el ensayo de Resistencia a la tensión indirecta (MAC-IV) y la susceptibilidad a la deformación permanente mediante el ensayo de Rueda cargada de Hamburgo (MAC-V).

Finalmente, se presentan anexos cortos los cuales tienen como objetivo ejemplificar definiciones y procedimiento de cálculo requeridos tanto en la ejecución de los ensayos como en la interpretación de los mismo.

Abstract

This document presents the compilation of laboratory tests used for the evaluation of asphalt mixtures, which are based on ASTM standards which were adapted and exemplified according to the experience obtained during 8 years in the Laboratory Program with AMAAC-IMT Certification.

The tests presented are divided into two types, which are used for the determination of the volumetric properties of the asphalt mixture (MAC-I, MAC-II and MAC-III), and two tests for the evaluation of performance such as the moisture susceptibility by means of the indirect tensile strength test (MAC-IV) and the rutting susceptibility by means of the Hamburg wheel-track testing (MAC-V).

Finally, short annexes are presented, which aim to exemplify definitions and calculation procedures required for both the test execution and its interpretation.

Resumen ejecutivo

El presente documento es un manual de ensayos para la evaluación de mezclas asfálticas, el cual es una recopilación y adecuación de ensayos basados en normas de la ASTM, estas adecuaciones están apoyadas en la experiencia obtenida durante 8 años de realización del Programa de Laboratorio con Reconocimiento AMAAC-IMT y de prácticas recomendables establecidas en el laboratorio de infraestructura del IMT.

El manual describe cinco métodos de ensayo, tres utilizados para el cálculo de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica (MAC-I, MAC-II y MAC-III) y dos para la determinación de propiedades de desempeño de la mezcla asfáltica (MAC-IV y MAC-V), los cuales se mencionan a continuación:

MAC-I. Método de prueba para la preparación y compactación de especímenes de mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador giratorio.

MAC-II. Método de prueba para determinar la gravedad específica bruta y densidad de la mezcla asfáltica compactada.

MAC-III. Método de prueba para determinar la gravedad específica teórica máxima y densidad de la mezcla asfáltica.

MAC-IV. Método de prueba para determinar la resistencia de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido por humedad por medio de la Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR).

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.

Finalmente, se presentan anexos cortos los cuales tienen como objetivo ejemplificar definiciones y procedimiento de cálculo requeridos tanto en la ejecución de los ensayos como en la interpretación de los mismos.

Introducción

Las mezclas asfálticas se pueden definir como una combinación exacta de agregados minerales aglomerados entre ellos mediante un ligante asfáltico y, en algunas ocasiones, aditivos mezclados de tal manera que los agregados pétreos quedan cubiertos por una película uniforme de asfalto, generando un material de gran resistencia.

Una mezcla asfáltica en caliente se tipifica de esa manera debido a que tanto el agregado pétreo como el ligante asfáltico se calientan previo al mezclado; así como su colocación también se realiza a altas temperaturas. Es un tipo de mezcla compuesta generalmente por un 93 a 97 % de agregado pétreo y un 3 a 7 % de asfalto, respectivamente, con respecto a la masa total de la mezcla.

El presente manual tiene por objetivo ser un apoyo base para los laboratorios en la ejecución de ensayos de mezclas asfálticas en caliente del Protocolo AMAAC Nivel II, al realizar una compilación de la experiencia, recomendaciones y normas utilizadas actualmente como referencia.

1 MAC-I Método de prueba para la preparación y compactación de especímenes de mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador giratorio

1.1 Objetivo

Este método de prueba cubre la compactación de especímenes cilíndricos de mezcla asfáltica en caliente utilizando el compactador giratorio. Esta norma también hace referencia a la determinación de la gravedad específica de especímenes compactados en cualquier punto del proceso de compactación. Los especímenes compactados son adecuados para determinar las propiedades volumétricas y físicas de la mezcla compacta, así mismo, monitorear la densidad de especímenes de prueba durante el proceso de compactación.

1.2 Equipo y herramientas

- **Compactador Giratorio** electromecánico, electrohidráulico o electroneumático capaz de girar a 30 ± 0.5 rpm y producir un ángulo de giro interno constante de $1.16 \pm 0.02^\circ$ durante el proceso de compactación. El equipo deberá ser capaz de darle al espécimen hasta 250 giros, así como de aplicar una presión de 600 ± 60 kPa durante los primeros 5 giros y de 600 ± 18 kPa durante el proceso restante.
- **Moldes** de acero con un espesor mínimo de 7.5 mm, un diámetro interior de 149.9 a 150.0 mm o 99.9 a 100.0 mm, y al menos 250 mm de altura. Deberá incluir sus accesorios: base para molde y al menos 2 platos circulares.
- **Balanza** con resolución de 0.1 g y capacidad mínima de 6,000 g.
- **Termómetro** con un rango de medición suficiente para evaluar la temperatura del asfalto de 130 a 200 °C y con una resolución mínima de 0.5 °C.

Nota 1.1. Se recomienda el termómetro de inmersión ASTM 42C (rango: +95 a +255 °C, resolución: 0.5 °C).

- **Pirómetro** con un rango de medición suficiente para evaluar la temperatura del agregado y la mezcla de 130 a 200 °C y con una resolución mínima de 0.2 °C.
- **Hornos** capaces de mantener una temperatura de hasta $204 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Se requieren al menos dos hornos para mantenerlos a distintas temperaturas (mezclado y compactación).
- **Misceláneos:** discos de papel de 150 mm de diámetro, mezclador mecánico (opcional).

1.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Compactador giratorio.** Verificar el ángulo de giro interno y fuerza de aplicación de la carga. Se recomienda al menos una vez cada 12 meses.
- **Balanza.** Calibrar o verificar con una resolución de 0.1 g o mayor. Se recomienda que la calibración sea en, al menos, 5 puntos (1000, 2000, 3000, 4000, 5000 g) considerando el rango de trabajo y, por lo menos, una vez cada 12 meses.
- **Termómetro.** Calibrar o verificar con una resolución de 0.1 °C o mayor. Se recomienda que la verificación sea en, al menos, 5 puntos (140, 150, 160, 170, 180 °C) considerando el rango de trabajo y, por lo menos, una vez cada 12 meses.
- **Pirómetro.** Calibrar o verificar con una resolución de 0.1 °C o mayor. Se recomienda que la verificación sea en, al menos, 5 puntos (140, 150, 160, 170, 180 °C) considerando el rango de trabajo y, por lo menos, una vez cada 12 meses.
- **Hornos.** Calibrar o verificar con una resolución 1°C o mayor en, al menos, cinco puntos (140, 150, 160, 170, 180 °C) considerando el rango de trabajo y, por lo menos, una vez cada 12 meses.

1.4 Método de prueba

1.4.1 Preparación del equipo

- 1.4.1.1 Precalentar un horno a la temperatura de mezclado $\pm 3^{\circ}\text{C}$. El rango de la temperatura de mezclado de laboratorio se define como el rango de temperaturas cuando el asfalto sin envejecer (original) presenta una viscosidad rotacional de $0.17 \pm 0.02 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Nota 1.2. Los asfaltos modificados, especialmente aquellos que contienen polímeros, generalmente no se apegan a los rangos de viscosidad para obtener las temperaturas de mezclado y compactación. Se recomienda utilizar las temperaturas indicadas por el proveedor de asfalto.

- 1.4.1.2 Precalentar un horno a la temperatura de compactación $\pm 3^{\circ}\text{C}$. El rango de la temperatura de compactación se define como el rango de temperaturas cuando el asfalto sin envejecer (original) tiene una viscosidad de $0.28 \pm 0.03 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Nota 1.2).
- 1.4.1.3 Calentar el recipiente de mezclado y todos los implementos a la temperatura requerida de mezclado $\pm 5^{\circ}\text{C}$ por un periodo mínimo de 45 minutos previo al mezclado.
- 1.4.1.4 Colocar el molde de compactación en el horno a la temperatura de compactación $\pm 5^{\circ}\text{C}$ por un periodo mínimo de **45 minutos** previo a la compactación.

1.4.2 Preparación de la muestra

Especímenes de laboratorio

Preparación de los materiales

- 1.4.2.1 Pesar y combinar las fracciones apropiadas de agregado para obtener la masa deseada del espécimen. La masa del espécimen variará de acuerdo con la finalidad de éste, los rangos de masas recomendados se muestran en la Tabla 1.1. Las dimensiones del espécimen podrían variar dependiendo del tamaño máximo del agregado (Anexo A.1).

Tabla 1.1 Recomendación de masas para especímenes

Uso del espécimen	Dimensiones de espécimen [mm]	Rango de masas recomendadas [g]
Diseño de mezcla	150 x 115 \pm 5 (diámetro x altura)	4,500 – 4,800
TSR 4"	100 x 63.5 \pm 2.5 (diámetro x altura)	1,000 – 1,200
TSR 6"	150 x 95 \pm 5 (diámetro x altura)	3,500 – 3,800
Rueda Cargada de Hamburgo	150 x 50-60 aprox. (diámetro x altura)	2,000 – 2,500

- 1.4.2.2 Colocar el agregado pétreo y el asfalto en un horno a la temperatura de mezclado requerida.

Nota 1.3. El asfalto no deberá permanecer en el horno más de 1 hora después de haber alcanzado la temperatura de mezclado.

Mezclado

1.4.2.3 Vaciar el agregado seco y caliente en el recipiente de mezclado (previamente calentado) formando un cráter.

1.4.2.4 Agregar la cantidad de asfalto requerida para la mezcla dentro del cráter.

Tabla 1.2 Ecuaciones para determinación del contenido de asfalto

Condición	Masa del asfalto (W_b)	Conversión
Masa respecto al agregado	$W_{bs} = \frac{W_s \times P_{bs}}{100}$	$P_{bs} = \frac{P_{bm}}{100 - P_{bm}}$
Masa respecto a la mezcla	$W_{bm} = \frac{W_s \times P_{bm}}{100 - P_{bm}}$	$P_{bm} = \frac{P_{bs}}{100 + P_{bs}}$

W_{bs} [g] = Masa del asfalto respecto al agregado,

W_{bm} [g] = Masa del asfalto respecto a la mezcla,

W_s [g] = Masa del agregado,

P_{bs} [%] = Contenido de asfalto respecto al agregado,

P_{bm} [%] = Contenido de asfalto respecto a la mezcla.

Nota 1.4. Los cálculos volumétricos establecidos en el protocolo de diseño PA-MA 01/2013 son realizados con el contenido de asfalto respecto a la mezcla ($P_{bm} = P_b$).

1.4.2.5 Mezclar el asfalto y agregado tan rápidamente como sea posible para producir una mezcla con distribución uniforme y mantenerse en el rango de la temperatura de mezclado.

Nota 1.5. No se deberá utilizar flama directa para evitar el envejecimiento inadecuado del asfalto.

Acondicionamiento (curado) de la mezcla

1.4.2.6 Acondicionar la mezcla durante **2 h ± 5 min** a la temperatura de compactación **± 3 °C**, si la absorción combinada del agregado pétreo es menor a **2.0 %** [Ref. 4].

1.4.2.7 Acondicionar la mezcla durante **4 h ± 5 min** a la temperatura de compactación **± 3 °C**, si la absorción combinada del agregado pétreo es mayor a **2.0 %** [Ref. 4].

Nota 1.6. Si se prepara un lote de varias muestras, dividir el lote en cantidades de una sola muestra previo a colocarlas en el horno para el acondicionamiento.

1.4.2.8 Homogeneizar la mezcla cada **1 h ± 5 min** para mantener un acondicionamiento uniforme.

Especímenes de campo

- 1.4.2.9 Las muestras de mezcla asfáltica producida en planta se obtendrán de acuerdo con la *Práctica estándar para el muestreo de mezclas asfálticas de pavimentación* (ASTM D979) u otro método de muestreo especificado. Las muestras se reducirán al tamaño de prueba de acuerdo con la *Práctica estándar para la reducción de muestras de agregado al tamaño de prueba "Método B"* (ASTM C702).
- 1.4.2.10 Acondicionar la mezcla a la temperatura de compactación el tiempo mínimo necesario para alcanzar dicha temperatura de manera homogénea. Este tipo de muestras no se deberán someter a algún tipo de curado previo a su compactación.

1.4.3 Ejecución de la prueba

Al finalizar el acondicionamiento

- 1.4.3.1 Retirar el molde de compactación del horno establecido previamente a la temperatura de compactación.
- 1.4.3.2 Colocar el disco de papel en el plato inferior del molde y un producto antiadherente en las paredes del mismo para evitar que la mezcla asfáltica se pueda adherir al molde.
- 1.4.3.3 Colocar toda la mezcla en el molde, con un recipiente adecuado, a fin de que no se pierda material y evitar la clasificación del mismo.
- 1.4.3.4 Colocar un segundo disco de papel en la parte superior de la mezcla.

Compactación

- 1.4.3.5 Introducir los datos necesarios en el compactador giratorio de acuerdo con las especificaciones del fabricante y ajustar la presión para lograr **600 ± 60 kPa** durante los primeros **5 giros** y de **600 ± 18 kPa** durante del proceso restante. El parámetro de compactación (número de giros o altura) dependerá del tipo de espécimen, de acuerdo con la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Parámetros de compactación

Especímen	Parámetro	Va [%]
Diseño	Número de giros	4
TSR	Altura	7 ± 1 [Ref 9]
Rueda de Hamburgo	Altura	7 ± 0.5 [Ref 12]

Va = vacíos de aire (Anexo A.2).

Para los especímenes de diseño, el número de giros dependerá del nivel de tránsito del diseño del pavimento (Anexo A.3).

- 1.4.3.6 Iniciar el proceso de compactación.
- 1.4.3.7 Al finalizar el proceso de compactación, extraer el molde del compactador.
- 1.4.3.8 Permitir que las muestras se enfríen dentro del molde durante un periodo adecuado para evitar que se deforme al desmoldarlo. Extraer la muestra compactada del molde y retirar los discos de papel.
- Nota 1.7. Se recomienda utilizar un ventilador y permitir que el espécimen se enfríe hasta una temperatura de 60 °C para extraerlo del molde y evitar que se deforme. La temperatura se puede verificar haciendo uso de un pirómetro.
- 1.4.3.9 Colocar la muestra sobre una superficie plana donde se pueda enfriar a temperatura ambiente.

1.5 Cálculos

1.5.1 Determinación de la gravedad específica bruta G_{mb}

Realizar la determinación de acuerdo con *Método de prueba para determinar la gravedad específica bruta y densidad de la mezcla asfáltica compactada (MAC-II)*.

1.5.2 Determinación de la gravedad específica teórica máxima G_{mm}

Realizar la determinación de acuerdo con el *Método de prueba para determinar la gravedad específica teórica máxima y densidad de la mezcla asfáltica (MAC-III)*, utilizando material fabricado en el mismo proceso para la compactación.

1.5.3 Cálculo del grado de compactación ($\%G_{mm}$) para especímenes de diseño al número de giros inicial (N_{ini}) y de diseño (N_{dis})

$$G_{mbN_{ini}} = G_{mb} \frac{h_{final}}{h_{N_{ini}}}$$

Donde:

$G_{mb(N_{ini})}$ [adimensional] = Gravedad específica bruta de la mezcla al número de giros inicial (N_{ini}), con aproximación de 0.001 (3 decimales).

G_{mb} [adimensional] = Gravedad específica bruta del espécimen compactado al número de giros de diseño (N_{dis}), con aproximación de 0.001 (3 decimales).

h_{final} [mm] = Altura del espécimen al último giro, con aproximación de 0.1 mm (1 decimal).

$h_{N_{ini}}$ [mm] = Altura del espécimen al N_{ini} , con aproximación de 0.1 mm (1 decimal).

$$\%G_{mmN_{ini}} = \frac{G_{mbN_{ini}}}{G_{mm}} * 100 \quad \%G_{mmN_{dis}} = \frac{G_{mb}}{G_{mm}} * 100$$

Donde:

$\% G_{mm (N_{ini})}$ [%] = Grado de compactación al N_{ini} , con aproximación de 0.1% (1 decimal).

$\% G_{mm (N_{dis})}$ [%] = Grado de compactación al N_{dis} , con aproximación de 0.1% (1 decimal).

G_{mm} [adimensional] = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla, con aproximación de 0.001 (3 decimales).

1.6 Registro de resultados

Tabla 1.4 Registro de resultados de Compactación ($\%G_{mm}$)

Compactación ($\%G_{mm}$) <i>ASTM D6925</i>	Identificación de la muestra:		
	Fecha de ensayo:		
	Temperatura de mezclado:		
	Temperatura de compactación:		
	No. de giros		N _{ini} :

RESULTADOS	Réplica	
	1	2
(h _{final}) Altura del espécimen al último giro, [mm]		
(h _{N_{ini}}) Altura del espécimen al N_{ini} , [mm]		
(G _{mb}) Gravedad específica bruta del espécimen		
(G _{mm}) Gravedad específica teórica máxima de la mezcla		
(G _{mb (N_{ini})}) Gravedad específica bruta del espécimen al N_{ini}		
($\% G_{mm(N_{ini})}$) Grado de compactación al N_{ini}		
($\% G_{mm(N_{dis})}$) Grado de compactación al N_{dis}		
($\% G_{mm(N_{ini})}$) Grado de compactación promedio al N_{ini}		
($\% G_{mm(N_{dis})}$) Grado de compactación promedio al N_{dis}		

1.7 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados

Tabla 1.5 Criterios r&R para el ensayo de compactación ($\%G_{mm}$)

Parámetro	1 operador		Multilaboratorio	
	1S	D2S	1S	D2S
12.5 mm tamaño nominal del agregado	0.3	0.9	0.6	1.7
19.0 mm tamaño nominal del agregado	0.5	1.4	0.6	1.7

Ver Anexo A.9

2 MAC-II. Método de prueba para determinar la gravedad específica bruta y densidad de la mezcla asfáltica compactada

2.1 Objetivo

Determinar la gravedad específica bruta y densidad de la mezcla asfáltica compactada, la cual es utilizada para el cálculo de propiedades volumétricas, así como determinar el peso específico de la mezcla.

2.2 Equipo y herramientas

- **Balanza** con resolución de 0.1 g. Deberá estar equipada para permitir pesar el espécimen mientras se suspende en el agua. Utilizar un alambre o hilo de pescar del diámetro más pequeño posible, para evitar lecturas erróneas por el desplazamiento indebido del agua.

Nota 2.1. Se recomienda una balanza con capacidad mínima de 6000 g.

- **Baño de agua** capaz de mantener una temperatura de 25 ± 1 °C para sumergir el espécimen. El contenedor deberá estar equipado con orificios de salida de agua para mantener el mismo tirante con y sin espécimen.

Nota 2.2. Si el baño de agua no está equipado con orificios de salida, el alambre o hilo deberá ser lo suficientemente largo a fin de que la canastilla se encuentre completamente sumergida durante todo el ensayo y el desplazamiento de agua por inclusión del espécimen no afecte en la medición.

- **Termómetro** con un rango de medición suficiente para evaluar 25 °C y con una resolución mínima de 0.5 °C.

Nota 2.3. Se recomienda el termómetro de inmersión ASTM 36C (rango: -2 a +68 °C, resolución: 0.2 °C).

- **Canastilla** con tamaño adecuado para albergar o sostener los especímenes de distintos tamaños.
- **Papel Parafilm** de película elastomérica para recubrir el espécimen. Este material se requerirá únicamente para especímenes absorbentes (punto 3.6).
- **Cilindro de calibración** de aluminio de aproximadamente 100 mm de diámetro x 60 mm de altura (4 x 2.5 pulg). Este material se requerirá únicamente para especímenes absorbentes (punto 3.6).

2.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Balanza.** Calibrar o verificar con una resolución de 0.1 g o mayor. Se recomienda que la calibración sea en, al menos, 5 puntos (1000, 2000, 3000, 4000, 5000 g) considerando el rango de trabajo y, por lo menos, una vez cada 12 meses.
- **Termómetro.** Calibrar o verificar con una resolución de 0.1 °C o mayor en, al menos, un punto considerando el rango de trabajo (25 °C) y, por lo menos, una vez cada 12 meses.

2.4 Método de prueba

2.4.1 Preparación del equipo

2.4.1.1 Acondicionar el baño de agua a la temperatura de prueba (25 ± 1 °C).

2.4.1.2 Fijar la canastilla de tal manera que se suspenda de la balanza y se sumerja completamente en el agua.

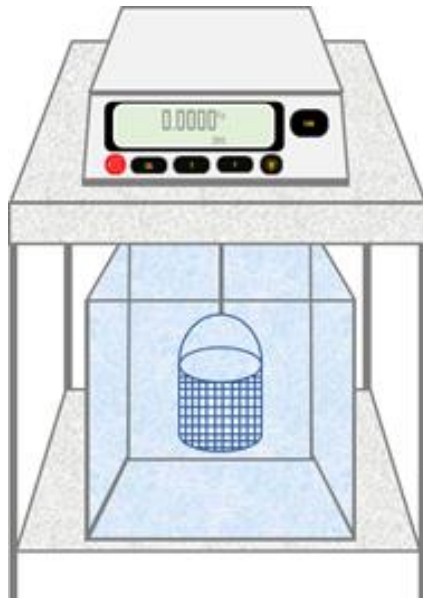


Figura 2.1 Baño de agua equipado

2.4.2 Preparación del espécimen

Especímenes de laboratorio

2.4.2.1 Fabricar el espécimen de acuerdo con las especificaciones del *Método de prueba para la preparación y compactación de especímenes de mezcla asfáltica en caliente por medio del compactador giratorio (MAC-I)*.

Especímenes de campo

- 2.4.2.2 Obtener los especímenes de acuerdo con las especificaciones de la *Práctica estándar para el muestreo de mezclas asfálticas compactadas para pruebas en laboratorio* (ASTM D5361). Se deberán considerar los cuidados pertinentes en la extracción de especímenes mencionados en el Anexo A.4.

2.4.3 Ejecución de la prueba

Especímenes de laboratorio

- 2.4.3.1 Registrar la masa del espécimen seco a temperatura ambiente (**A**).

Nota 2.4. Registrar las masas en gramos y con aproximación de 0.1 g (1 decimal), ejemplo: 4,522.3 g.

- 2.4.3.2 Determinar la temperatura del espécimen seco a temperatura ambiente.

Nota 2.5. Se recomienda utilizar un pirómetro para llevar a cabo esta lectura.

- 2.4.3.3 Si la temperatura del espécimen no difiere en más de **2°C** respecto a la temperatura del baño de agua, sumergir el espécimen en el baño a **25 ± 1 °C** por un tiempo de **3 a 5 min**. Por el contrario, si la temperatura del espécimen difiere en más de **2°C** respecto a la temperatura del baño de agua, sumergir el espécimen por un tiempo de **10 a 15 min**. Registrar la masa del espécimen sumergido (**C**).

- 2.4.3.4 Dentro de los 15 s siguientes a la extracción del espécimen del baño de agua, secarlo superficialmente de manera rápida con una franela húmeda para obtener la condición saturada superficialmente seca (SSS).

Nota 2.6. Se deberá utilizar una franela húmeda para retirar el exceso de agua en el exterior del espécimen sin que absorba agua del interior de este. Verificar visualmente que la superficie del espécimen no se encuentre brillante (exceso de agua), sin embargo, este proceso debe ser rápido para que no se pierda agua del interior, ver Figuras 2.2 y 2.3.



Figura 2.2 Espécimen en condición saturada superficialmente seca



Figura 2.3 Espécimen en condición saturada superficialmente seca

- 2.4.3.5 Colocar el espécimen sobre la balanza y registrar su masa saturada superficialmente seca (**B**).

Nota 2.7. Si después de obtener la condición SSS escurre agua sobre la balanza, evitar secarla, ésta deberá considerarse como de la masa saturada superficialmente seca.

Especímenes de campo

- 2.4.3.6 Se recomienda remover posibles partículas adheridas al espécimen mediante la aplicación de un chorro de agua para evitar la afectación de las mediciones.
- 2.4.3.7 Colocar el espécimen sobre una superficie que permita drenar el agua (escurridor) y aplicar directamente una presión de aire utilizando un ventilador (24 horas aproximadamente), o un compresor de aire (5 a 10

minutos aproximadamente) hasta que el espécimen se encuentre en condición seca a masa constante (Anexo A.5).

2.4.3.8 Registrar la masa del espécimen seco al aire (**A**).

2.4.3.9 Determinar la temperatura del espécimen seco a temperatura ambiente.

2.4.3.10 Si la temperatura del espécimen no difiere en más de **2 °C** respecto a la temperatura del baño de agua, sumergir el espécimen en el baño a **25 ± 1 °C** por un tiempo de **3 a 5 min**. Por el contrario, si la temperatura del espécimen difiere en más de **2 °C** respecto a la temperatura del baño de agua, sumergir el espécimen por un tiempo de **10 a 15 min**. Registrar la masa del espécimen sumergido (**C**).

2.4.3.11 Dentro de los 15 s siguientes a la extracción del espécimen del baño de agua, secarlo superficialmente de manera rápida con una franela húmeda para obtener la condición saturada superficialmente seca (SSS).

2.4.3.12 Registrar la masa saturada superficialmente seca del espécimen (**B**).

2.5 Cálculos (especímenes no absorbentes)

2.5.1 Cálculo de gravedad específica bruta de la mezcla compactada

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

G_{mb} [adimensional] = Gravedad específica bruta de la mezcla a 25 °C. Reportar este valor con aproximación de 0.001 (3 decimales).

A [g] = Masa del espécimen seco al aire, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

B [g] = Masa saturada superficialmente seca, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

C [g] = Masa del espécimen sumergido en agua con, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

2.5.2 Cálculo de densidad de la mezcla compactada

$$\text{Densidad} = G_{mb} * \text{Densidad del agua}$$

Donde:

Densidad del agua a 25 °C [kg/m³] = 997 o 0.9970 g/cm³. Reportar este valor con aproximación de 0.1 kg/m³ o 0.001 g/cm³.

2.5.3 Cálculo del porcentaje de agua absorbida de la mezcla compactada

$$\text{Absorción [\%]} = \frac{B - A}{B - C} * 100$$

Reportar la absorción con aproximación de 0.1 % (1 decimal). Si el porcentaje de agua absorbida por el espécimen excede del **2.0 %**, continuar con el punto 2.6.

2.6 Método de prueba (especímenes absorbentes)

El siguiente procedimiento es para especímenes de campo o laboratorio con absorción mayor a **2.0 %**. Éste hace referencia al método utilizando Parafilm ^[Ref 6], sin embargo, también se puede utilizar el *Método de prueba para determinar la gravedad específica bruta y la densidad de la mezcla asfáltica compactada utilizando el método de sellado automático al vacío (ASTM D6752)*.

2.6.1 Preparación del equipo

- 2.6.1.1 Acondicionar el baño de agua a la temperatura de prueba (**25 ± 1 °C**).
- 2.6.1.2 Fijar la canastilla de tal manera que se suspenda de la balanza y se sumerja completamente en el agua, ver Figura 2.1.

2.6.2 Ejecución de la prueba

- 2.6.2.1 Colocar el espécimen sobre una superficie que permita drenar el agua (escurridor) y aplicar directamente una presión de aire utilizando un ventilador (**24 horas**), o un compresor de aire (**5-10 minutos**), hasta que el espécimen se encuentre en condición seca a masa constante (Anexo A.5).
- 2.6.2.2 Registrar la masa del espécimen seco al aire (**A**).
- 2.6.2.3 Cortar las piezas de Parafilm necesarias para recubrir el espécimen. Las dimensiones del Parafilm se muestran en la Tabla 2.1.
- 2.6.2.4 Tomar los lados opuestos de cada pieza y alargarla hasta obtener las dimensiones requeridas para el recubrimiento (tener cuidado de no perforar la película de Parafilm), ver Figura 2.4. El papel Parafilm se debe alargar para lograr que se adhiera al espécimen.

Tabla 2.1 Dimensiones recomendadas de Parafilm

Tipo de espécimen	Dimensiones	Dimensiones de Parafilm cortado	Dimensiones de Parafilm alargado
Diseño	150 x 115 mm (diámetro x altura)	Dos piezas de 100 x 100 y una pieza de 100 x 350 mm	Dos piezas de 150 x 150 y una pieza de 150 x 480 mm
TSR 4"	100 x 63.5 mm (diámetro x altura)	Dos piezas de 70 x 70 y una pieza de 70 x 150 mm	Dos piezas de 100 x 100 y una pieza de 90 x 200 mm
TSR 6"	150 x 95 mm (diámetro x altura)	Dos piezas de 100 x 100 y una pieza de 90 x 350 mm	Dos piezas de 150 x 150 y una pieza de 130 x 480 mm
Hamburgo 6"	150 x 60 mm (diámetro x altura)	Dos piezas de 100 x 100 y una pieza de 70 x 350 mm	Dos piezas de 150 x 150 y una pieza de 90 x 480 mm
Hamburgo 10"	250 mm x espesor del pavimento (diámetro x altura)	Dos piezas de 170 x 170 y dos piezas de 70 x 350 mm	Dos piezas de 250 x 250 y dos piezas de 90 x 480 mm

2.6.2.5 Colocar la película de Parafilm alargada sobre una cara del espécimen y presionarla sobre la misma para garantizar su adherencia (se puede hacer uso de una esponja). Repetir estos pasos para la cara opuesta y circunferencia, ver Figura 2.5.

Nota 3.9. Tener cuidado de no dañar la muestra y contar con mínimo 15 mm de Parafilm restante sobre cada extremo para realizar los traslapes.

2.6.2.6 Registrar la masa del espécimen seco con recubrimiento (D).

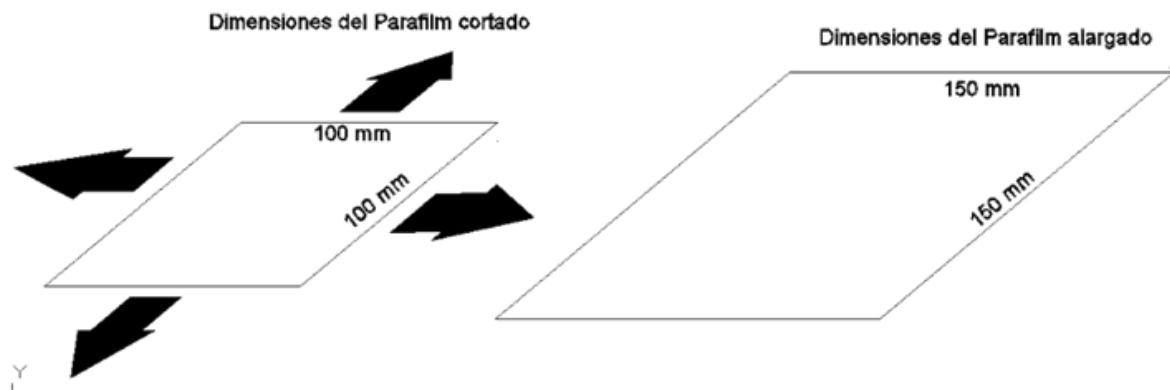


Figura 3.4 Dimensiones de Parafilm cortado y alargado

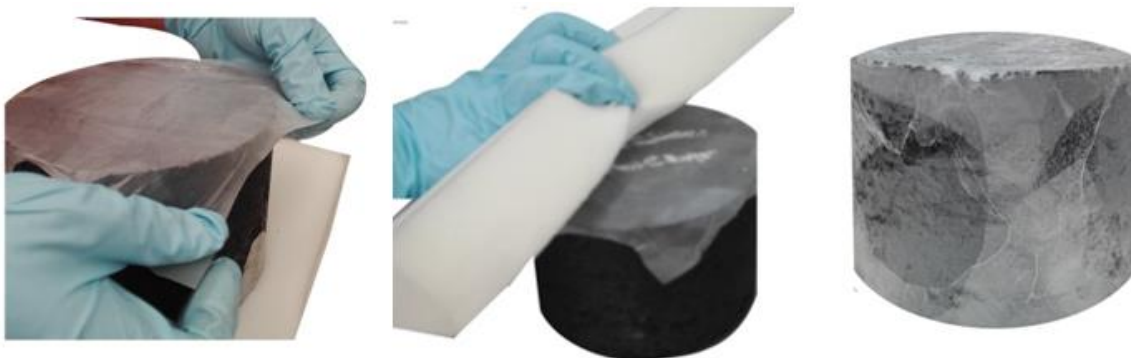


Figura 3.5 Colocación de Parafilm

- 2.6.2.7 Determinar la temperatura del espécimen seco a temperatura ambiente con recubrimiento.
- 2.6.2.8 Si la temperatura del espécimen no difiere en más de **2 °C**, respecto a la temperatura del baño de agua, sumergir el espécimen en el baño a **25 ± 1 °C** por un tiempo de **3 a 5 min**. Por el contrario, si la temperatura del espécimen difiere en más de **2 °C**, respecto a la temperatura del baño de agua, sumergir el espécimen por un tiempo de **10 a 15 min**. Registrar la masa del espécimen sumergido (**E**).

2.6.3 Gravedad específica del Parafilm

Gravedad específica del cilindro de calibración de aluminio

- 2.6.3.1 Registrar la masa del cilindro seco sin recubrimiento (**A_{A1}**).
- 2.6.3.2 Determinar la temperatura del cilindro sin recubrimiento.
- 2.6.3.3 Si la temperatura del espécimen no difiere en más de **2 °C**, respecto a la temperatura del baño de agua, sumergir el espécimen en el baño a **25 ± 1 °C** por un tiempo de **3 a 5 min**. Por el contrario, si la temperatura del espécimen difiere en más de **2 °C**, respecto a la temperatura del baño de agua, sumergir el espécimen por un tiempo de **10 a 15 min**. Registrar la masa del cilindro sin recubrimiento sumergido (**B_{A1}**).
- 2.6.3.4 Calcular la gravedad específica del cilindro de calibración:

$$G_{A1} = \frac{A_{A1}}{A_{A1} - B_{A1}}$$

Donde:

G_{A1} [adimensional] = Gravedad específica del cilindro de calibración a 25 °C. Reportar este valor con aproximación de 0.001 (3 decimales).

A_{A1} [g] = Masa del cilindro seco al aire, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

B_{A1} [g] = Masa del cilindro sumergido, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

Gravedad específica del Parafilm

2.6.3.5 Secar el cilindro de calibración.

2.6.3.6 Cortar las piezas de Parafilm necesarias para recubrir el cilindro. Tomar los lados opuestos de cada pieza y alargarla hasta obtener las dimensiones requeridas para el recubrimiento (tener cuidado de no perforar la película de Parafilm).

2.6.3.7 Colocar la película de Parafilm alargada sobre una cara del cilindro y presionarla sobre el mismo, para garantizar su adherencia. Repetir estos pasos para la cara opuesta y circunferencia.

2.6.3.8 Registrar la masa del cilindro seco con recubrimiento (D_{A1}).

2.6.3.9 Determinar la temperatura del cilindro con recubrimiento.

2.6.3.10 Si la temperatura del espécimen no difiere en más de **2 °C**, respecto a la temperatura del baño de agua, sumergir el espécimen en el baño a **25 ± 1 °C** por un tiempo de **3 a 5 min**. Por el contrario, si la temperatura del espécimen difiere en más de **2 °C**, respecto a la temperatura del baño de agua, sumergir el espécimen por un tiempo de **10 a 15 min**. Registrar la masa del cilindro sumergido con Parafilm (E_{A1}).

2.6.3.11 Calcular la gravedad específica del Parafilm:

$$F = \frac{D_{A1} - A_{A1}}{D_{A1} - E_{A1} - \frac{A_{A1}}{G_{A1}}}$$

Donde:

F [adimensional] = Gravedad específica del Parafilm a 25 °C. Reportar este valor con aproximación de 0.001 (3 decimales).

D_{A1} [g] = Masa del cilindro seco con Parafilm, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

E_{A1} [g] = Masa del cilindro sumergido con Parafilm, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

G_{A1} [adimensional] = Gravedad específica del cilindro de calibración, con aproximación de 0.001 (3 decimales).

2.7 Cálculos (especímenes absorbentes)

2.7.1 Cálculo de la gravedad específica bruta de la mezcla compactada

$$G_{mb} = \frac{A}{D - E - \frac{D - A}{F}}$$

Donde:

G_{mb} [adimensional] = Gravedad específica bruta de la mezcla a 25 °C. Reportar este valor con aproximación de 0.001 (3 decimales).

A [g]= Masa del espécimen seco al aire, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

D [g]= Masa seca del espécimen con Parafilm, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

E [g]= Masa del espécimen con Parafilm sumergido en agua, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

F [adimensional]= Gravedad específica del Parafilm a 25 °C, con aproximación de 0.001 (3 decimales).

2.7.2 Cálculo de la densidad de la mezcla compactada

$$\text{Densidad}_{bruta} = G_{mb} * \text{densidad del agua}$$

Donde:

Densidad del agua a 25 °C [kg/m³] = 997 o 0.9970 g/cm³. Reportar este valor con aproximación de 0.1 kg/m³ o 0.001 g/cm³.

2.8 Registro de resultados

Tabla 2.2 Registro de resultados de G_{mb} en especímenes no absorbentes

G_{mb} no absorbente <i>ASTM D2726</i>	Identificación de la muestra:		
	Fecha de ensayo:		
	Temperatura del agua durante el ensayo:		
Resultados		Réplica	
		1	2
(A) Masa del espécimen seco [g]			
(B) Masa del espécimen saturado superficialmente seco [g]			
(C) Masa del espécimen sumergido [g]			
(G_{mb}) Gravedad específica bruta de la mezcla compactada			
Absorción de la mezcla compactada [%]			
(G_{mb}) Gravedad específica bruta promedio de la mezcla compactada			
Absorción promedio de la mezcla compactada [%]			

Tabla 2.3 Registro de resultados de G_{mb} en especímenes absorbentes

G_{mb} absorbente <i>ASTM D1188</i>	Identificación de la muestra:		
	Fecha de ensayo:		
	Temperatura del agua durante el ensayo:		
Resultados		Réplica	
		1	2
Gravedad específica del cilindro	(A _{A1}) Masa del cilindro seco [g]		
	(B _{A1}) Masa del cilindro sumergido [g]		
	(G _{A1}) Gravedad específica del cilindro		
Gravedad específica del Parafilm	(D _{A1}) Masa del cilindro seco con Parafilm [g]		
	(E _{A1}) Masa del cilindro sumergido con Parafilm [g]		
	(F) Gravedad específica del Parafilm		
Gravedad específica bruta con recubrimiento (G_{mb})	(A) Masa del espécimen seco [g]		
	(D) Masa del espécimen seco con Parafilm [g]		
	(E) Masa del espécimen con Parafilm sumergido [g]		
	(G_{mb}) Gravedad específica bruta de la mezcla compactada		
(G_{mb}) Gravedad específica bruta promedio de la mezcla compactada			

Para determinar la repetibilidad del ensayo en especímenes de laboratorio no absorbentes se utilizará el mismo espécimen, y se repetirá el procedimiento de prueba desde el punto 2.4.3.2 a 2.4.3.5. La masa del espécimen seco (A) se considerará la misma para ambas réplicas.

Para determinar repetibilidad del ensayo en especímenes de laboratorio absorbentes se utilizará el mismo espécimen; se retirará del mismo el papel Parafilm y se repetirá el procedimiento de prueba del punto 2.6.3.3 a 2.6.3.8. La masa del espécimen seco (A) se considerará la misma para ambas réplicas.

2.9 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados

Tabla 2.4 Criterios r&R para el ensayo de G_{mb}

Parámetro	1 Operador		Multilaboratorio	
	1S	D2S	1S	D2S
G_{mb} (no absorbente), TN 12.5mm	0.008	0.023	0.015	0.042
G_{mb} (no absorbente), TN 19mm	0.013	0.037	0.015	0.042
G_{mb} (absorbente)	0.028	0.079	0.034	0.095

TN = tamaño nominal del agregado
Ver Anexo A.9

3 MAC-III. Método de prueba para determinar la gravedad específica teórica máxima y densidad de la mezcla asfáltica

3.1 Objetivo

Determinar la gravedad específica teórica máxima de mezclas asfálticas sin compactar. La gravedad específica teórica máxima (G_{mm}) de la mezcla asfáltica es una propiedad fundamental cuyo valor está influenciado por la composición de la mezcla en términos de la granulometría y el contenido de asfalto. La gravedad específica teórica máxima es utilizada en el cálculo de los vacíos de aire de la mezcla asfáltica compactada; en el cálculo de la cantidad de asfalto absorbido por el agregado y para determinar valores de compactación objetivo en campo.

3.2 Equipo y herramientas

- **Picnómetro de vacío** de metal o plástico con un diámetro aproximado de 180 a 260 mm y una altura mínima de 160 mm; equipado con una cubierta (tapa) transparente, empaque de goma y una conexión para línea de vacío, suficientemente rígidos para soportar la presión de vacío aplicada sin deformarse.

Nota 3.1. La cubierta transparente permite observar la liberación de burbujas de aire de la muestra.

- **Bomba de vacío** capaz de evacuar el aire del picnómetro a una presión residual de 4.0 kPa [30 mmHg] o menor. Deberá contar con un manómetro apropiado para medir el vacío aplicado.
- **Manómetro de presión absoluta** conectado al picnómetro de vacío para verificar que la presión especificada se aplique al mismo y sea capaz de medir la presión absoluta de 4 kPa [30 mmHg] o menor.
- **Válvula de alivio** fijada a la bomba de vacío o al picnómetro para ajustar el vacío que está siendo aplicado al picnómetro y para la lenta liberación de la presión aplicada.
- **Dispositivo de agitación** capaz de sujetar firmemente el picnómetro y de aplicar una agitación suave y constante a la muestra.
- **Balanza** con resolución de 0.1 g. Deberá estar equipada para permitir pesar el picnómetro mientras se suspende en el agua. Utilizar un alambre de hilo

de pescar (del diámetro más pequeño posible) para evitar lecturas erróneas por el desplazamiento indebido de agua.

Nota 3.2. La balanza deberá contar con capacidad suficiente de acuerdo con el tamaño nominal del agregado.

Tabla 3.1 Capacidad mínima de la balanza

Tamaño nominal	Capacidad mínima recomendada de la balanza [g]
19 a 25 mm	4000
37.5 mm o mayor	6000

- **Baño de agua** capaz de mantener una temperatura de 25 ± 1 °C. Deberá estar equipado para suspender el picnómetro con la muestra dentro del agua.
- **Termómetro** con un rango de medición suficiente para evaluar 25 °C y con una resolución mínima de 0.5 °C.

Nota 3.3. Se recomienda el termómetro de inmersión ASTM 36C (rango: -2 a +68 °C, resolución: 0.2 °C).

- **Horno** capaz de mantener una temperatura de hasta 204 ± 3 °C.

3.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Manómetro.** Calibrar con una resolución de 0.1 kPa o 0.1 mmHg, en al menos un punto considerando el rango de trabajo (3.7 kPa o 27.5 mmHg) y, al menos, una vez cada 12 meses.
- **Balanza.** Calibrar o verificar con una resolución de 0.1 g o mayor. Se recomienda que la calibración sea en al menos 5 puntos (1000, 2000, 3000, 4000, 5000 g) considerando el rango de trabajo y, al menos, una vez cada 12 meses.
- **Termómetro.** Calibrar o verificar con una resolución de 0.1 °C o mayor, en al menos un punto considerando el rango de trabajo (25 °C) y, al menos, una vez cada 12 meses.
- **Horno.** Calibrar o verificar con una resolución de 1 °C o mayor en, al menos, un punto considerando el rango de trabajo (110 °C) y, por lo menos, una vez cada 12 meses.

3.4 Método de prueba

3.4.1 Preparación del equipo

- 3.4.1.1 Acondicionar el baño a la temperatura de prueba (25 ± 1 °C).

3.4.2 Preparación de la muestra

Muestras de laboratorio

3.4.2.1 Determinar la cantidad de muestra requerida, ver Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Cantidad de muestra a ensayar

Tamaño nominal, mm [pulg]	Tamaño mínimo de muestra [g]
37.5 [1 ½] o mayor	5000
19 a 25 [¾ a 1]	2500
12.5 [½] o menor	1500

3.4.2.2 Fabricar la muestra de acuerdo con las especificaciones del *Método de prueba para la preparación y compactación de especímenes de mezcla asfáltica en caliente por medio del compactador giratorio* (MAC-I, puntos 1.4.1.1 – 1.4.2.10).

3.4.2.3 Retirar la muestra del horno una vez completado el tiempo de curado, y disgregarla con ayuda de una espátula en forma continua. Cuando la muestra se encuentre tibia (aproximadamente 60 °C) se deberán separar las partículas a mano (utilizando guantes térmicos) y cuidando que las partículas de agregado fino en la mezcla sean **menores a 6mm**, hasta llegar a temperatura ambiente.

Nota 3.4. Se recomienda el uso de una charola plana lo suficientemente grande para disgregar la muestra y evitar que las partículas se unan nuevamente entre ellas.

3.4.2.4 Si las partículas separadas se adhieren entre ellas, una vez que la muestra se ha enfriado a temperatura ambiente, separarlas cuidadosamente sin romper el agregado y hasta que las partículas de la porción del agregado fino en la mezcla sean **menores a 6mm**.

Muestras de campo

3.4.2.5 Las muestras de mezcla asfáltica producida en planta se obtendrán de acuerdo con la *Práctica estándar para el muestreo de mezclas asfálticas de pavimentación* (ASTM D979) u otro método de muestreo especificado. Se deberá determinar el tamaño de muestra requerido de acuerdo con la Tabla 3.2. Las muestras se reducirán al tamaño de prueba de acuerdo con la *Práctica estándar para la reducción de muestras de agregado al tamaño de prueba "Método B"* (ASTM C702).

3.4.2.6 Secar la muestra a masa constante a **110 ± 5 °C** (Anexo A.5).

3.4.2.7 Retirar la muestra del horno y disgregarla con ayuda de una espátula en forma continua. Cuando la muestra se encuentre tibia (aproximadamente

60 °C) se deberán separar las partículas a mano (utilizando guantes térmicos) y cuidando que las partículas de agregado fino en la mezcla sean **menores a 6mm**, hasta llegar a temperatura ambiente.

- 3.4.2.8 Si las partículas separadas se adhieren entre ellas, una vez que la muestra se ha enfriado a temperatura ambiente, separarlas cuidadosamente sin romper el agregado y hasta que las partículas de la porción del agregado fino en la mezcla sean **menores a 6mm**.

3.4.3 Ejecución de la prueba

- 3.4.3.1 Suspender el picnómetro en el baño de agua a una temperatura de **25 ± 1 °C** y registrar la masa del picnómetro sin tapa (**B**). Registrar la temperatura del baño de agua.

Nota 3.5. Asegurarse que el picnómetro se encuentre completamente sumergido en el baño de agua durante todas las mediciones.

- 3.4.3.2 Colocar el picnómetro sin tapa en la balanza y tararlo. Colocar la muestra dentro del picnómetro. Registrar la masa de la muestra seca al aire (**A**).

- 3.4.3.3 Añadir agua al picnómetro a una temperatura aproximada de **25 °C** para cubrir completamente la muestra y colocar la tapa sobre el picnómetro.

Nota 3.6. Se recomienda dejar un tirante de 25 mm de agua sobre la muestra.

- 3.4.3.4 Colocar el picnómetro con tapa, muestra y agua sobre el dispositivo de agitación.

- 3.4.3.5 Iniciar la agitación del dispositivo e inmediatamente comience la aplicación de vacío para eliminar el aire atrapado en la muestra, aumentando gradualmente la presión de vacío hasta que la lectura del manómetro de presión absoluta (Anexo A.6) sea de **3.7 ± 0.3 kPa** [27.5 ± 2.5 mmHg]. El vacío se debe alcanzar dentro de los primeros 2 minutos.

- 3.4.3.6 Una vez alcanzado la presión de vacío especificada, mantener la presión por **15 ± 2 min**.

- 3.4.3.7 Finalizar la agitación y liberar gradualmente la presión de vacío. Retirar el picnómetro del dispositivo de agitación.

- 3.4.3.8 Introducir el picnómetro sin tapa y con muestra lentamente dentro del baño de agua, con el fin de evitar introducir aire a la muestra.

- 3.4.3.9 Suspender el picnómetro sin tapa y con muestra en el baño de agua durante **10 ± 1 min**. Registrar la masa sumergida (**C**).

3.5 Cálculos

3.5.1 Cálculo de gravedad específica teórica máxima de la mezcla

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (C - B)}$$

Donde:

G_{mm} [adimensional] = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla. Reportar este valor con aproximación de 0.001 (3 decimales).

A [g] = Masa de la muestra seca al aire, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

B [g] = Masa del picnómetro sumergido, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

C [g] = Masa del picnómetro y muestra sumergida, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

3.5.2 Cálculo de la densidad teórica máxima de la mezcla

$$\text{Densidad}_{\text{máx}} = G_{mm} * \text{densidad del agua}$$

Donde:

Densidad del agua a 25 °C [kg/m³] = 997 o 0.9970 g/cm³. Reportar este valor con aproximación de 0.1 kg/m³ o 0.001 g/cm³.

3.6 Registro de resultados

Tabla 3.3 Registro de resultados de G_{mm}

G_{mm} <i>ASTM D2041-11</i>	Identificación de la muestra:	
	Fecha de ensayo:	
	Temperatura del agua durante el ensayo:	
RESULTADOS		Réplica
		1
		2
(A) Masa de la muestra seca al aire [g]		
(B) Masa del picnómetro sumergido [g]		
(C) Masa del picnómetro y muestra sumergidos [g]		
(G_{mm}) Gravedad específica teórica máxima		
(G_{mm}) Gravedad específica teórica máxima promedio		

3.7 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad de los resultados

Tabla 3.4 Criterios r&R para el ensayo de G_{mm}

Parámetro	1 operador		Multilaboratorio	
	1S	D2S	1S	D2S
G_{mm}	0.0080	0.023	0.0160	0.044

Ver Anexo A.9

Nota IV.6. La norma ASTM D2041 hace referencia a dos métodos de ensayo adicionales (método del picnómetro al aire y método del matraz) para determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla; sin embargo, se han detectado diferencias considerables entre los resultados de los tres métodos. Por lo anterior, se ha adoptado el método del picnómetro sumergido al ser el ensayo comúnmente utilizado en los laboratorios de México y el que presenta una mejor repetibilidad.

4 MAC-IV. Método de prueba para determinar la resistencia de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido por humedad por medio de la Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR)

4.1 Objetivo

Determinar la resistencia al daño inducido por humedad en una mezcla asfáltica compactada mediante la relación en la resistencia a tensión indirecta (TSR) de una serie de especímenes acondicionados contra especímenes no acondicionados.

4.2 Equipo y herramientas

- **Prensa de ensaye con anillo dinamómetro o mecánica o servo-hidráulica** capaz de mantener una velocidad constante de deformación de 50.8 mm/min.
- **Celda o anillo de carga** capaz de aplicar una carga de compresión a una velocidad de deformación controlada con una resolución de 50 N.
- **Mordaza tipo Lottman**, barras de acero con una superficie cóncava de radio de curvatura igual al radio del espécimen por ensayar. Para especímenes con diámetro de 100 mm (4 pulg) el ancho de las barras deberá ser de 12.7 ± 0.3 mm. Para especímenes con diámetro de 150 mm (6 pulg) el ancho de las barras deberá ser de 19.05 ± 0.3 mm. La longitud de las barras debe ser mayor que la altura de los especímenes. Las esquinas de las barras deberán estar ligeramente biseladas. Las barras de carga formarán parte de un dispositivo similar al que se muestra en la Figura 4.1, en el que la barra de carga inferior está montada sobre una base que tiene dos postes de guía perpendiculares que se extienden hacia arriba. La barra de carga superior deberá estar limpia y deberá poder deslizarse libremente sobre los postes.
- **Picnómetro de vacío** de metal o plástico con un diámetro aproximado de 180 a 260 mm y una altura mínima de 160 mm; equipado con una cubierta (tapa) transparente, empaque de goma y una conexión para línea de vacío, suficientemente rígidos para soportar la presión de vacío aplicada sin deformarse.

Nota 4.1. La cubierta transparente permite observar la liberación de burbujas de aire del espécimen.

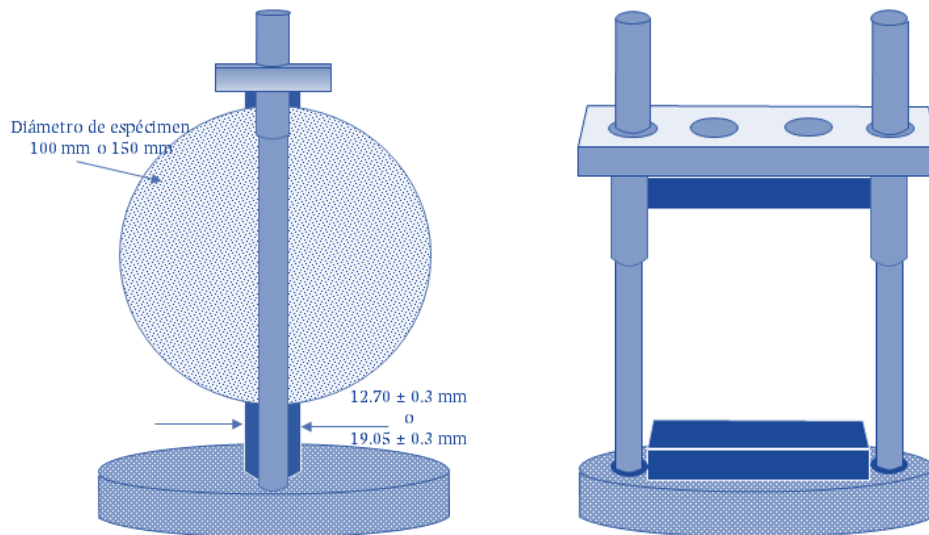


Figura 4.1 Diagrama de mordaza para tensión indirecta

- **Bomba de vacío** capaz de evacuar el aire del picnómetro a una presión absoluta de 4.0 kPa [30 mmHg] o menor.
- **Manómetro de presión absoluta** conectado al picnómetro de vacío para verificar que la presión especificada se aplique al mismo y sea capaz de medir la presión absoluta de 4.0 kPa [30 mmHg] o menor.
- **Válvula de alivio** fijada a la bomba de vacío o al picnómetro para ajustar el vacío que está siendo aplicado al picnómetro y para la lenta liberación de la presión aplicada.
- **Balanza** con resolución de 0.1 g.

Nota 4.2. Se recomienda contar con una balanza con capacidad mínima de 4000 g.

- **Baño de agua** capaz de mantener una temperatura de 60 ± 1 °C y 25 ± 1 °C.
- **Congelador** capaz de mantener una temperatura de -18 ± 2 °C.
- **Termómetro** con un rango de medición suficiente para evaluar 60 y 25 °C y con una resolución mínima de 0.5 °C.

Nota 4.3. Se recomienda el termómetro de inmersión ASTM 36C (rango: -2 a +68 °C, resolución: 0.5 °C).

- **Instrumento de medición lineal (Vernier)** con resolución mínima de 0.1 mm.

- **Misceláneos:** bolsas y película plástica antiderrames para envoltura de los especímenes.

4.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Prensa.** Verificar la velocidad de deformación de 50.8 mm/min.
- **Celda de carga.** Calibrar con una resolución de 1 N. Se recomienda que la calibración sea en al menos 6 puntos (3000, 5000, 10000, 15000, 20000, 25000 N) considerando el rango de trabajo y, al menos, una vez cada 12 meses.
- **Manómetro.** Calibrar con una resolución de 0.1 kPa o 0.1 mmHg. Se recomienda que la calibración sea en al menos 3 puntos (30, 50, 70 kPa) y, al menos, una vez cada 12 meses.
- **Balanza.** Calibrar o verificar con una resolución de 0.1 g o mayor. Se recomienda que la calibración sea en, al menos, 4 puntos (1000, 2000, 3000, 4000 g) considerando el rango de trabajo y, al menos, una vez cada 12 meses.
- **Termómetro.** Calibrar o verificar con una resolución de 0.1 °C o mayor. Se recomienda que la calibración sea en, al menos, dos puntos considerando el rango de trabajo (25 y 60 °C) y, al menos, una vez cada 12 meses.
- **Instrumento de medición lineal (Vernier).** Calibrar o verificar con una resolución 0.1 mm o mayor. Se recomienda que la calibración sea en, al menos, cinco puntos considerando el rango de trabajo (50, 80, 100, 150, 200 mm) y, por lo menos, una vez cada 12 meses.

4.4 Método de prueba

4.4.1 Preparación del espécimen

Especímenes del laboratorio

- 4.4.1.1 Preparar al menos **6 especímenes** de acuerdo con el *Método estándar para la preparación y compactación de especímenes de mezcla asfáltica en caliente por medio del compactador giratorio (MAC-I)*.
- 4.4.1.2 Se utilizarán especímenes de **150 mm** de diámetro por **95 ± 5 mm** de altura, o **100 mm** de diámetro por **63.5 ± 2.5 mm** de altura. Los especímenes deberán tener un porcentaje de vacíos de **7 ± 1 %**.

Nota 4.4. Cuando se utilicen agregados con partículas mayores a 25 mm [1 pulg], utilizar muestras con un diámetro mínimo de 150 mm [6 pulg].

Nota 4.5. Se advierte que se ha determinado que el diámetro de la muestra influye tanto en la resistencia a la tensión como en la relación de resistencia a la tensión. Los valores de la resistencia a la tensión pueden ser diferentes para los especímenes de 150 mm en comparación con los especímenes de 100 mm.

Especímenes de campo

4.4.1.3 Obtener los especímenes de acuerdo con las especificaciones de la *Práctica estándar para el muestreo de mezclas asfálticas compactadas para pruebas en laboratorio* (ASTM D5361). Se deberán considerar los cuidados pertinentes en la extracción de especímenes mencionados en el Anexo A.4.

4.4.2 Ejecución de la prueba

Cálculo de la volumetría original (especímenes acondicionados y no acondicionados)

4.4.2.1 Registrar el diámetro (**D**) y la altura del espécimen (**t**) de acuerdo con las especificaciones que se muestran en el Anexo A7.

4.4.2.2 Determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla G_{mm} (**G**) obtenida de acuerdo con las especificaciones del *Método de prueba para determinar la gravedad específica teórica máxima y densidad de la mezcla asfáltica* (MAC-III).

4.4.2.3 Determinar la gravedad específica bruta de los especímenes G_{mb} (**F**) obtenida de acuerdo con las especificaciones del *Método de prueba para determinar la gravedad específica bruta y densidad de mezcla asfáltica compactada* (MAC-II) registrando la masa del espécimen seco al aire (**A**), la masa en condición saturada y superficialmente seca (**B**) y la masa del espécimen sumergido (**C**).

4.4.2.4 Registrar el volumen del espécimen en cm^3 (**E = B - C**).

4.4.2.5 Registrar el porcentaje de vacíos de aire (**H = (G - F) / G * 100**).

4.4.2.6 Registrar el volumen de aire en cm^3 (**I = H * E / 100**).

4.4.2.7 Clasificar los especímenes en 2 subgrupos, por lo menos 3 especímenes en cada subgrupo. Se deberán agrupar de tal manera que el promedio del porcentaje de vacíos de cada subgrupo sea similar.

4.4.2.8 Un subgrupo será sometido a un proceso de acondicionamiento (especímenes acondicionados), mientras que el segundo subgrupo no será sometido a ningún proceso de acondicionamiento (especímenes no acondicionados).

Saturación y volumetría de saturación (especímenes acondicionados)

4.4.2.9 Calcular la masa del espécimen SSS (**B'**) requerida después del proceso de saturación para obtener un grado de saturación (**S'**) de 70 – 80 %.

$$B'_{70} = 70 * \frac{I}{100} + A \qquad B'_{80} = 80 * \frac{I}{100} + A$$

Donde:

B'_{70} = masa del espécimen SSS para un grado de saturación de 70%.

B'_{80} = masa del espécimen SSS para un grado de saturación de 80%.

4.4.2.10 Colocar un espécimen en el picnómetro de vacío.

4.4.2.11 Verter agua hasta que el nivel se encuentre por lo menos **25 mm** por encima del espécimen.

4.4.2.12 Tapar el picnómetro y aplicar un nivel de vacío tal que se logre la saturación deseada del espécimen. Se recomienda aplicar una presión absoluta de **13 - 70 kPa (97.5 - 525 mmHg)** durante un periodo de tiempo corto, aproximadamente de **5 - 10 min.** La presión absoluta y el tiempo de saturación dependerán del tipo de mezcla, estos factores podrán variar para lograr el grado de saturación requerido.

Nota 4.6. Si el grado de saturación es difícil de lograr, se puede utilizar agua caliente hasta 60 °C.

4.4.2.13 Disminuir gradualmente la presión hasta llegar a cero y permitir que el espécimen permanezca sumergido de **5 a 10 minutos** adicionales.

4.4.2.14 Retirar el espécimen del picnómetro y registrar la masa del espécimen SSS (**B'**) después del proceso de saturación. Verificar que dicha masa se encuentre entre los rangos B'_{70} Y B'_{80} .

$$B'_{70} < B' < B'_{80}$$

Si el valor de $B' < B'_{70}$ repetir el procedimiento de saturación desde el punto **5.4.2.10.**

Si el valor de $B' > B'_{80}$ el espécimen ha sido dañado y deberá ser descartado.

4.4.2.15 Calcular el volumen de agua absorbida del espécimen en cm^3 :

$$J' = B' - A$$

Donde:

J' [cm^3] = volumen de agua absorbida, con una precisión de 0.1 g.

B' [g] = masa del espécimen saturado superficialmente seco, con precisión de 0.1 g.

A [g] = masa del espécimen seco en aire, con precisión de 0.1 g.

4.4.2.16 Calcular y registrar el grado de saturación del espécimen (**S'**):

$$S' = \frac{100 J'}{I}$$

4.4.2.17 Sumergir el espécimen en el baño a **25 ± 1 °C** por un tiempo de **3 a 5 min** y registrar la masa del espécimen sumergido (**C'**).

4.4.2.18 Registrar el volumen del espécimen en cm³ (**E' = B' - C'**).

4.4.2.19 Calcular y registrar el grado de expansión del espécimen.

$$\text{Exp}' [\%] = \frac{100 (E' - E)}{E}$$

Volumetría de acondicionamiento (especímenes acondicionados)

4.4.2.20 Cubrir cada uno de los especímenes acondicionados con dos capas de película de plástico y sellar con cinta adhesiva si es necesario.

4.4.2.21 Colocar cada espécimen en una bolsa de plástico y verter aproximadamente **10 ml** de agua y cerrar la bolsa.

4.4.2.22 Colocar los especímenes acondicionados en un congelador a una temperatura de **-18 ± 2 °C** por un periodo de al menos **15 horas**.

4.4.2.23 Acondicionar el baño de agua a una temperatura de **60 ± 1 °C**.

4.4.2.24 Retirar los especímenes del congelador y sumergirlos en el baño de agua a **60 ± 1 °C** durante **24 ± 1 horas**.

Nota 4.7. Se recomienda que después de 3 minutos de inmersión y que el deshielo en la superficie de la muestra ocurra, se retire la bolsa y envoltura del espécimen.

4.4.2.25 Ajustar la temperatura del baño de agua a una temperatura a **25 ± 1 °C** y acondicionar los especímenes al menos **60 minutos**, pero no más de **120 minutos**.

4.4.2.26 Determinar la masa en condición saturada y superficialmente seca (**B''**) y la masa del espécimen sumergido (**C''**) de los especímenes acondicionados de acuerdo con el punto 4.4.2.3.

4.4.2.27 Registrar el volumen del espécimen en cm³ (**E'' = B'' - C''**).

4.4.2.28 Registrar el diámetro (**D''**) y la altura de este (**t''**) de acuerdo con las especificaciones que se muestran en el Anexo A7.

4.4.2.29 Calcular el volumen de agua absorbida del espécimen en cm³:

$$J'' = B'' - A$$

Donde:

J'' [cm³] = volumen de agua absorbida, con una precisión de 0.1 g.

B'' [g] = masa del espécimen saturado superficialmente seco, con precisión de 0.1 g.

A [g] = masa del espécimen seco en aire, con precisión de 0.1 g.

4.4.2.30 Calcular y registrar el grado de saturación del espécimen (**S''**):

$$S'' = \frac{100 J''}{I}$$

Un grado de saturación que exceda el 80 % es aceptable.

4.4.2.31 Calcular y registrar el grado de expansión del espécimen.

$$\text{Exp}'' [\%] = \frac{100 (E'' - E)}{E}$$

Resistencia a la tensión indirecta (especímenes acondicionados)

4.4.2.32 Colocar cada espécimen en la mordaza Lottman en la barra de carga inferior y posicionarlo de tal manera que se encuentre centrado entre las barras de carga.

Nota 4.8. El tiempo transcurrido entre la retirada del espécimen del baño y la determinación de la carga final no debe de exceder de 2 min.

4.4.2.33 Aplicar una carga diametral a razón de **50 mm/min** (2 pulg/min) por medio de la prensa hasta que se alcance la carga máxima soportada por el espécimen y registrar la misma (**P''**).

4.4.2.34 Retirar el espécimen de la prensa, romperlo e inspeccionar la superficie visualmente para detectar si hubo rompimiento del material pétreo.

Resistencia a la tensión indirecta (especímenes no acondicionados)

4.4.2.35 Acondicionar el baño de agua a una temperatura de **25 ± 1°C** y sumergir los especímenes al menos **20 minutos**, pero no más de **120 minutos**.

4.4.2.36 Colocar cada espécimen en la mordaza Lottman en la barra de carga inferior y posicionarlo de tal manera que se encuentre centrado entre las barras de carga.

Nota 4.9. El tiempo transcurrido entre el retiro del espécimen del baño y la determinación de la carga final no debe exceder de 2 min.

4.4.2.37 Aplicar una carga diametral a razón de **50 mm/min** (2 pulg/min) por medio de la prensa hasta que se alcance la carga máxima soportada por el espécimen y registrar la misma (**P**).

4.4.2.38 Retirar el espécimen de la prensa, romperlo e inspeccionar la superficie visualmente para detectar si hubo rompimiento del material pétreo.

4.5 Cálculos

4.5.1 Cálculo de la resistencia a la tensión indirecta del espécimen acondicionado

$$S_{ta} = \frac{2000 P''}{\pi t'' D''}$$

Donde:

S_{ta} [kPa] = resistencia a la tensión indirecta del espécimen acondicionado. Reportar este valor con aproximación de 0.1 kPa (1 decimal).

P'' [N] = carga máxima del espécimen acondicionado, con aproximación de 0.1 N (1 decimal).

t'' [mm] = altura del espécimen acondicionado, con aproximación de 0.1 mm (1 decimal).

D'' [mm] = diámetro del espécimen acondicionado, con aproximación de 0.1 mm (1 decimal).

4.5.2 Cálculo de la resistencia a la tensión indirecta del espécimen no acondicionado

$$S_t = \frac{2000 P}{\pi t D}$$

Donde:

S_t [kPa] = resistencia a la tensión indirecta del espécimen no acondicionado. Reportar este valor con aproximación de 0.1 kPa (1 decimal).

P [N] = carga máxima del espécimen no acondicionado, con aproximación de 0.1 N (1 decimal).

t [mm] = altura del espécimen no acondicionado, con aproximación de 0.1 mm (1 decimal).

D [mm] = diámetro del espécimen no acondicionado, con aproximación de 0.1 mm (1 decimal).

4.5.3 Cálculo de la relación de resistencia a la tensión indirecta

$$TSR = \frac{\bar{S}_{ta}}{\bar{S}_t} * 100$$

Donde:

TSR [%] = relación de resistencia a la tensión indirecta. Reportar este valor con aproximación de 1% (sin decimales).

\bar{S}_{ta} [kPa] = resistencia promedio a la tensión indirecta del subconjunto acondicionado.

\bar{S}_t [kPa] = resistencia promedio a la tensión indirecta del subconjunto no acondicionado.

4.6 Registro de resultados

Tabla 4.1 Registro de resultados de TSR

TSR <i>ASTM D4867</i>	Identificación de las muestras:	
	Fecha de ensayo:	

Volumetría original	Subconjunto acondicionado			Subconjunto no acondicionado		
	1	2	3	4	5	6
(D) Diámetro [mm]						
(t) Espesor [mm]						
(G) Gravedad específica teórica máxima (G_{mm})						
(F) Gravedad específica bruta (G_{mb}) (A/E)						
(A) Masa del espécimen seca en aire [g]						
(B) Masa del espécimen en condición SSS [g]						
(C) Masa del espécimen sumergido [g]						
(E) Volumen (B-C) [cm ³]						
(H) Vacíos de aire ($(G-F/G) * 100$) [%]						
(I) Volumen de vacíos de aire ($H * E / 100$) [cm ³]						
Saturación y volumetría de saturación	1	2	3	4	5	6
(B') Masa del espécimen en condición SSS [g]						
(J') Volumen de agua absorbida (B'-A) [cm ³]						
(S') Grado de saturación ($100 * J' / I$) [%]						
(C') Masa del espécimen sumergido [g]						
(E') Volumen (B'-C') [cm ³]						
(Exp') Grado de expansión ($100 * (E' - E) / E$) [%]						
Volumetría de acondicionamiento	1	2	3	4	5	6
(D'') Diámetro [mm]						
(t'') Espesor [mm]						
(B'') Masa del espécimen en condición SSS [g]						
(C'') Masa del espécimen sumergido [g]						
(E'') Volumen (B''-C'') [cm ³]						
(J'') Volumen de agua absorbida (B''-A) [cm ³]						
(S'') Grado de saturación ($100 * J'' / I$) [%]						
(Exp'') Grado de expansión ($100 * (E'' - E) / E$) [%]						
Cálculos de resistencia	1	2	3	4	5	6
(P'') Carga [N]						
(P) Carga [N]						
(S_{ta}) Resistencia del espécimen acondicionado ($2000 * P'' / \pi t'' D''$) [kPa]						
(S_t) Resistencia del espécimen no acondicionado ($2000 * P / \pi t D$) [kPa]						
Resistencia promedio y TSR						
(\bar{S}_{ta}) Resistencia promedio del subconjunto no acondicionado [kPa]						
(\bar{S}_t) Resistencia promedio del subconjunto acondicionado [kPa]						
(TSR) Relación de resistencia a la tensión indirecta ($\bar{S}_{ta} / \bar{S}_t * 100$) [%]						

4.7 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad de los resultados

Tabla 4.2 Criterios r&R para el ensayo de TSR

Parámetro	1 operador		Multilaboratorio	
	1S	Rango máximo aceptable entre 3 resultados	1S	D2S
\bar{S}_{ta} y \bar{S}_t	27 kPa	89 kPa	-	-
TSR	-	-	4.3 %	12 %

Ver Anexo A.9

5 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

5.1 Objetivo

Determinar la susceptibilidad a la humedad y formación de roderas mediante el equipo de Rueda Cargada de Hamburgo en una mezcla asfáltica en caliente compactada. Así mismo, determinar la falla prematura de la mezcla debido a la debilidad de la estructura del agregado o inadecuada rigidez del asfalto.

5.2 Equipo y herramientas

- **Máquina de rueda cargada de Hamburgo** de accionamiento eléctrico capaz de mover una rueda de acero de 47.0 mm de ancho y 203.2 mm de diámetro, sobre el espécimen de prueba. La carga en cada rueda deberá ser de 71.6 ± 0.45 kg (705 ± 4.5 N). La rueda deberá hacer 52 ± 2 pasadas por minuto con una velocidad máxima de 30.5 cm/s aproximadamente, medido en el punto central.
- **Control de sistema de temperatura** capaz de controlar la temperatura del agua dentro del equipo, en un rango de 25 a 70 ± 1 °C, con sistema de circulación mecánica que estabiliza la temperatura dentro del equipo.
- **Sistema de medición de rodera**, dispositivo transductor de desplazamiento (LVDT) con un rango de medición entre 0 y 20 mm, capaz de medir la profundidad de la rodera al centro ± 1.27 mm (0.5 in) a lo largo de la trayectoria de la rueda, con una aproximación de 0.15 mm. La adquisición de los datos se debe realizar al menos cada 400 pasadas, sin detener la rueda y relacionando la deformación contra el número de pasadas correspondiente.
- **Contador de paso de rueda** un solenoide que cuenta la pasada de la rueda sobre el espécimen. Éste se acopla a la medición de la rueda permitiendo que la profundidad de la rodera sea expresada en función de las pasadas.
- **Sistema de montaje del espécimen de losa** de acero inoxidable que se monta rígidamente a la máquina. El sistema debe restringir el desplazamiento del espécimen 0.5 mm durante la prueba y suspender el espécimen para

proporcionar un mínimo de 20 mm de agua de circulación libre en todos los lados.

- **Sistema de montaje de espécimen cilíndrico** conformado por dos moldes de polietileno de alta densidad o yeso blanco, para asegurar el espécimen. Colocado en una bandeja de acero inoxidable montado rígidamente a la máquina. El sistema debe restringir el desplazamiento del espécimen con una aproximación de 0.5 mm y 20 mm de espacio libre para circulación de agua.
- **Compactador de amasado lineal hidráulico** que utiliza una serie de placas de acero alineadas verticalmente para compactar mezclas asfálticas moldeadas en placas planas y rectangulares de grosor y densidad predeterminados. De acuerdo con las especificaciones del *Método estándar para la preparación y determinación de la densidad relativa de las muestras de mezcla asfáltica en caliente por medio del compactador giratorio* (ASTM D6925) para especímenes en losa.
- **Compactador Giratorio electromecánico**, electrohidráulico o electroneumático capaz de girar a 30 ± 0.5 rpm y producir un ángulo de giro interno constante de 1.16 ± 0.02 ° durante el proceso de compactación. El equipo deberá ser capaz de darle al espécimen hasta 250 giros, así como de aplicar una presión de 600 ± 60 kPa durante los primeros 5 giros y de 600 ± 18 kPa durante el proceso restante.
- **Sierra** automatizada para corte de muestras.

5.3 Calibraciones y/o verificaciones

- **Máquina de Rueda Cargada de Hamburgo.**
 - **Rueda.** Verificar el movimiento alternativo en el espécimen de prueba a 52 ± 2 pasadas por minuto y, al menos, una vez cada 12 meses.
 - **Control de sistema de temperatura.** Verificar con una resolución de 0.1 °C o mayor en, al menos, 4 puntos (50, 55, 60, 65 °C) considerando el rango de trabajo y, por lo menos, una vez cada 6 meses.
 - **Sistema de medición de rodera.** Calibrar o verificar de acuerdo con las especificaciones de la *Práctica estándar para la calibración de transductores de desplazamiento lineal para propósitos geotécnicos* (ASTM D6027) o según las recomendaciones del fabricante.
 - **Sistema de la rueda de carga.** Verificar la carga de la rueda a 705 ± 4.5 N con una resolución de 0.4 N, según las recomendaciones del

fabricante considerando el rango de trabajo y, al menos, una vez cada 12 meses.

5.4 Método de prueba

5.4.1 Preparación del equipo

- 5.4.1.1 Encender el equipo y acondicionar el agua a una temperatura de ensayo ± 1 °C, de acuerdo con especificaciones del fabricante.

5.4.2 Preparación del espécimen

Especímenes en laboratorio

Preparación de especímenes cilíndricos

- 5.4.2.1 Preparar 4 especímenes cilíndricos por ensayo de **150 mm** de diámetro y con un contenido de vacíos de **7 ± 0.5 %**. El espesor del espécimen debe ser por lo menos el doble del tamaño nominal del agregado, generalmente produciendo un espécimen de **38 a 100 mm** de espesor (Anexo A.1).
- 5.4.2.2 Para la preparación de los especímenes cilíndricos mezclar y compactar de acuerdo con el *Método de prueba para la preparación y compactación de especímenes de mezcla asfáltica en caliente por medio del compactador giratorio* (MAC-I).

Preparación de especímenes en losa

- 5.4.2.3 Fabricar 2 losas a **320 mm** de largo y **260 mm** de ancho, utilizando el compactador de amasado lineal y con un contenido de vacíos de **7 ± 1 %**. El espesor del espécimen debe ser, por lo menos, el doble del tamaño nominal del agregado, generalmente produciendo un espécimen de **38 a 100 mm** de espesor.
- 5.4.2.4 Fabricar la mezcla de acuerdo con el *Método de prueba para la preparación y compactación de especímenes de mezcla asfáltica en caliente por medio del compactador giratorio* (MAC-I, puntos 1.4.2.2 – 1.4.2.8).
- 5.4.2.5 Calentar los moldes y herramientas a la temperatura de compactación.
- 5.4.2.6 Compactar los especímenes en losa de acuerdo con las especificaciones del fabricante del equipo.
- 5.4.2.7 Enfriar los especímenes a temperatura ambiente en una superficie limpia y plana hasta que se enfríen al tacto.

Especímenes de campo

Obtención de muestra para fabricación de especímenes en laboratorio

- 5.4.2.8 Las muestras de mezcla asfáltica producida en planta se obtendrán de acuerdo con la *Práctica estándar para el muestreo de mezclas asfálticas de pavimentación* (ASTM D979) u otro método de muestreo especificado. Las muestras se reducirán al tamaño de prueba de acuerdo con la *Práctica estándar para la reducción de muestras de agregado al tamaño de prueba "Método B"* (ASTM C702).
- 5.4.2.9 Preparar 4 especímenes cilíndricos por ensayo de **150 mm** de diámetro y con un contenido de vacíos de **7 ± 0.5 %**. El espesor del espécimen debe ser, por lo menos, el doble del tamaño nominal del agregado, generalmente produciendo un espécimen de **38 a 100 mm** de espesor.
- 5.4.2.10 Compactar los especímenes de acuerdo con el *Método de prueba para la preparación y compactación de especímenes de mezcla asfáltica en caliente por medio del compactador giratorio* (MAC-I, punto 1.4.3).

Obtención de especímenes compactados

- 5.4.2.11 Obtener los especímenes de acuerdo con las especificaciones de la *Práctica estándar para el muestreo de mezclas asfálticas compactadas para pruebas en laboratorio* (ASTM D5361).
- 5.4.2.12 Obtener por ensayo: **4** especímenes cilíndricos de **150 mm** de diámetro, **2** especímenes cilíndricos de **250 mm** de diámetro, **2** especímenes cilíndricos de **300 mm** de diámetro, o **2** losas a **320 mm** de largo y **260 mm** de ancho.

Corte transversal de especímenes

Corte transversal de especímenes cilíndricos

- 5.4.2.14 Cortar los especímenes de 150 mm de diámetro con una sierra a una distancia aproximada de **16 mm** del centro del espécimen al borde exterior. La distancia exacta de corte se deberá verificar con el tamaño de los moldes. La altura debe ser ajustada al sistema de montaje.

Nota 5.3. La cantidad de material aserrado de los especímenes puede variar para lograr un ancho no mayor a 7.5 mm entre los moldes.

Corte de losas compactadas

- 5.4.2.15 Cortar las losas con una sierra para obtener dimensiones de aproximadamente **260 mm** de ancho por **320 mm** de largo. Utilizar

espesores de losa de **38 a 100 mm**. La altura debe ser ajustada al sistema del montaje del espécimen.

Determinación del contenido de vacíos

- 5.4.2.16 Determinar la gravedad específica bruta del espécimen (G_{mb}) de acuerdo con la especificación del *Método de prueba para determinar la gravedad específica bruta y densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada (MAC-II)*.
- 5.4.2.17 Determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla (G_{mm}) de acuerdo con las especificaciones del *Método de prueba para determinar la gravedad específica teórica máxima y la densidad de la mezcla asfáltica (MAC-III)*.
- 5.4.2.18 Determinar el contenido de vacíos (Anexo A.2) de la muestra. Los especímenes de campo pueden ser ensayados con el contenido de vacíos del cual se obtienen.

5.4.3 Ejecución de la prueba

Montaje de especímenes cilíndricos de laboratorio o campo

- 5.4.3.1 Ajustar los especímenes dentro de los moldes de polietileno. Colocar los moldes de polietileno en la bandeja cumpliendo con las dimensiones descritas en la Figura 5.1.
- 5.4.3.2 Colocar las bandejas de montaje con los especímenes de prueba en el equipo y ajustar la altura de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.
- 5.4.3.3 En caso de existir espacio entre el espécimen y el molde de polietileno se podrá utilizar una mezcla de yeso-cemento para rellenar los vacíos. Permitir que fragüe el yeso por lo menos **1 hora**.

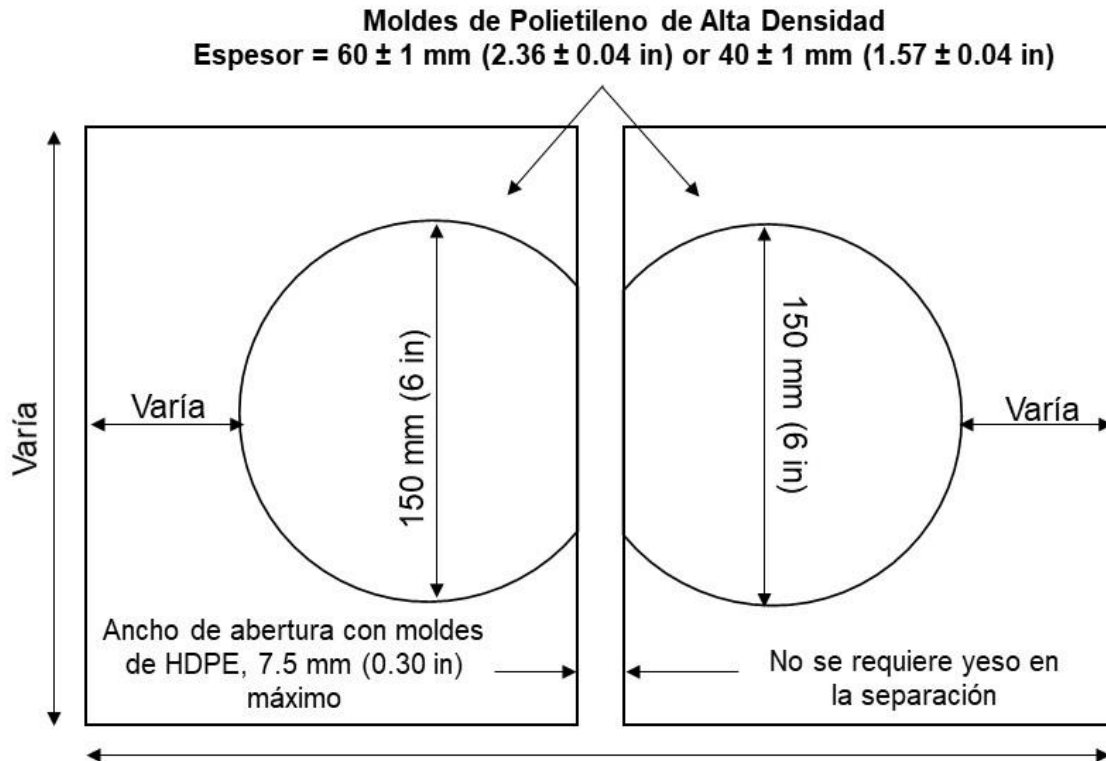


Figura 5.1 Dimensiones de moldes de polietileno de alta densidad

5.4.3.4 En caso de no contar con moldes de polietileno se podrá utilizar otro material de montaje, el cual deberá soportar al menos **890 N** (200 lb) de carga sin agrietarse.

Montaje de losas de laboratorio o campo

5.4.3.5 Utilizar una mezcla de yeso-cemento para montar rígidamente los especímenes de losa en las bandejas de montaje.

5.4.3.6 Verter la mezcla de yeso-cemento a una altura igual a la del espécimen para llenar el espacio de aire entre el mismo y los lados de la bandeja de montaje. Permitir que fragüe el yeso por lo menos **1 hora**.

5.4.3.7 El espécimen de la losa estará en contacto directo con la bandeja de montaje; sin embargo, el yeso puede fluir por debajo de la muestra. El yeso debajo de la muestra no debe exceder los **2 mm**.

Si utiliza otro material para el montaje, éste deberá soportar al menos **890 N** (200 lb) de carga sin agrietarse.

5.4.3.8 Colocar las bandejas de montaje con los especímenes de prueba en el equipo y ajustar la altura de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

Ejecución del ensayo

- 5.4.3.9 Encender la Rueda Cargada de Hamburgo e iniciar el software utilizado para comunicarse con el equipo.
- 5.4.3.10 Introducir la información necesaria del proyecto y requisitos de configuración del ensayo.
- 5.4.3.11 Seleccionar la temperatura de ensayo, profundidad máxima de rodera permitida y número máximo de pasadas de acuerdo con las especificaciones del ensayo.
- 5.4.3.12 Llenar el baño de agua del equipo de Rueda Cargada de Hamburgo a la temperatura de ensayo seleccionada de acuerdo con las especificaciones del equipo.
- 5.4.3.13 Pre-acondicionar los especímenes de prueba en el baño por **30 minutos** después de que el agua haya alcanzado la temperatura de prueba seleccionada. Los especímenes no deben permanecer sumergidos más de **60 ± 5 minutos** antes de iniciar el ensayo (incluyendo el tiempo de acondicionamiento).
- 5.4.3.14 Hacer descender las ruedas sobre los especímenes. Las ruedas no deberán estar en contacto con los especímenes durante más de **5 minutos** antes de arrancar la prueba.
- 5.4.3.15 Hay que asegurar que el LVDT pueda medir entre **10 y 18 mm** y ajustar si es necesario para obtener esta lectura.
- 5.4.3.16 Iniciar el ensayo.
- 5.4.3.17 El equipo se detendrá cuando se hayan efectuado el número de pasadas especificadas o cuando el espécimen haya alcanzado la profundidad de rodera máxima establecida.

5.5 Cálculos

5.5.1 Definición de un “ensayo”

Para el propósito de este método un “ensayo” se define como:

- 5.5.1.1 Dos especímenes de losa de 320 mm de largo por 260 mm de ancho; dos especímenes cilíndricos de 250 mm de diámetro, o dos especímenes cilíndricos de 300 mm de diámetro; cada uno de ellos destinado para una rueda.
- 5.5.1.2 Cuatro especímenes de 150 mm de diámetro, cortados y agrupados en pares; cada par destinado para una rueda.

El resultado del ensayo se reportará como el valor promedio de ambos especímenes (5.5.1.1) o de ambos pares de especímenes (5.5.1.2).

5.5.2 Cálculos de los parámetros de prueba

5.5.2.1 Graficar la profundidad de rodera registrada por rueda en función del número de pasadas.

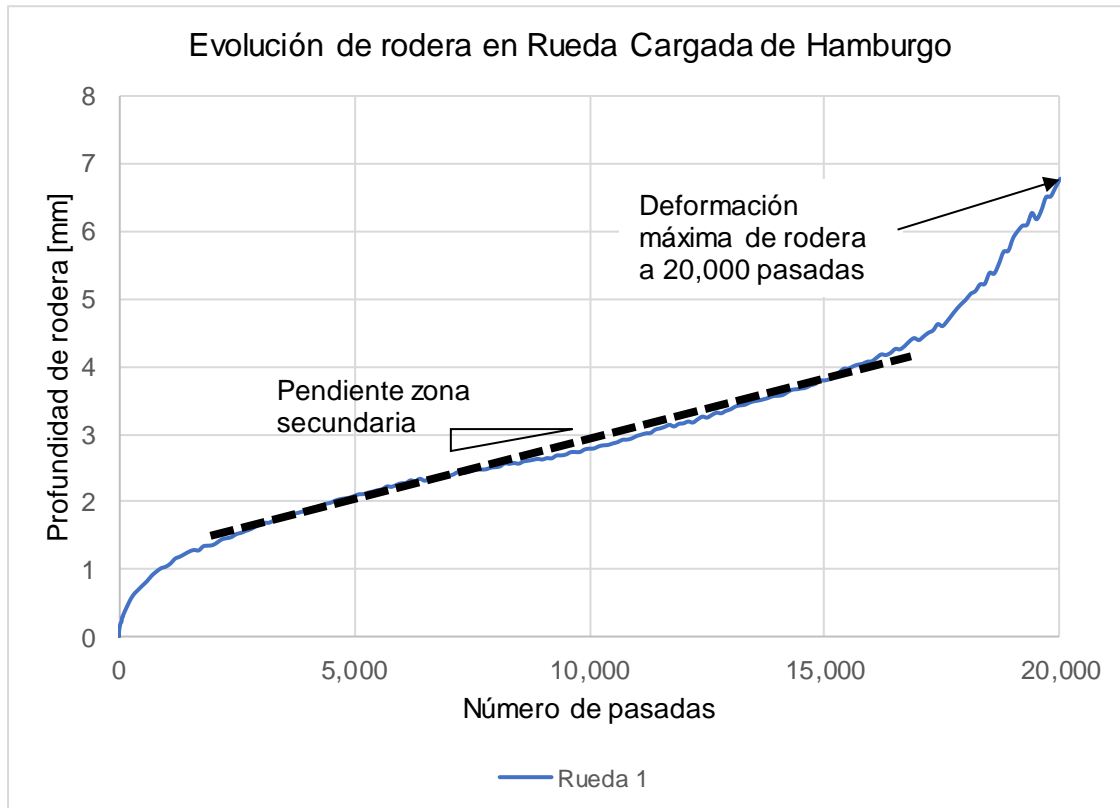


Figura 5.2 Gráfica de profundidad de rodera

5.5.2.2 Determinar la profundidad máxima de rodera como la deformación máxima obtenida al número de pasadas especificadas en el ensayo.

5.5.2.3 Determinar la pendiente de la zona secundaria.

5.6 Registro de resultados

Tabla 5.1 Registro de resultados de Rueda Cargada de Hamburgo

Rueda Cargada de Hamburgo AASHTO T324	Identificación de la muestra:	
	Tipo de espécimen:	
	Dimensiones del espécimen:	
	Fecha de ensayo:	
	Temperatura de ensayo:	
	Número de pasadas máx.:	

RESULTADOS	Rueda 1		Rueda 2	
(G _{mb}) Gravedad específica bruta				
(G _{mm}) Gravedad específica teórica máxima				
(V _a) Contenido de vacíos [%]				
Rodera por rueda al número de pasadas máx.				
Pendiente de la zona secundaria [mm/pasadas]				
Rodera promedio al número de pasadas máx.				
Pendiente promedio de la zona secundaria [mm/pasadas]				

5.7 Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados

No se cuenta con datos para realizar una declaración sobre estos criterios.

6 Bibliografía

1. ASTM D6925 (2015). *Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mix Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor*. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/D6925.htm>.
2. ASTM D979 (2015). *Standard Practice for Sampling Bituminous Paving Mixtures*. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/D979.htm>.
3. ASTM C702 (2011). *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/C702.htm>.
4. Asphalt Institute (2001). *Superpave Mix Design Series No. 2 (SP-2)*. Third edition: USA.
5. ASTM D2726 (2014). *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures*. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/D2726.htm>.
6. ASTM D1188 (2007). *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples*. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/D1188.htm>.
7. ASTM D5361 (2014). *Standard Practice for Sampling Compacted Bituminous Mixtures for Laboratory Testing*. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/D5361.htm>.
8. ASTM D2041 (2011). *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/D2041.htm>.
9. ASTM D4867 (2009). *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures*. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/D4867.htm>.
10. ASTM D6931 (2012). *Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures*. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/D6931.htm>.

11. ASTM D3549 (2011). *Standard Test Method for Thickness of Height of Compacted Bituminous Paving Mixture Specimens*. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/D3549.htm>.
12. AASHTO T324 (2016). *Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)*. Recuperado de Techstreet: https://www.techstreet.com/standards/aashto-t-324-16?product_id=1924308
13. ASTM C670 (2015). *Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials*. Recuperado de ASTM International: <https://www.astm.org/Standards/C670.htm>.
14. Protocolo AMAAC PA-MA 01 (2013). *Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño*. Asociación Mexicana del Asfalto. México, D.F.

Anexos

A.1. Tamaño de especímenes

Para asegurar que la evaluación que se esté realizando al espécimen de prueba induzca a resultados confiables, se deberá cumplir con dimensiones mínimas del mismo de acuerdo con el tamaño máximo del agregado.

Diámetro del espécimen: al menos 4 veces el tamaño máximo del agregado.

Altura (espesor) del espécimen: al menos 1.5 veces el tamaño máximo del agregado.

Tabla A.1.1 Tamaño de especímenes según el tamaño máximo del agregado

Tamaño máximo del agregado	Diámetro mínimo [mm]	Altura mínima [mm]
2" (50.8 mm)	203.2	76.2
1 1/2" (38.1 mm)	152.4	57.2
1" (25.4 mm)	101.6	38.1
3/4" (19.1 mm)	76.2	28.6
1/2" (12.7 mm)	50.8	19.1

En especímenes prismáticos se deberán cumplir los mismos requerimientos de altura en cada una de sus caras.

A.2. Cálculo de los vacíos de aire

Los vacíos son el espacio que ocupa el aire en una mezcla asfáltica. Este valor es el complemento al grado o nivel de compactación que tiene la mezcla; es decir, un 4.5% de vacíos de aire, indica que se cuenta con un 95.5% de compactación. Es un dato fundamental en el diseño de mezclas asfálticas y se calcula de la siguiente manera:

$$V_a[\%] = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} * 100$$

A.3. Número de giros de diseño

Este parámetro hace referencia al número de giros que deberá dar el compactador giratorio para lograr la densificación de la mezcla asfáltica. De acuerdo con el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013, el número de giros de diseño o máximo dependerá del nivel de tránsito, como se indica en la Tabla A.3.

Tabla A.3.1 Parámetros de compactación dependiendo el nivel de tránsito

Ejes equivalentes (millones)	Parámetros de compactación		
	N _{ini}	N _{dis}	N _{max}
< 0.3	6	50	75
0.3 a < 3	7	75	115
3 a < 30	8	100	160
> 30	9	125	205

N_{ini} = número de giros iniciales

N_{dis} = número de giros de diseño

N_{max} = número de giros máximo

A.4. Extracción de especímenes de campo

Se deberá tener especial cuidado en evitar la deformación, pandeo o agrietamiento de los especímenes durante y después de la extracción en el pavimento. Los especímenes deberán almacenarse en un lugar templado y seguro.

Los especímenes deberán encontrarse libres de materiales ajenos a la mezcla asfáltica, tales como sello, material de cimentación, otros suelos, papel, aluminio, etc. Cuando la presencia de alguno de estos materiales sea evidente, deberá ser removido mediante una sierra. También es aceptable remover el papel, suelo o empaques utilizando un cepillo de alambres. Si se desea, los especímenes pueden ser separados de otras capas del pavimento haciendo uso de una sierra y otros medios donde se obtenga resultados satisfactorios.

A.5. Masa constante

El término masa constante utilizado en la mayoría de los métodos de prueba de este documento, se refiere a calentar los materiales en un horno o someterlos a algún procedimiento de secado hasta que pierdan la suficiente cantidad de agua (humedad) para que su masa ya no varíe en más de 0.1% en mediciones consecutivas de 15 minutos a una temperatura de 110 ± 5 °C.

Para obtener una muestra a masa constante en el horno se deberán seguir los siguientes pasos:

- Introducir la muestra en un horno a 110 ± 5 °C.
- Permitir que la muestra se seque durante 60 minutos (tiempo a consideración y experiencia del técnico).
- Retirar la muestra del horno y registrar su masa (M_i).
- Introducir la muestra nuevamente al horno durante 15 minutos.
- Retirar la muestra del horno y registrar nuevamente su masa (M_f).
- Calcular el porcentaje de cambio de masa entre las dos mediciones.

$$CM(\%) = \frac{M_f - M_i}{M_i} * 100$$

- g) Si el cambio de masa es menor o igual a 0.1 %, se ha alcanzado el estado del material seco a masa constante.
- h) Si el cambio de masa es mayor a 0.1 %, se deberá introducir nuevamente la muestra al horno y repetir el procedimiento hasta obtener el valor de cambio de masa menor o igual a 0.1 %.

A.6. Presión absoluta y presión de vacío

A lo largo de este documento, y en la aplicación de métodos de prueba donde se requiera usar una presión de vacío, se hará referencia a términos como: presión absoluta, presión de vacío, presión residual, presión manométrica, presión atmosférica, etc. A continuación, se hace énfasis a este tipo de presiones y cómo determinar la presión correcta a aplicar en un método de prueba.

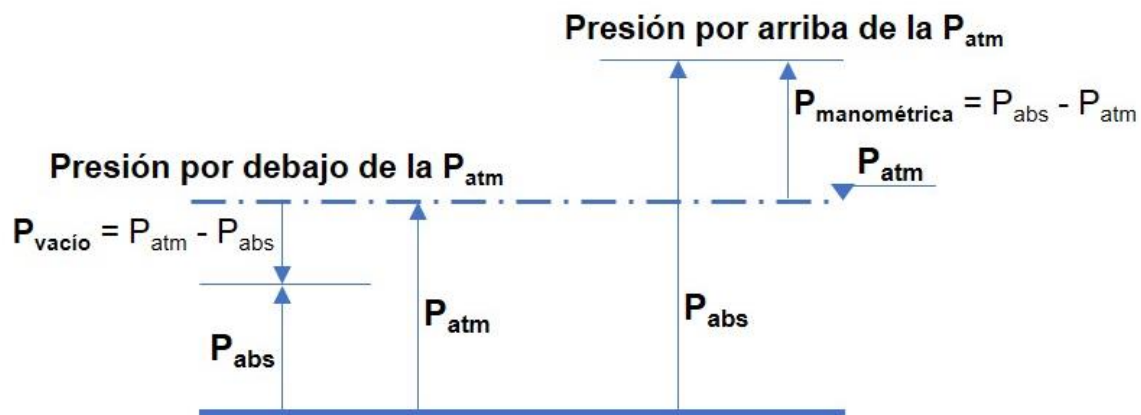


Figura A.6.1. Diagrama de presiones

- La presión atmosférica es la presión que ejerce la atmósfera sobre la superficie de la tierra. Las variables que definen la presión atmosférica son la altitud y la temperatura; por lo tanto, esta presión va a cambiar dependiendo el lugar donde se mida y la temperatura ambiental. A nivel del mar la presión atmosférica es igual a 101.3 kPa (29.9 pulg Hg).
- La presión absoluta se refiere a la presión total aplicada. A esta presión también se le conoce como presión residual.
- La presión de vacío es la diferencia entre la presión atmosférica y la presión absoluta, cuando la presión absoluta es menor a la presión atmosférica.

$$P_{vac} = P_{atm} - P_{abs}$$

- La presión manométrica se refiere a la diferencia entre la presión atmosférica y la presión absoluta, cuando la presión absoluta es mayor a la presión atmosférica.

$$P_{man} = P_{abs} - P_{atm}$$

Existen dos tipos de instrumentos para medir la presión, los cuales se conocen como manómetros de presión absoluta y manómetros de vacío.



Figura A.6.1. Instrumentos para medir la presión

Los manómetros de presión absoluta generalmente indican una lectura diferente de cero, ya que están midiendo la diferencia entre la presión atmosférica y la presión de vacío. Cuando la presión de vacío es cero, el manómetro de presión absoluta estará midiendo la presión atmosférica en el lugar.

$$P_{abs} = P_{atm} - P_{vac}$$

$$P_{abs} = P_{atm} - 0$$

$$P_{abs} = P_{atm}$$

Por otro lado, los manómetros de presión de vacío indicarán cero mientras no se esté aplicando una presión de vacío. Por lo anterior, se debe tener especial cuidado en comprender qué tipo de presión se está especificando en cada método de prueba y con qué tipo de manómetro se está trabajando.

Por ejemplo, el *Método de prueba para determinar la gravedad específica teórica máxima y densidad de la mezcla asfáltica (MAC-III)* establece aplicar una presión absoluta de 3.7 ± 0.3 kPa. Si se cuenta con un manómetro de presión absoluta, se deberá aplicar directamente una presión de 3.7 ± 0.3 kPa o el equivalente en las unidades que mida el manómetro; pero, si se cuenta con un manómetro de presión de vacío, se deberá realizar el cálculo de la presión de vacío por aplicar. Suponiendo que se está a nivel del mar ($P_{atm} = 101.3$ kPa), se deberá aplicar una presión de vacío de 97.6 ± 0.3 kPa.

$$P_{vac} = P_{atm} - P_{abs}$$

$$P_{vac} = 101.3 \text{ kPa} - 3.7 \text{ kPa}$$

$$P_{vac} = 97.6 \text{ kPa}$$

Nota: la presión atmosférica se deberá ajustar a la presión en el lugar donde se realice el ensayo y monitorearse continuamente al ser un valor variable con la temperatura y la altitud. Por lo anterior, la presión de vacío por aplicar dependerá de la presión atmosférica del lugar donde se esté realizando el ensayo.

A.7. Determinación de dimensiones para especímenes

Medir el diámetro del espécimen utilizando un Vernier calibrado; realizando cuatro mediciones en diferentes puntos sobre la periferia y a 90° de la superficie del plano del espécimen. Registrar el promedio de estas dimensiones como el diámetro del espécimen (D).

Medir la altura del espécimen utilizando un Vernier; realizando cuatro mediciones perpendiculares al plano superior del espécimen. Registrar el promedio de estas dimensiones como el espesor (altura) del espécimen (t).

A.8. Compactación de especímenes con 7% vacíos de aire

Para determinar la masa de especímenes que deberán ser compactados a un nivel de vacíos de aire distinto al de diseño, por ejemplo 7%, se deberán realizar los siguientes cálculos:

- a) Determinar el volumen estimado del espécimen a compactar:

$$V_{est} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) * H * 0.001$$

Donde:

V = volumen del espécimen [cm³]

D = Diámetro del espécimen [mm]

H = Altura del espécimen [mm]

- b) Determinar el volumen en los especímenes de diseño:

$$V_{dis} = \left(\frac{\pi(150)^2}{4} \right) * H * 0.001$$

- c) Determinar el volumen medido en los especímenes de diseño:

$$V_{med} = (M_{SSS} - M_{sum})$$

Donde:

M_{SSS} = Masa del espécimen saturado superficialmente seco [g]

M_{sum} = Masa del espécimen sumergido [g]

- d) Determinar el factor de corrección del volumen basada en los especímenes de diseño:

$$C = \frac{V_{med}}{V_{dis}}$$

- e) Aplicar la corrección al volumen estimado del espécimen a compactar:

$$V_{corr} = C * V_{est}$$

- f) Determinar la masa (M) de la mezcla requerida

Debido a que 7.0% de vacíos de aire es igual al 93% de G_{mm} , entonces:

$$G_{mb} = G_{mm} * 93\%$$

$$M = G_{mb} * V_{corr}$$

A.9. Repetibilidad y Reproducibilidad (r&R)

La mayoría de los métodos de ensayo presentan un apartado sobre precisión en el cual se identifica la desviación estándar del ensayo realizado por un operador y la desviación estándar multilaboratorio.

La desviación estándar (1S) de un operador se refiere a la desviación del método de prueba cuando es realizado por el mismo operador, con el mismo equipo y bajo condiciones similares. La desviación estándar multilaboratorio es la desviación del método de prueba cuando alguno de los factores ha cambiado, pudiendo ser cambio de operador, equipo, lugar, etc. La repetibilidad hace referencia a la desviación estándar de un operador, mientras que la reproducibilidad hace referencia a la desviación estándar multilaboratorio.

Existe otro parámetro conocido como la diferencia entre dos resultados (D2S) el cual se obtiene de la siguiente manera: $D2S = 1S(1.96\sqrt{2}) \approx 1S * 2.8$. En algunos casos, cuando el ensayo no indica directamente el valor D2S, éste se puede obtener como se indicó anteriormente, siendo un parámetro rápido para determinar si un ensayo cumple con la repetibilidad o reproducibilidad de éste.

Ejemplo: Verificación de la repetibilidad del ensayo G_{mb} (absorbente)

Resultado 1 = 2.379 Resultado 2 = 2.392

Diferencia entre dos resultados del ensayo = $|2.379 - 2.392| = 0.0130$

Diferencia permitida entre dos resultados (especificación): $D2S = 0.079$

Verificación: $0.0130 \leq 0.079$, por lo tanto, los resultados cumplen con el criterio de repetibilidad.

A.10. Balanza recomendada

Los ensayos para mezclas asfálticas implican el registro de masas en distintos rangos. Por lo anterior, realizando una compilación de la resolución mínima especificada por cada ensayo, así como el rango de masas requerido, se recomienda que un laboratorio adquiera por lo menos una balanza con capacidad mínima de 16,000 g y resolución de 0.1 g para la ejecución de los ensayos contenidos en este manual.

Se recomienda la calibración de la balanza se realice dentro de su rango de uso, es decir, en todos los puntos en los que se utilizará en los ensayos; siendo estos principalmente cinco: 1000, 2000, 3000, 4000, y 5000 g.



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

<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