



---

---

# **Manual de Ensayos para Laboratorio**

## **Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC)**

### **Parte 2**

#### **Ensayos Mecánicos**

Horacio Delgado Alamilla  
Mayra Flores Flores  
Yelitza Ayala del Toro

**Publicación Técnica No. 603**  
**Sanfandila, Qro, 2020**







---

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

**Manual de Ensayos para Laboratorio**  
**Mezclas asfálticas en caliente (MAC) - Parte 2**  
**Ensayos mecánicos**

**Publicación Técnica No.603**  
**Sanfandila, Qro, 2020**

---



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura de vías terrestres del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Horacio Delgado Alamilla, la M. en C. Mayra Flores Flores y la M. en C. Yelitza Ayala del Toro.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación IE 17/19 Uso del método Marshall para el diseño y control de calidad de mezclas asfálticas en caliente



# Contenido

---

Índice de figuras .....	v
Índice de tablas .....	vii
Sinopsis.....	ix
Abstract .....	xi
Resumen ejecutivo.....	xiii
Introducción.....	1
1 MAC-VI Método de prueba para la preparación y compactación de losas de mezclas asfáltica en caliente.....	3
2. MAC-VII Método de prueba para determinar el módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente.....	11
3. MAC-VIII Método de prueba para la determinación de la deformación permanente en la mezcla asfáltica sujeta a una carga de compresión axial cíclica 27	
4. MAC-IX Método de prueba para determinar la vida a la fatiga de mezclas asfálticas sujetas a flexión repetida.....	43
Bibliografía .....	55
Anexos. ....	57



# Índice de figuras

---

Figura 1.1	Dimensiones del espécimen de ensayo .....	8
Figura 2.1	Esquema general de los puntos de medición (sin escala).....	12
Figura 2.2	Dispositivo para pegar pines .....	14
Figura 2.3	Probeta metálica para verificación del sistema de medición .....	14
Figura 2.4	Calibrador para sensor de deformación (LVDT) .....	15
Figura 2.5	Montaje de LVDTs .....	18
Figura 2.6	Instrumentación y acondicionamiento de los especímenes de prueba 20	
Figura 3.1	Esquema general de los puntos de medición (sin escala).....	28
Figura 3.2	Dispositivo para pegar pines .....	30
Figura 3.3	Probeta metálica para verificación del sistema de medición .....	30
Figura 3.4	Calibrador de sensor de deformación (LVDT) .....	31
Figura 3.5	Montaje de LVDTs .....	34
Figura 3.6	Montaje de LVDTs .....	36
Figura 3.7	Cámara de confinamiento.....	36
Figura 3.8	Curva de deformacion permanente acumulada.....	38
Figura 3.9	Estimación de $\epsilon$ .....	39
Figura 4.1	Aparato de carga de prueba de fatiga .....	44
Figura 4.2	Características de carga y movimiento del aparato de prueba de fatiga 45	
Figura 4.3	Montaje del sensor de desplazamiento .....	45
Figura 4.4	Espaciador de mordazas.....	46

Figura 4.5	Calibrador de sensor de deformación (lvdt).....	47
Figura 4.6	Marco de carga y espaciador .....	49
Figura 4.7	Montaje de la prueba de fatiga .....	50
Figura 4.8	Curva de rigidez.....	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 (% Gmm).....	9
Tabla 2.1	Precisión y resolución del sistema de medición .....	11
Tabla 2.2	Requerimientos del sistema de medición de deformación.....	12
Tabla 2.3	Niveles de esfuerzo dinámico típicos.....	19
Tabla 2.4	Número de ciclos para la secuencia de ensayo .....	19
Tabla 2.5	Secuencia y tiempos de acondicionamiento de temperatura.....	19
Tabla 2.6	Límites recomendados para los indicadores de calidad de los datos	21
Tabla 2.7	Guía de solución de problemas para la estadística de calidad de los datos .....	22
Tabla 2.8	Registro de datos de la prueba de módulo dinámico.....	24
Tabla 2.9	Repetibilidad para el modulo dinámico y ángulo de fase.....	25
Tabla 2.10	Reproducibilidad para el modulo dinámico y ángulo de fase.....	26
Tabla 3.1	Precision y resolución del sistema de medición .....	28
Tabla 3.2	Requerimientos del sistema de medición de deformación para la prueba de deformacion permanente bajo carga axial ciclica .....	29
Tabla 3.3	Frecuencias de carga .....	35
Tabla 3.4	Registro de datos del ensayo de deformación permanente.....	40
Tabla 4.1	Muestreo recomendado de datos en la prueba de fatiga.....	50
Tabla 4.2	Registro de datos de la prueba de fatiga .....	54



# **Sinopsis**

---

El presente documento es un manual de pruebas para evaluar el desempeño de mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa, las cuales están basadas en normas ASTM y AASHTO.

El manual describe cuatro métodos de prueba, uno se refiere a la fabricación de especímenes de prueba (MAC-VI) y tres a la evaluación del desempeño de la mezcla asfáltica (MAC-VII, MAC-VIII y MAC-IX) con respecto a la deformación permanente y la resistencia a la fatiga.

Al final del documento, se presentan anexos los cuales tienen como objetivo dejar claro algunos requisitos de los métodos de prueba.



# Abstract

---

This document is a test manual to evaluate the performance of dense graded hot asphalt mixtures, which are based on ASTM and AASHTO standards.

The manual describes four test methods, one refers to the manufacture of test specimens (MAC-VI) and three to the evaluation of the performance of the asphalt mix (MAC-VII, MAC-VIII and MAC-IX) with respect to permanent deformation and resistance to fatigue.

At the end of the document, annexes are presented which aim to clarify some requirements of the test methods.



# Resumen ejecutivo

---

El presente documento es un manual de pruebas para evaluar el desempeño de mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa, las cuales están basadas en normas ASTM y AASHTO.

El manual describe cuatro métodos de prueba, uno se refiere a la fabricación de especímenes de prueba (MAC-VI) y tres a la evaluación del desempeño de la mezcla asfáltica (MAC-VII, MAC-VIII y MAC-IX) con respecto a la deformación permanente y la resistencia a la fatiga, los cuales se mencionan a continuación:

MAC-VI. Método de prueba para la preparación y compactación de losas de mezclas asfálticas en caliente.

MAC-VII. Método de prueba para determinar el modulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente.

MAC-VIII. Método de prueba para la determinación de la deformación permanente en la mezcla asfáltica sujeta a una carga de compresión axial cíclica

MAC-IX. Método de prueba para determinar la vida a la fatiga de mezclas asfálticas sujetas a flexión repetida.

Al final del documento, se presentan anexos los cuales tienen como objetivo dejar claro algunos requisitos de los métodos de prueba.



# Introducción

---

El presente documento presenta la recopilación de métodos de prueba de laboratorio utilizados para evaluar el desempeño de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles que serán sometidas a tránsitos muy altos.

Estas mezclas asfálticas deben ser diseñados de acuerdo con el “Manual de diseño de mezclas asfálticas en caliente en función del nivel de tránsito” publicado por el IMT. En dicho manual se indican los requerimientos que debe cumplir la mezcla asfáltica para cuatro niveles de tránsito. Los ensayos presentados en este documento corresponden al nivel IV de diseño, tránsito muy alto ( $\Sigma L 20 \times 10^6$  ESAL's).

En este nivel se requiere evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica a través de ensayos que permitan determinar parámetros mecánicos de la mezcla, como el módulo dinámico ( $|E^*|$ ), el ángulo de fase ( $\delta$ ), deformación permanente ( $\epsilon$ ), el módulo de rigidez a flexión (S) y la tasa de deformación permanente de la mezcla asfáltica ( $\dot{\epsilon}$ ).

El módulo dinámico se determina a través de la prueba del mismo nombre y consiste en aplicar a un espécimen cilíndrico una carga de compresión sinusoidal cíclica, en un rango de temperaturas y frecuencias de carga establecidas.

En la prueba de deformación permanente bajo carga de compresión axial cíclica, un espécimen cilíndrico es sometido a carga axial cíclica sinusoidal, con un pulso de carga de 0.1 s seguido por un periodo de reposo de 0.9 segundos, a una temperatura y frecuencia de carga específica. La prueba puede ser ejecutada con o sin presión de confinamiento.

El módulo de rigidez a flexión se puede determinar con la prueba de flexión repetida. En esta prueba una viga de mezcla asfáltica es sujeta a carga cíclica sinusoidal, para producir cierto nivel de deformación deseado (250 a 750  $\mu\epsilon$ ), a una frecuencia de 10 Hz y una temperatura de 20°C.

El modulo dinámico y el módulo de rigidez a flexión son utilizados para el diseño de pavimentos por métodos empírico mecanicistas. Mientras que la tasa de deformación es utilizada para estimar el número de flujo, el cual cuantifica la deformación permanente acumulada de la mezcla asfáltica.

El presente manual tiene por objetivo servir como apoyo en la ejecución de las pruebas de laboratorio utilizadas para evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica a utilizar en pavimentos asfálticos sujetos a tránsitos mayores a los  $20 \times 10^6$  ejes equivalentes.



# 1 MAC-VI Método de prueba para la preparación y compactación de losas de mezclas asfáltica en caliente

---

## 1.1. Objetivo

Este método de prueba cubre la compactación de especímenes prismáticos de mezcla asfáltica en caliente utilizando el compactador vibratorio o por amasado. Este método de prueba también hace referencia a la determinación de la gravedad específica de especímenes compactados en cualquier punto del proceso de compactación. Los especímenes compactados son empleados para determinar las propiedades volumétricas y físicas de la mezcla compactada, así como, monitorear la densidad de especímenes de prueba durante el proceso de compactación.

## 1.2. Equipo y herramientas

- **Compactador Vibratorio**, mecánico, electromecánico, electrohidráulico o electroneumático. Capaz de aplicar una carga vibratoria de 1000 a 1500 kg a través de un pisón conectado a una placa metálica.
- **Compactador amasado hidráulico**, con una serie de placas de acero alineadas verticalmente para compactar mezclas asfálticas moldeadas en placas planas y rectangulares de grosor y densidad predeterminados. Él debe contar con una rueda auto propulsada, equipada con un control de avance y retroceso. Capaz de aplicar una carga de 1000 a 1500 kg a través de la rueda de compactación en modo estático (sin vibración). El compactador debe ser capaz de fabricar un espécimen rectangular de aproximadamente 152 mm de ancho y 457 mm de largo o 300 mm de ancho y 400 mm de largo y un espesor de  $65 \pm 5$  mm.
- **Moldes para compactador vibratorio** de acero con un espesor mínimo de 6 mm, el molde de 410 mm de largo, 87 mm de ancho y 150 mm de altura.
- **Moldes para compactador por amasado** de acero con un espesor mínimo de 6 mm, el molde puede ser rectangular de 300 mm de ancho y 400 mm de largo.
- **Balanza** con resolución de 0.1 g y capacidad mínima de 10 000 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).

### 1.3. Calibraciones y/o verificaciones

- **Compactador Vibratorio**. Verificar la fuerza de aplicación de la carga. Se recomienda al menos una vez cada 12 meses.
- **Compactador por amasado**. Verificar la fuerza de aplicación de la carga. Se recomienda al menos una vez cada 12 meses.
- **Balanza**. Calibrar con una resolución de 0.1 g. Se recomienda que la calibración sea en al menos 5 puntos (2000, 4000, 6000, 8000, 10000 g) considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.
- **Termómetro**. Calibrar con una resolución de 0.1 °C. Se recomienda que la verificación sea en al menos 5 puntos (140, 150, 160, 170, 180 °C) considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.
- **Pirómetro**. Calibrar 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 al menos una vez cada 12 meses.
- **Horno**. Calibrar o verificar con una resolución de 1°C, en al menos cinco puntos (140, 150, 160, 170, 180 °C) considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.

### 1.4. Método de prueba

#### 1.4.1 Preparación de 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 este, 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
Los compactador vibratorio	390 x 75 x 80 $\pm$ 5 mm (Largo x ancho x altura)	5500 – 5800
Los compactador amasado	455 x 150 x 65 $\pm$ 5 mm (Largo x ancho x altura)	10 500 – 12 000
	300 x 400 x 65 $\pm$ 5 mm (Largo x ancho x altura)	21 000 – 24 000

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	$W_{bm} = \frac{W_s \times P_{bm}}{100 - P_{bm}}$	$P_{bm} = \frac{P_{bs}}{100 + P_{bs}}$

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

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

$W_s$ = Masa del agregado, g

$P_{bs}$ = 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 ( $P_{bm}$ ).

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

## 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 %**<sup>[Ref. 4]</sup>.

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 %**.

Nota 1.5 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 reducción de muestras de las pruebas de tamaño del agregado “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 a la temperatura de compactación y agregar líquido antiadherente al molde.

1.4.3.2 Colocar toda la mezcla en el molde, con un recipiente adecuado, a fin de que no se pierda material.

#### ***Compactación***

1.4.3.3 Compactar las vigas o la losa de acuerdo con las especificaciones del fabricante del equipo. El tiempo de compactación dependerá de la carga aplicada y de la altura final del espécimen compactado. Las dimensiones de la viga o losa de mezcla asfáltica serán los recomendados en la tabla 1.3.

**Tabla 1.3 Parámetros de compactación**

Compactador	Parámetro de control	Va [%]
Vibratorio	Altura: 80 mm ± 5mm	7 ± 1
Amasado Rectangular	Altura 65 mm ± 5mm	
Amasado Cuadrado	Altura 65 mm ± 5mm	

Nota 1.6 El porcentaje de vacíos se determinará en la viga después de compactar y antes del corte.

Va = vacíos de aire (Anexo A.2).

Nota 1.7 El tipo de aparato de compactación puede influenciar los resultados del ensayo. Es recomendado cortar la viga de una losa grande compactada con rodillo vibratorio.

Nota 1.8 Normalmente los especímenes de prueba son compactados usando un esfuerzo de compactación estándar. Sin embargo, el esfuerzo de compactación estándar puede no reproducir los vacíos de aire de los especímenes de la carretera. Si los especímenes son compactados a un contenido de vacíos específico, el esfuerzo de compactación a ser usado debe ser determinado experimentalmente.

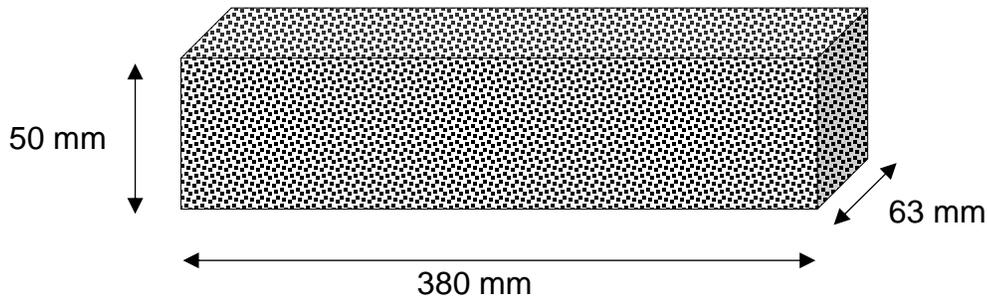
1.4.3.4 Permitir que las muestras se enfríen dentro del molde durante un periodo adecuado para evitar que se deforme al desmoldarlo. Extraer la muestra compactada del molde.

Nota 1.9 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.

1.4.3.5 Colocar la muestra sobre una superficie plana donde se pueda enfriar a temperatura ambiente.

1.4.3.6 Dejar fraguar los especímenes **24 horas** antes de cortar para obtener los especímenes de prueba. Retirar.

1.4.3.7 Cortar al menos 6 mm de ambos lados de cada espécimen de ensayo para obtener superficies paralelas y eliminar secciones con vacíos de aire altos en la superficie del espécimen. La dimensión final requerida, después del corte, de los especímenes son **380 ± 6 mm** de longitud, **50 ± 2mm** de altura y **63 ± 6 mm** de ancho, figura 1.1.



**Figura 1.1 Dimensiones del espécimen de ensayo**

1.4.3.8 Determinar la gravedad específica bruta del espécimen de ensayo ( $G_{mb}$ ) de acuerdo con la especificación del *Método estándar para determinar la gravedad específica bruta y densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada (MAC-II)*.

1.4.3.9 Determinar la gravedad específica teórica máxima ( $G_{mm}$ ) de acuerdo con la especificación del *Método estándar para determinar la gravedad específica teórica máxima y densidad de la mezcla asfáltica suelta (MAC-III)*.

1.4.3.10 Determinar el contenido de vacíos de cada viga y verificar que cumpla con el rango establecido de **6 ± 0.5%**.

#### **1.4.4 Almacenamiento de las muestras.**

Si los especímenes no serán ensayados dentro de dos días, envolverlos con plástico y colocarlos sobre una superficie plana y rígida, apoyado en la posición opuesta a la de prueba (sobre su altura), almacenarlos en un cuarto de temperatura controlada a una temperatura entre **5 y 15°C**. Los especímenes no deben ser apilados durante el almacenamiento.

## 1.4.5 Medición de las dimensiones del espécimen.

1.4.5.1 Medir el largo del espécimen de cada uno de los lados de la viga con una aproximación de 0.01 mm y determinar el promedio de las cuatro mediciones. Registrar el promedio con una aproximación de **0.1 mm**

1.4.5.2 Medir la altura y el ancho del espécimen con una aproximación de 0.01 mm en tres diferentes puntos a lo largo de la longitud del espécimen (centro, centro  $\pm 100$ mm). Determinar el promedio de las tres mediciones para cada una de las dimensiones y registrar los promedios con una aproximación de **0.1 mm**.

## 1.5. Registro de resultados

Tabla 1.4 Registro de resultados de Compactación (% G<sub>mm</sub>)

<b>Compactación (%G<sub>mm</sub>)</b> <i>ASTM D6925</i>	Identificación de la muestra:		
	Fecha de ensayo:		
	Temperatura de mezclado:		
	Temperatura de compactación:		
<b>RESULTADOS</b>		<b>Réplica</b>	
		<b>1</b>	<b>2</b>
(G <sub>mb</sub> ) Gravedad específica bruta del espécimen			
(G <sub>mm</sub> ) Gravedad específica teórica máxima de la mezcla			
(% G <sub>mm</sub> ) Grado de compactación			
<b>(% G<sub>mm</sub>) Grado de compactación promedio</b>			

## 1.6. Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados

No se cuenta con datos para establecer la repetibilidad y reproducibilidad.



## 2 MAC-VII Método de prueba para determinar el módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente

---

### 2.1. Objetivo

Determinar el valor del módulo dinámico y ángulo de fase de una mezcla asfáltica compactada, mediante una carga axial de compresión sinusoidal cíclica, en un rango de temperaturas y frecuencias de carga establecidas.

### 2.2. Equipo y herramientas

- **Máquina de ensayo**, servohidráulica capaz de aplicar una carga a compresión haversenocontrolada. La máquina de prueba debe aplicar carga en un rango de frecuencias de 0.1 a 10 Hz y niveles de esfuerzo mayores a 2800 KPa (400 psi). Para cargas sinusoidales, el error estándar de la carga aplicada debe ser menor al 10 por ciento. El error estándar de la carga aplicada es una medida de la diferencia entre los datos de carga medidos y el mejor ajuste sinusoidal.
- **Cámara ambiental**, para controlar la temperatura del espécimen de prueba a la temperatura deseada. La cámara ambiental debe ser capaz de controlar la temperatura del espécimen en un rango de temperaturas de -10 a 60 °C con una resolución de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . La cámara debe ser lo suficientemente grande para acomodar el espécimen de prueba y el espécimen de monitoreo con el termopar colocado en el centro para verificar la temperatura interna del mismo.
- **Sistema de medición**, controlado completamente por computadora, capaz de medir y registrar durante el ensayo la carga aplicada y la deformación axial. El sistema debe ser capaz de medir la carga sinusoidal aplicada y las deformaciones resultantes con una resolución de 0.5%. El rango y resolución del sistema de medición se presenta en la tabla 2.1.

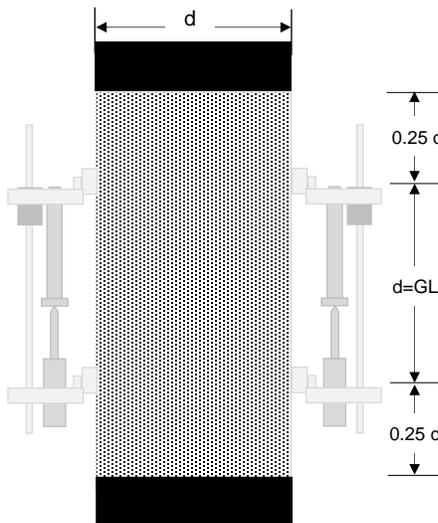
**Tabla 2.1 Precisión y resolución del sistema de medición**

Parámetro	Rango	Precisión	Resolución
Carga	0.12 a 25 kN	Error $\leq 0.0\%$	$\leq 0.0012\text{kN}$
Deformación	$\geq 1\text{ mm}$	Error $\leq 0.0025\text{ mm}$	$\leq 0.0002\text{ mm}$
Desfase entre la carga y la deformación	No especificado	$\leq 1\text{ grado}$	No especificado

- **Carga**, la carga debe ser medida con una celda de carga electrónica en contacto con uno de los extremos del espécimen. El sistema de medición de carga debe tener un rango mínimo de 0 a 25 kN con una resolución de 1.2 N.
- **Medición de la deformación**, con resolución mínima de 0.0002 mm. Las deformaciones axiales deben ser medidas con un transductor de desplazamiento vertical (LVDT) montado entre los pines pegados al espécimen, por ejemplo, como se muestra en la figura 2.1. Las deformaciones deben ser medidas en tres puntos a lo largo del espécimen, a 120° una de la otra. Los LVDTs deben tener un rango de medición de  $\pm 0.5$  mm. El sistema de medición de la deformación debe poder ajustarse a cero y debe tener los rangos definidos en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Requerimientos del sistema de medición de deformación**

Rango, mm (in)	Precisión, mm (in)
$\pm 0.5$ (0.01969)	0.0100 (0.00039)
$\pm 0.25$ (0.00984)	0.0050 (0.00020)
$\pm 0.125$ (0.00492)	0.0025 (0.00010)
$\pm 0.0625$ (0.00246)	0.0010 (0.00004)



**Figura 2.1 Esquema general de los puntos de medición (sin escala)**

- **Placa de carga**, de 104.5 mm  $\pm 0.5$  mm para colocar arriba y abajo del espécimen para transferir la carga de la máquina de prueba al espécimen. Generalmente, estas placas deben ser hechas de acero, de chapa de acero o aluminio anodizado de alta resistencia.

- **Cortadora**, una máquina para cortar los extremos de los especímenes de prueba a la longitud requerida y en un solo corte. El disco debe ser diamantado y de borde continuo.

Nota 2.1 La cortadora debe tener mecanismos para mantener y controlar la velocidad de corte. También es importante la rigidez de la hoja para evitar que se doble durante el corte.

- **Extractor de núcleos**, una máquina extractora con sistema de enfriamiento y punta de diamante para cortar especímenes de prueba de  $101.6 \pm 1$  mm de diámetro nominal.

Nota 2.2 Se recomienda una máquina extractora de núcleos con velocidad rotacional y alimentación vertical. La alimentación y velocidades pueden ser controladas por varios métodos.

- **Adaptadores de acero**, también conocidos como pines, para poder colocar los LVDT's al espécimen de prueba.
- **Dispositivo para pegar pines** con una configuración para pegar tres pares de pines a  $120^\circ$ , alineados verticalmente y con un espaciamiento de  $101.6 \pm 1$  mm, figura 2.2.
- **Probeta patrón metálica**, con un valor de módulo y ángulo de fase conocidos. Las dimensiones de la probeta son las siguientes: diámetro de 101.6 mm, altura de 200 mm y una separación entre los pines de 105 mm para montar los sensores de deformación, figura 2.3.
- **Termopar**, cable para monitorear la temperatura interna del espécimen con un rango de medición apropiado para las temperaturas de ensayo y una resolución de  $0.1^\circ\text{C}$ .
- **Vernier**, digital con un rango de medición de 0 a 200 mm y una resolución de 0.01 mm.
- **Taladro**, con una broca de diámetro ligeramente mayor que el diámetro del cable del termopar.



Figura 2.2 Dispositivo para pegar pines



Figura 2.3 Probeta metálica para verificación del sistema de medición

## 2.3. Calibraciones y/o verificaciones

- **Celda de carga**, calibrar la celda de carga en el rango de trabajo, al menos una vez al año, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante o cada 200 ensayos. El laboratorio de calibración deberá entregar los resultados en valores de voltaje.

- **Transductores de desplazamiento vertical (LVDTs).** Calibrar los sensores de desplazamiento con un calibrador de longitud como el que se muestra en la figura 2.4 o con un laboratorio de calibración acreditado. Se recomienda calibrarlos, en todo su rango de medición, antes de usarlos por primera vez, al menos una vez al año o después de cualquier cambio en la configuración electrónica del equipo donde se emplea el sensor.



**Figura 2.4 Calibrador para sensor de deformación (LVDT)**

- **Sistema de medición general.** Verificar que los componentes de medición (celda de carga y LVDT's) funcionen correctamente ejecutando un ensayo de módulo dinámico, a cualquier temperatura, con la probeta de referencia. Los valores del ángulo de fase y de módulo dinámico obtenidos deben ser iguales o próximos a los valores de referencia de la probeta metálica. Se recomienda verificar semanalmente, al iniciar un grupo de ensayos o de acuerdo con la intensidad de uso del equipo.
- **Sensores de temperatura.** Calibrar o verificar el sensor de temperatura de la cámara ambiental, así como el sensor para monitorear la temperatura del espécimen. Se recomienda verificarlos en el rango de trabajo y al menos una vez al año.

## 2.4. Método de prueba

### 2.4.1 Preparación de los especímenes de prueba

#### *Especímenes compactados en el laboratorio*

- 2.4.1.1 Fabricar la mezcla de acuerdo con el *Método estándar para la preparación y compactación de especímenes de mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador giratorio (MAC-I)*. La cantidad de mezcla a preparar deberá ajustarse al contenido de vacíos esperado en el espécimen compactado; el rango de masas aproximado para obtener de  $7 \pm 1$  % de vacíos de aire es de **6000 g a 7500 g**.

2.4.2.2 Compactar especímenes de 152.4 mm de diámetro y 170 mm de altura, de acuerdo con el *Método estándar para la preparación y compactación de especímenes de mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador giratorio (MAC-I)*, a un porcentaje de vacíos de aire adecuado para lograr un porcentaje de vacíos de aire en el espécimen de prueba (núcleo extraído) de **6 ± 0.5%**. Los especímenes deben ser fabricados en el compactador giratorio fijando como parámetro de compactación la altura del espécimen.

Nota 2.3 El ensayo deberá ejecutarse en especímenes de prueba (100 mm de diámetro y 150 mm de altura) que cumplan con las tolerancias de vacíos de aire especificados. Después de la extracción del núcleo del espécimen compactado, la muestra presentará comúnmente una reducción del porcentaje de vacíos entre el 1 y 2%.

2.4.2.3 Se recomienda permitir reposar los especímenes compactados al menos **24 h** antes de extraer los especímenes de prueba (núcleos).

Nota 2.4 La rigidez del espécimen varía con los días de reposo, para tener un valor cercano al máximo se recomienda permitir reposar al menos 5 días antes de realizar la extracción.

2.4.2.4 De los especímenes compactados se deberá extraer un núcleo de **101.6 ± 1 mm** de diámetro. El núcleo extraído deberá tener lados lisos, paralelos y libres de ranuras, bordes y escalonamientos.

2.4.2.5 Cortar los extremos del núcleo con una cortadora para obtener un espécimen de prueba de **150 ± 2.5 mm** de altura. Los extremos de todos los especímenes de prueba deben ser lisos, libres de bordes y escalonamientos y perpendiculares al eje del espécimen. Descartar los especímenes de prueba que no cumplan dichas condiciones.

2.4.2.5 El extremo del espécimen no debe alejarse de la perpendicular con respecto al eje del espécimen por más de un grado, equivalente a **2.7 mm** en **152.4 mm**. Este requisito debe ser verificado en cada uno de los especímenes utilizando un vernier y una escuadra.

## 2.4.2 Determinación del contenido de vacíos

2.4.2.1 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 de la mezcla asfáltica compactada (MAC-II)*.

2.4.2.2 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 densidad de la mezcla asfáltica (MAC-III)*.

2.4.2.3 Determinar el contenido de vacíos de la muestra

2.4.2.4 Descartar los especímenes extraídos con vacíos de aire que difieran por más del **0.5** por ciento de los vacíos de aire especificados de **6 ± 0.5%**.

Nota 2.5 En mezclas asfálticas no convencionales como pueden ser mezclas con altos contenidos de RAP o hule de llanta, el control de contenido de vacíos de aire en los especímenes extraídos será de  $7 \pm 1\%$ .

### **2.4.3 Réplicas**

Para el diseño de pavimentos se requieren como mínimo **tres** especímenes, para obtener el módulo dinámico promedio, y para obtener la curva maestra mínimo **dos** especímenes.

### **2.4.4 Almacenamiento de las muestras**

Si los especímenes de prueba (núcleos) no serán ensayados dentro de dos días posteriores a su extracción, se deberán envolver con plástico y ser almacenados en un cuarto de temperatura controlada entre **5 y 15°C**. Los especímenes no deben ser apilados durante su almacenamiento y se recomienda colocarlos de manera horizontal sobre una cama de material blando (arena, etilvinilacetato, espuma de poliuretano, etc.)

Nota 2.6 Para eliminar los efectos de envejecimiento (rigidización) en los resultados del ensayo, se recomienda que los especímenes de prueba no sean almacenados por más de dos semanas.

### **2.4.5 Medición de las dimensiones del espécimen**

2.4.5.1 Medir el diámetro del espécimen en la parte central, en los tercios superior e inferior y en diámetros perpendiculares. Determinar y registrar el diámetro promedio con una aproximación de **0.1 mm**. La desviación estándar de todas las mediciones deberá ser  $\leq 1.0 \text{ mm}$ , de lo contrario el espécimen deberá descartarse.

2.4.5.2 Medir la altura del espécimen en cuatro puntos opuestos, determinar y registrar la altura promedio con una aproximación de **0.1 mm**. La altura promedio del espécimen debe ser de  **$150 \pm 2.5 \text{ mm}$** , de lo contrario el espécimen deberá descartarse.

2.4.5.3 Pegar con adhesivo epóxico los pines de montaje, para la colocación de los LVDTs axiales. Permitir secar el adhesivo epóxico el tiempo indicado por el fabricante.

### **2.4.6 Preparación del espécimen para monitoreo de la temperatura interior**

2.4.6.1 Se deberá fabricar, adicionalmente, un espécimen de monitoreo que servirá para monitorear la temperatura interna de la mezcla asfáltica a evaluar. Este espécimen será de las mismas dimensiones y mezcla asfáltica que el espécimen de prueba.

2.4.6.2 Utilizando el taladro, perforar un orificio en el centro del espécimen de monitoreo hasta la mitad de su altura y retirar el polvo del interior del orificio.

2.4.6.3 Engrasar la punta de la sonda del termopar con grasa de silicón y meterla cuidadosamente dentro del orificio limpio.

2.4.6.4 Sellar el orificio en su parte externa con silicón y permitir que seque.

2.4.6.5 Colocar el espécimen dentro de la cámara de temperatura y conectar el termopar al sistema de adquisición de datos.

## 2.4.7 Ejecución de la prueba

### *Ejecución del ensayo para construir la curva maestra*

2.4.7.1 Colocar el espécimen dentro del aparato de carga y colocar los LVDTs en los pines de montaje. Asegurarse de que los tornillos de ajuste queden bien apretados para evitar movimientos del LVDT durante el ensayo. La figura 2.5 muestra el montaje de los tres LVDTs en un espécimen de prueba.

2.4.7.2 Conectar los cables de los LVDTs al sistema de adquisición de datos. Verificar que los LVDTs estén dentro de su rango de calibración.

2.4.7.3 Colocar la placa de acero sobre la parte superior del espécimen y centrar los dos con respecto al pistón de carga.



**Figura 2.5 Montaje de LVDTs**

2.4.7.4 Configurar en el archivo de prueba los niveles de esfuerzo a aplicar. En la tabla 2.3 se presentan niveles de esfuerzo recomendados de acuerdo con la temperatura de ensayo. El esfuerzo debe ser ajustado para obtener deformaciones axiales entre **50 y 125** microdeformaciones.

**Tabla 2.3 Niveles de esfuerzo dinámico típicos**

Temperatura °C	Rango kPa
-10	1400-2800
0	1000-1400
10	500-1000
20	350-600
30	100-400
40	50-200

2.4.7.5 Configurar en el archivo de prueba el esfuerzo de contacto, se recomienda un cinco por ciento del esfuerzo que será aplicado al espécimen.

2.4.7.6 Configurar en el archivo de prueba las frecuencias y número de ciclos, tabla 2.4. Se recomienda iniciar de las frecuencias bajas a las altas.

**Tabla 2.4 Número de ciclos para la secuencia de ensayo**

Frecuencia (Hz)	Número de ciclos
0.1	15
0.5	15
1.0	20
5.0	100
10.0	200

2.4.7.7 Configurar en el archivo de prueba el periodo de reposo entre cada frecuencia. Se recomienda un periodo de reposo de **4 min**.

2.4.7.8 Configurar la temperatura de la cámara y permitir que el espécimen se acondicione a la temperatura de ensayo especificada con una tolerancia de  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ . Usar el espécimen de monitoreo para determinar el momento en que el espécimen alcanza la temperatura especificada de ensayo (figura 2.6). La secuencia de evaluación de las temperaturas y los tiempos recomendados de acondicionamiento de la muestra se presentan en la tabla 2.5.

**Tabla 2.5 Secuencia y tiempos de acondicionamiento de temperatura**

Temperatura del espécimen. °C	Tiempo de acondicionamiento, h
20	3
-10	4
0	4
10	4

30	4
40	4

- 2.4.7.9 Ejecutar el ensayo y verificar que los resultados cumplan con los límites indicados en la tabla 2.6. Si no se cumple con dicha dispersión esto puede indicar que el espécimen no está bien centrado y la carga no está aplicándose uniformemente o que los extremos del espécimen no son paralelos.
- 2.4.7.10 La suma de la deformación permanente en un barrido de frecuencias a una temperatura no deberá ser mayor a **1500 $\mu\epsilon$** . En caso de que esto suceda se deberá reducir el nivel de esfuerzo a la mitad. Guardar los datos del ensayo hasta el siguiente periodo de reposo, descartar el espécimen, y usar uno nuevo para el resto de las frecuencias de ensayo bajo condiciones de carga reducida.
- 2.4.7.11 Con los resultados de todas las temperaturas de ensayo construir las isothermas del valor de módulo dinámico, si alguna de ellas se cruza es un indicador de que el ensayo realizado a esa temperatura no se ejecutó correctamente y es necesario repetirlo.



**Figura 2.6 Instrumentación y acondicionamiento de los especímenes de prueba**

### **Ejecución del ensayo para obtener la referencia de diseño**

2.4.7.12 Realizar la misma secuencia de ensayo descrita en los puntos 2.4.7.1a2.4.7.10,a dos temperaturas:**20°C y 10 °C**.

2.4.7.13 Una vez finalizados los ensayos, y si la deformación permanente acumulada no fue mayor a **1500  $\mu\epsilon$** , el espécimen puede ser utilizado para realizar el ensayo de número de flujo.

## **2.5. Cálculos**

**2.5.1 El software del equipo para realizar el ensayo de módulo dinámico realiza automáticamente el cálculo del módulo dinámico, ángulo de fase y de los indicadores de calidad de los datos.**

### **2.5.2 Estadística de calidad de los datos**

Además, del módulo dinámico y ángulo de fase determinados en el ensayo es necesario verificar la estadística de calidad de los datos obtenidos mediante cuatro indicadores de calidad:

- Error estándar del esfuerzo aplicado
- Error estándar de las mediciones de deformación
- El coeficiente de variación de las mediciones de deformación
- Desviación estándar de las mediciones del ángulo de fase

Estos indicadores de calidad son usados para verificar la confiabilidad de los datos. La tabla 2.6 presenta los límites recomendados para dichos indicadores.

**Tabla 2.6 Límites recomendados para los indicadores de calidad de los datos**

<b>Indicador</b>	<b>Límite</b>
Error estándar del esfuerzo aplicado	$\leq 10\%$
Error estándar promedio de la medición de deformaciones	$\leq 10\%$
Coeficiente de variación de las mediciones de deformación	$\leq 30\%$
Desviación estándar de las mediciones del ángulo de fase	$\leq 3$ grados

En algunas ocasiones la calidad de los datos puede verse afectada por algunos factores. La tabla 2.7 presenta algunas acciones que pueden tomarse para mejorar la calidad de los datos.

**Tabla 2.7 Guía de solución de problemas para la estadística de calidad de los datos**

Problema	Causa	Posible solución
La deformación no se produce en la dirección de la carga aplicada	Los pines se están despegando	Reducir la fuerza del resorte Agregar resortes Reducir la temperatura de prueba
Deformación pico a pico demasiado alta	El nivel de carga es demasiado alto	Reducir el nivel de carga
Deformación pico a pico demasiado baja	El nivel de carga es demasiado bajo	Aumentar el nivel de carga
error estándar de carga >10%	La carga aplicada no es sinusoidal	Ajustar las ganancias
	Pin flojo	Revisar los pines y volverlo a pegar si alguno está suelto
	Ruido excesivo en la señal de deformación	Revisar el cableado de los sensores de deformación.
	LVDT dañado	Reemplazar el LVDT
C.V de la deformación >30%	Carga excéntrica	Verificar que el espécimen está alineado apropiadamente
	Pin suelto	Revisar los pines. Volver a pegar si alguno está suelto
	Los extremos del espécimen no son paralelos	Verificar el paralelismo de los extremos del espécimen. Rectificar los extremos si están fuera de tolerancia
	LVDT mal colocado	Revisar la no uniformidad del espécimen en los vacíos de aire (segregación de agregado). Cambiar la ubicación de los pines.
	No hay una distribución uniforme de vacíos de aire	Asegurarse que el espécimen de prueba sea extraído del centro del espécimen compactado.
Desviación estándar del ángulo de fase > 3°	Carga excéntrica	Verificar que el espécimen está alineado apropiadamente
	Pin suelto	Revisar los pines. Volver a pegar si alguno está suelto
	LVDT mal colocado	Revisar la no uniformidad del espécimen en los vacíos de aire (segregación de agregado). Cambiar la ubicación de los pines.
	LVDT dañado	Reemplazar el LVDT

**2.5.3** El coeficiente de variación (**CV**) del módulo dinámico entre especímenes de ensayo debe ser menor o igual a **15%**, en cada una de las frecuencias.

## **2.6. Registro de resultados**

Reportar la siguiente información para cada uno de los especímenes:

- Gravedad específica teórica máxima ( $G_{mm}$ ), gravedad específica bruta ( $G_{mb}$ ) y porcentaje de vacíos de aire del espécimen de prueba
- Temperatura del espécimen (interior y exterior)
- Frecuencia del ensayo
- Módulo dinámico ( $|E^*|$ )
- Ángulo de fase ( $\delta$ )
- Magnitud de la deformación promedio ( $\varepsilon$ )
- Magnitud del esfuerzo ( $\sigma$ )
- Error estándar de la carga aplicada (SE)
- Error estándar promedio de la medición de deformaciones (SE)
- Coeficiente de variación para las mediciones de deformación (C.V)
- Desviación estándar para las mediciones del ángulo de fase (SD)



## 2.7. Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados

El coeficiente de variación de repetibilidad ( $CV_r$ ) del módulo dinámico y la desviación estándar de repetibilidad ( $S_r$ ) del ángulo de fase están en función del módulo dinámico de la mezcla y el tamaño nominal máximo del agregado. La tabla 2.9 presenta la repetibilidad de la prueba de modulo dinámico.

**Tabla 2.9 Repetibilidad para el modulo dinámico y ángulo de fase**

TNM mm	$ E^* _{prom}$ MPa	Modulo dinámico						$S_r$ (°)	Angulo de fase				
		$CV_r$ (%)	rango aceptable para n especímenes, % del promedio						rango aceptable para n especímenes, grados				
			n=2	n=3	n=4	n=5	n=6		n=2	n=3	n=4	n=5	n=6
9.5	≥ 137 a < 200	15	43	51	55	60	61	1.8	5.1	6.0	6.5	7.1	7.3
9.5	≥ 200 a < 500	13	36	42	46	50	51	1.5	4.2	4.9	5.4	5.8	6.0
9.5	≥ 500 a < 1000	11	31	36	39	43	44	1.3	3.5	4.1	4.5	4.9	5.0
9.5	≥ 1000 a < 2000	9	26	31	34	37	38	1.1	3.0	3.5	3.8	4.2	4.3
9.5	≥ 2000 a < 5000	8	22	26	28	31	31	0.9	2.5	2.9	3.2	3.4	3.5
9.5	≥ 5000 a < 10 000	7	19	22	24	26	27	0.7	2.1	2.4	2.6	2.9	2.9
9.5	≥ 10 000 a < 16 400	6	16	19	21	23	23	0.6	1.8	2.1	2.3	2.4	2.5
12.5	≥ 137 a < 200	17	47	55	60	65	67	1.9	5.4	6.4	7.0	7.6	7.8
12.5	≥ 200 a < 500	14	39	46	50	54	55	1.6	4.5	5.3	5.7	6.2	6.4
12.5	≥ 500 a < 1000	12	33	39	42	46	47	1.3	3.7	4.4	4.8	5.2	5.3
12.5	≥ 1000 a < 2000	10	28	33	36	39	40	1.1	3.2	3.8	4.1	4.4	4.6
12.5	≥ 2000 a < 5000	8	23	28	30	33	33	0.9	2.6	3.1	3.4	3.7	3.7
12.5	≥ 5000 a < 10 000	7	20	23	25	28	28	0.8	2.2	2.6	2.8	3.1	3.1
12.5	≥ 10 000 a < 16 400	6	17	20	22	24	24	0.7	1.9	2.2	2.4	2.6	2.7
19.0	≥ 137 a < 200	20	56	66	72	78	80	2.2	6.3	7.4	8.1	8.7	9.0
19.0	≥ 200 a < 500	16	46	54	59	64	65	1.8	5.2	6.1	6.6	7.2	7.4
19.0	≥ 500 a < 1000	14	38	45	49	53	55	1.5	4.3	5.1	5.6	6.0	6.2
19.0	≥ 1000 a < 2000	12	32	38	42	45	46	1.3	3.7	4.3	4.7	5.1	5.3
19.0	≥ 2000 a < 5000	9	27	31	34	37	38	1.1	3.0	3.6	3.9	4.2	4.3
19.0	≥ 5000 a < 10 000	8	22	26	28	31	32	0.9	2.5	3.0	3.3	3.5	3.6
19.0	≥ 10 000 a < 16 400	7	19	22	24	26	27	0.8	2.2	2.6	2.8	3.0	3.1
25.0	≥ 137 a < 200	24	66	78	85	92	94	2.6	7.2	8.4	9.2	10.0	10.2
25.0	≥ 200 a < 500	19	53	62	68	74	76	2.1	5.9	6.9	7.6	8.2	8.4
25.0	≥ 500 a < 1000	16	44	51	56	61	62	1.8	4.9	5.8	6.4	6.9	7.1
25.0	≥ 1000 a < 2000	13	37	43	47	51	52	1.5	4.2	5.0	5.4	5.9	6.0
25.0	≥ 2000 a < 5000	11	29	35	38	41	42	1.2	3.5	4.1	4.5	4.8	4.9
25.0	≥ 5000 a < 10 000	9	24	29	31	34	35	1.0	2.9	3.4	3.7	4.0	4.1
25.0	≥ 10 000 a < 16 400	7	20	24	26	28	29	0.9	2.5	2.9	3.2	3.4	3.5

Nota: El rango calibrado del AMPT es de 137 MPa a 16 400 MPa.

El coeficiente de variación ( $CV_R$ ) de reproducibilidad del módulo dinámico y la desviación estándar ( $S_R$ ) del ángulo de fase está en función del módulo dinámico de la mezcla. La tabla 2.10 presenta el coeficiente de variación de reproducibilidad.

**Tabla 2.10 Reproducibilidad para el modulo dinámico y ángulo de fase**

$ E^* _{prom}$ MPa	Modulo dinámico						$S_R$ (°)	Angulo de fase				
	$S_R$ (%)	rango aceptable para n especimenes, % del promedio						rango aceptable para n especimenes, grados				
		n=2	n=3	n=4	n=5	n=6		n=2	n=3	n=4	n=5	n=6
$\geq 137$ a $< 200$	47	33	27	23	21	19	5.5	3.9	3.2	2.8	2.5	2.3
$\geq 200$ a $< 500$	36	25	21	18	16	15	4.1	2.9	2.4	2.1	1.9	1.7
$\geq 500$ a $< 1000$	28	20	16	14	13	12	3.2	2.2	1.8	1.6	1.4	1.3
$\geq 1000$ a $< 2000$	23	16	13	11	10	9	2.5	1.8	1.4	1.3	1.1	1.0
$\geq 2000$ a $< 5000$	18	12	10	9	8	7	1.9	1.3	1.1	0.9	0.8	0.8
$\geq 5000$ a $< 10\ 00$	14	10	8	7	6	6	1.4	1.0	0.8	0.7	0.6	0.6
$\geq 10\ 000$ a $< 16\ 400$	11	8	6	6	5	5	1.1	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5

Nota: El rango calibrado del AMPT es de 137 MPa a 16 400 MPa.

### 3 MAC-VIII Método de prueba para la determinación de la deformación permanente en la mezcla asfáltica sujeta a una carga de compresión axial cíclica

---

#### 3.1. Objetivo

Determinar la deformación permanente acumulada por ciclo de una mezcla asfáltica compactada, mediante una carga de compresión axial cíclica sinusoidal, a una temperatura y frecuencia de carga específica; así como calcular el parámetro de la tasa de deformación ( $\dot{\epsilon}$ ).

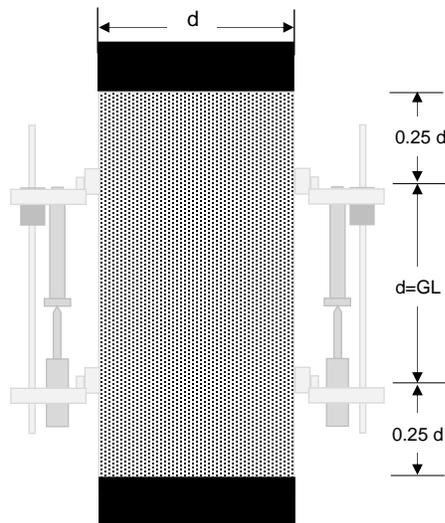
#### 3.2. Equipo y herramientas

- **Máquina de ensayo** servohidráulica capaz de aplicar una carga a compresión sinusoidal controlada. La máquina de prueba debe ser capaz de aplicar la carga en un rango de frecuencias de 0.1 a 10 Hz y niveles de esfuerzo vertical entre 10 y 1000 kPa. Para cargas sinusoidales, el error estándar de la carga aplicada debe ser menor al 5 por ciento. El error estándar de la carga aplicada es una medida de la diferencia entre los datos de carga medidos y el mejor ajuste sinusoidal.
- **Cámara ambiental** para controlar la temperatura del espécimen de prueba a la temperatura deseada. La cámara ambiental debe ser capaz de controlar la temperatura del espécimen en un rango de temperaturas de 30 a 60 °C con una resolución de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . La cámara debe ser lo suficientemente grande para acomodar el espécimen de prueba y el espécimen de monitoreo con el termopar colocado en el centro para verificar la temperatura interna del mismo.
- **Placa de carga** de 104.5 mm  $\pm 0.5$  mm para colocar arriba y abajo del espécimen para transferir la carga de la máquina de prueba al espécimen. Generalmente, estas placas están hechas de acero, de chapa de acero o aluminio anodizado de alta resistencia.
- **Sistemas de medición**, controlado completamente por computadora, capaz de medir y registrar durante el ensayo la carga aplicada y la deformación axial medida. El sistema debe ser capaz de medir la carga sinusoidal aplicada y las deformaciones resultantes con una resolución mínima de 0.5%. El rango y resolución del sistema de medición se presentan en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Precisión y resolución del sistema de medición**

Parámetro	Rango	Precisión	Resolución
Carga	0.12 a 13.5 kN	Error $\leq 1.0 \%$	$\leq 0.0012\text{kN}$
Desplazamiento del actuador	$\geq 12 \text{ mm}$	Error $\leq 0.03 \text{ mm}$	$\leq 0.0025 \text{ mm}$
Deformación	$\geq 5.0 \text{ mm}$	Error $\leq 0.0025 \text{ mm}$	$\leq 0.0002 \text{ mm}$
Presión de confinamiento	35 a 400 kPa	Error $\leq 1.0 \%$	$\leq 0.5 \text{ kPa}$

- **Carga**, la carga debe ser medida con una celda de carga electrónica en contacto con uno de los extremos del espécimen. El sistema de medición de carga debe tener un rango mínimo de 0.12 a 13.5 kN con una resolución mínima de 1.2 N.
- **Medición de la deformación**, con resolución mínima de 0.0002mm. Las deformaciones axiales deben ser medidas con un transductor de desplazamiento vertical (LVDT) montado entre los pines pegados al espécimen, por ejemplo, como se muestra en la figura 3.1. Las deformaciones deben ser medidas en tres puntos a lo largo del espécimen, a  $120^\circ$  una de la otra. Se recomienda utilizar LVDTs con un rango de medición de  $\pm 2.5 \text{ mm}$ , siendo este lo suficientemente amplio para registrar la deformación de los especímenes con baja capacidad de carga. El sistema de medición de la deformación debe poder ajustarse a cero y debe tener el rango y resolución definidos en la tabla 3.2.



**Figura 3.1 Esquema general de los puntos de medición (sin escala)**

**Tabla 3.2 Requerimientos del sistema de medición de deformación para la prueba de deformación permanente bajo carga axial cíclica**

Rango, mm (in)	Resolución, mm (in)
± 2.5 (0.09843)	0.0500 (0.00197)
± 1.5 (0.05906)	0.0300 (0.00118)

- **Cortadora**, una máquina para cortar los extremos de los especímenes de prueba a la longitud requerida y en un solo corte. El disco debe ser diamantado y de borde continuo.

Nota 3.1 La cortadora debe contar con mecanismos para mantener y controlar la velocidad de corte. También es importante la rigidez de la hoja para evitar que se doble durante el corte.

- **Extractora de núcleos**, una máquina extractora con sistema de enfriamiento y punta de diamante para cortar especímenes de prueba de 101.6 mm de diámetro nominal.

Nota 3.2 Se recomienda una maquina extractora de núcleos con velocidad rotacional y alimentación vertical. La alimentación y velocidades pueden ser controladas por varios métodos.

- **Adaptadores de acero**, también conocidos como pines, para poder colocar los LVDT's al espécimen de prueba.
- **Dispositivo para pegar pines**, con una configuración para pegar tres pares de pines a 120°, alineados verticalmente y con un espaciamiento de 101.6±1 mm, figura 3.2.
- **Probeta patrón metálica**, con un valor de módulo y ángulo de fase conocidos. Las dimensiones de la probeta son las siguientes: diámetro de 101.6 mm, altura de 200 mm y una separación entre los pines de 105 mm para montar los sensores de deformación, figura 3.3.
- **Termopar**, para monitorear la temperatura interna del espécimen con un rango de medición apropiado para las temperaturas de ensayo y una resolución de 0.1°C.
- **Vernier**, digital con un rango de medición de 0 a 200 mm y una resolución de 0.01 mm.
- **Taladro**, con una broca de diámetro ligeramente mayor que el diámetro del cable del termopar.



Figura 3.2 Dispositivo para pegar pines

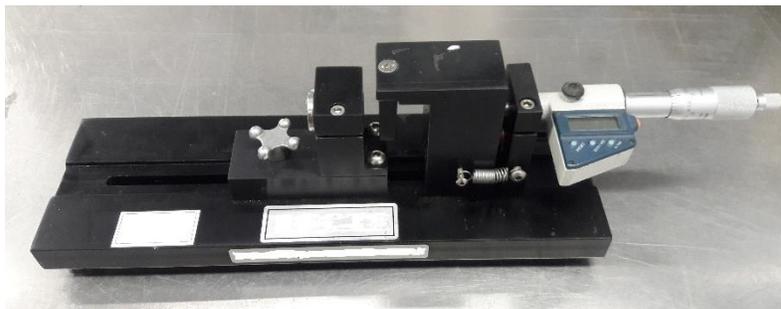


Figura 3.3 Probeta metálica para verificación del sistema de medición

### 3.3. Calibraciones y/o verificaciones

- **Celda de carga.** Calibrar la celda de carga en el rango de trabajo, al menos una vez al año, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante o cada 200 ensayos. El laboratorio de calibración deberá entregar los resultados en valores de voltaje.
- **Transductores de desplazamiento vertical (LVDTs).** Calibrar los sensores de desplazamiento con un calibrador de longitud como el que se muestra en la figura 3.4 o con un laboratorio de calibración acreditado. Se recomienda calibrarlos, en todo su rango de medición, antes de usarlos por primera vez,

al menos una vez al año o después de cualquier cambio en la configuración electrónica del equipo donde se emplea el sensor.



**Figura 3.4 Calibrador de sensor de deformación (LVDT)**

- **Sistema de medición general.** Verificar que los componentes de medición (celda de carga y LVDT's) funcionen correctamente ejecutando un ensayo de módulo dinámico, a cualquier temperatura, con la probeta de referencia. Los valores del ángulo de fase y de módulo dinámico obtenidos deben ser iguales o próximos a los valores de referencia de la probeta metálica. Se recomienda verificar semanalmente, al iniciar un grupo de ensayos o de acuerdo con la intensidad de uso del equipo.
- **Sensores de temperatura.** Calibrar o verificar el sensor de temperatura de la cámara ambiental, así como el sensor para monitorear la temperatura del espécimen. Se recomienda verificarlos en el rango de trabajo y al menos una vez al año.

## 3.4. Método de prueba.

### 3.4.1 Preparación de los especímenes de prueba.

#### *Especímenes compactados en el laboratorio*

- 3.4.1.1 Fabricar la mezcla de acuerdo con el *Método estándar para la preparación y compactación de especímenes de mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador giratorio (MAC-I)*. La cantidad de mezcla a preparar deberá ajustarse al contenido de vacíos esperado en el espécimen compactado; el rango de masas aproximado para obtener de un  $7 \pm 1\%$  de vacíos de aire es de **5900 g a 6500 g**.
- 3.4.1.2 Compactar especímenes de **152.4 mm** de diámetro y **170 mm** de altura, de acuerdo con el *Método estándar para la preparación y compactación de especímenes de mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador giratorio (MAC-I)*, a un porcentaje de vacíos de aire adecuado para lograr un porcentaje de vacíos de aire en el espécimen de prueba (núcleo) de  $6 \pm 0.5\%$ . Los especímenes deben ser fabricados en el compactador giratorio fijando como parámetro de terminación la altura del espécimen.

Nota 3.1 El ensayo deberá ejecutarse en especímenes de prueba (100 mm de diámetro y 150 mm de altura) que cumplan con las tolerancias de vacíos de aire especificados. Después de la extracción del núcleo del espécimen compactado, la muestra presentará comúnmente una reducción del porcentaje de vacíos entre el 1 y 2%.

2.4.2.6 Se recomienda permitir reposar los especímenes compactados al menos **24** hantes de extraer los especímenes de prueba (núcleos).

Nota 3.1 La rigidez del espécimen varia con los días de reposo, para tener un valor cercano al máximo se recomienda permitir reposar al menos 5 días antes de realizar la extracción.

3.1.4.3 De los especímenes compactados se deberá extraer un núcleo de **101.6±1mm** de diámetro. El núcleo extraído deberá tener lados lisos, paralelos y libres de ranuras, bordes y escalonamientos.

3.1.4.4 Cortar los extremos del núcleo con una cortadora para obtener un espécimen de prueba de **150 ± 2.5** mm de altura. Los extremos de todos los especímenes de prueba deben ser lisos, libres de bordes y escalonamientos y perpendiculares al eje del espécimen. Rechazar los especímenes de prueba que no cumplan dichas condiciones.

3.1.4.5 El extremo del espécimen no debe alejarse de la perpendicular con respecto al eje del espécimen por más de un grado, equivalente a 2.7 mm en 152.4 mm. Este requisito debe ser verificado en cada uno de los especímenes utilizando un vernier y una escuadra.

### **3.4.2 Determinación del contenido de vacíos.**

3.4.2.1 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 de la mezcla asfáltica compactada* (MAC-II).

3.4.2.2 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 densidad de la mezcla asfáltica* (MAC-III).

3.4.2.3 Determinar el contenido de vacíos de la muestra.

3.4.2.4 Descartar los especímenes extraídos con vacíos de aire que difieran por más del **0.5** por ciento de los vacíos de aire especificados de **6 ± 0.5%**.

Nota 3.2 En mezclas asfálticas no convencionales como pueden ser mezclas con altos contenidos de RAP o hule de llanta, el control de contenido de vacíos de aire en los especímenes extraídos será de **7 ± 1%**.

### **3.4.3 Replicas.**

Para el diseño de pavimentos se requieren como mínimo tres especímenes, para obtener el promedio de la deformación permanente acumulada al número de ciclos especificado y la tasa de deformación promedio. Para el control de calidad en campo se puede utilizar un solo espécimen para verificar el cumplimiento de los parámetros especificados.

### **3.4.4 Almacenamiento de las muestras.**

Si los especímenes de prueba (núcleos) no serán ensayados dentro de dos días posteriores a su extracción, se deberán envolver con plástico y ser almacenados en un cuarto de temperatura controlada entre **5 y 15°C**. Los especímenes no deben ser apilados durante su almacenamiento y se recomienda sean colocados de manera horizontal sobre una cama de material blando (arena, etilvinilacetato, espuma de poliuretano, etc.)

Nota 3.2 Para eliminar los efectos de envejecimiento (rigidización) en los resultados del ensayo, se recomienda que los especímenes de prueba no sean almacenados por más de dos semanas.

### **3.4.5 Medición de las dimensiones del espécimen.**

3.4.5.1 Medir el diámetro del espécimen en la parte central, en los tercios superior e inferior y en diámetros perpendiculares. Determinar el diámetro promedio y registrarlo con una aproximación de **0.1 mm**. La desviación estándar de todas las mediciones deberá ser  $\leq 1.0$  mm, de lo contrario el espécimen deberá descartarse.

3.4.5.2 Medir la altura del espécimen en cuatro puntos opuestos, determinar la altura promedio y registrarla con una aproximación de **0.1 mm**. La altura promedio del espécimen debe ser de **150 ± 2.5 mm**, de lo contrario el espécimen deberá descartarse.

3.4.5.3 Pegar con adhesivo epóxico los pines de montaje, para la colocación de los LVDTs axiales. Permitir secar el adhesivo epóxico el tiempo indicado por el fabricante previo a la colocación de los LVDTs.

### **3.4.6 Preparación del espécimen para monitoreo de la temperatura interior.**

3.4.6.1 Se deberá fabricar, adicionalmente, un espécimen de monitoreo que servirá para monitorear la temperatura interna de la mezcla asfáltica de evaluación. Este espécimen será igual en dimensiones y mezcla asfáltica que el espécimen de prueba.

3.4.6.2 Utilizando el taladro, perforar un orificio en el centro del espécimen de monitoreo hasta la mitad de su altura y retirar el polvo del interior del orificio.

3.4.6.3 Engrasar la punta de la sonda del termopar con grasa de silicón y meterla cuidadosamente dentro del orificio limpio.

3.4.6.4 Sellar el orificio en su parte externa con silicón y permitir que seque.

3.4.6.5 Colocar el espécimen dentro de la cámara de temperatura y conectar el termopar al sistema de adquisición de datos.

### **3.4.7 Ejecución de la prueba**

#### ***Ensayo sin confinamiento***

- 3.4.7.1 Colocar el espécimen dentro del aparato de carga y colocar los LVDTs en los pines de montaje. Asegurarse de que los tornillos de ajuste queden bien apretados para evitar movimientos del LVDT durante el ensayo. La figura 3.5 muestra el montaje de los tres LVDTs en un espécimen de prueba.



**Figura 3.5 Montaje de LVDTs**

- 3.4.7.2 Conectar los cables de los LVDTs al sistema de adquisición de datos. Verificar que los LVDTs estén dentro de su rango de calibración y en una posición inicial donde permita obtener el mayor margen de medición del LVDT.
- 3.4.7.3 Colocar la placa de acero sobre la parte superior del espécimen y centrar ambos con respecto al pistón de carga.
- 3.4.7.4 Configurar la temperatura de la cámara y permitir que el espécimen de prueba se acondicione a la temperatura de ensayo especificada con una tolerancia de  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ . Utilizar el espécimen de monitoreo para determinar el momento en que el espécimen alcanza la temperatura especificada de ensayo. Las temperaturas de prueba comúnmente utilizadas para este ensayo se encuentran en un rango de **30 a 60 °C**.

- 3.4.7.5 Permitir que la temperatura del espécimen de monitoreo alcance la temperatura de prueba y permitir que ambos especímenes (prueba y monitoreo) se acondicionen por **1 hora** más a partir de que la temperatura de prueba fue alcanzada por el espécimen de monitoreo.
- 3.4.7.6 Se recomienda utilizar la configuración del ensayo como “Flow Number / Dynamic Creep” si el software del equipo lo permite.
- 3.4.7.7 Configurar el nivel de esfuerzo vertical a aplicar utilizando el software del equipo. Los niveles de esfuerzo comúnmente utilizados se encuentran en un rango de **200 a 600 kPa**.
- 3.4.7.8 Configurar el esfuerzo de contacto utilizando el software; se recomienda un **5%** del esfuerzo vertical que será aplicado durante el ensayo.
- 3.4.7.9 Configurar la frecuencia de carga que se aplicará al espécimen, así como la duración de cada ciclo de carga. Las frecuencias de carga y tiempos de duración de ciclo comúnmente utilizados se indican en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3 Frecuencias de carga**

Frecuencia	Duración de carga (s)	Duración de reposo (s)	Duración total del ciclo (s)
1	1.0	1.0	2.0
5	0.2	0.8	1.0
10	0.1	0.9	1.0

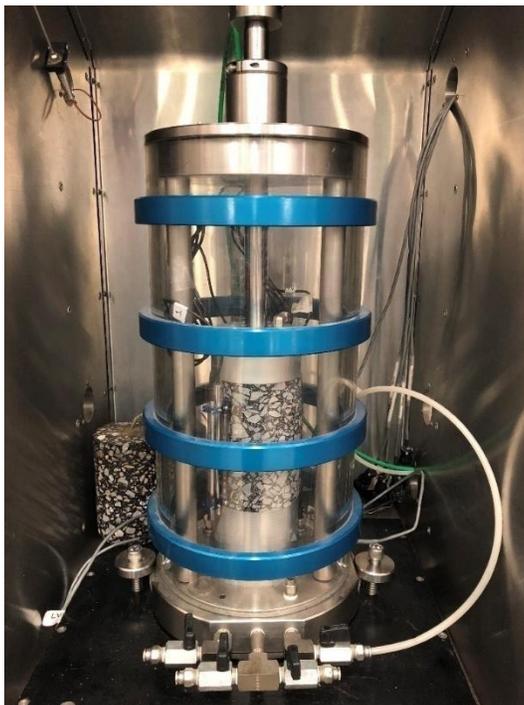
- 3.4.7.10 Configurar el número de ciclos de aplicación de la carga.

### ***Ensayo con confinamiento***

- 3.4.7.11 Montar el soporte para la cámara de confinamiento dentro del equipo.
- 3.4.7.12 Colocar el espécimen dentro del soporte de la cámara de confinamiento y ajustar los LVDTs en los pines de montaje. Asegurarse de que los tronillos de ajuste queden bien apretados para evitar movimientos del LVDT durante el ensayo. La figura 3.6 muestra el montaje de los LVDTs en un espécimen de prueba.
- 3.4.7.13 Conectar los cables de los LVDTs al sistema de adquisición de datos. Verificar que los LVDTs estén dentro de su rango de calibración y en una posición inicial donde permita obtener el mayor margen de medición del LVDT. La conexión de los LVDTs al sistema de recolección de datos del equipo deberá ajustarse con conexiones especiales para utilizar dentro de la cámara de confinamiento, figura 3.7.
- 3.4.7.18 Colocar un sensor de temperatura adicional o un termómetro de mercurio, dentro de la cámara de confinamiento, para determinar el momento en que la temperatura interna de la cámara alcanza la temperatura de ensayo.
- 3.4.7.19 Colocar la cubierta de la cámara de confinamiento, asegurándose se encuentre completamente sellada.



**Figura 3.6 Montaje de LVDTs**



**Figura 3.7 Cámara de confinamiento**

3.4.7.20 Conectar el sistema de aire comprimido para aplicar la presión de confinamiento durante el ensayo.

3.4.7.21 Configurar la temperatura de la cámara y permitir que el espécimen de prueba se acondicione a la temperatura de ensayo especificada con una tolerancia de  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ . Se recomienda calibrar previamente el tiempo adicional requerido para que el espécimen de prueba alcance la temperatura de prueba, una vez que la cámara ha llegado a la misma. Las temperaturas de prueba comúnmente utilizadas para este ensayo se encuentran en un rango de **30 a 60 °C**.

Nota 3.3 En el ensayo con confinamiento, no es posible utilizar el espécimen de monitoreo, debido al reducido espacio dentro de la cámara de confinamiento.

3.4.7.22 Permitir que la temperatura del espécimen de prueba acondicione por **1 hora** más a partir de que se estime que la temperatura de prueba fue alcanzada.

3.4.7.23 Configurar el nivel de esfuerzo horizontal (confinamiento) utilizando el software del equipo. Los niveles de esfuerzo horizontal comúnmente utilizados se encuentran en un rango de **100 a 400 kPa**.

3.4.7.24 Se recomienda utilizar la configuración del ensayo como “Flow Number / Dynamic Creep” si el software del equipo lo permite.

3.4.7.25 Configurar el nivel de esfuerzo vertical a aplicar utilizando el software del equipo. Los niveles de esfuerzo comúnmente utilizados se encuentran en un rango de **200 a 600 kPa**.

3.4.7.26 Configurar el esfuerzo de contacto utilizando el software; se recomienda un **5%** del esfuerzo vertical que será aplicado durante el ensayo.

3.4.7.27 Configurar la frecuencia de carga que se aplicará al espécimen, así como la duración de cada ciclo de carga. Las frecuencias de carga y tiempos de duración de ciclo comúnmente utilizados se indican en la tabla 3.3.

3.4.7.28 Configurar el número de ciclos de aplicación de la carga.

## 3.5. Cálculos

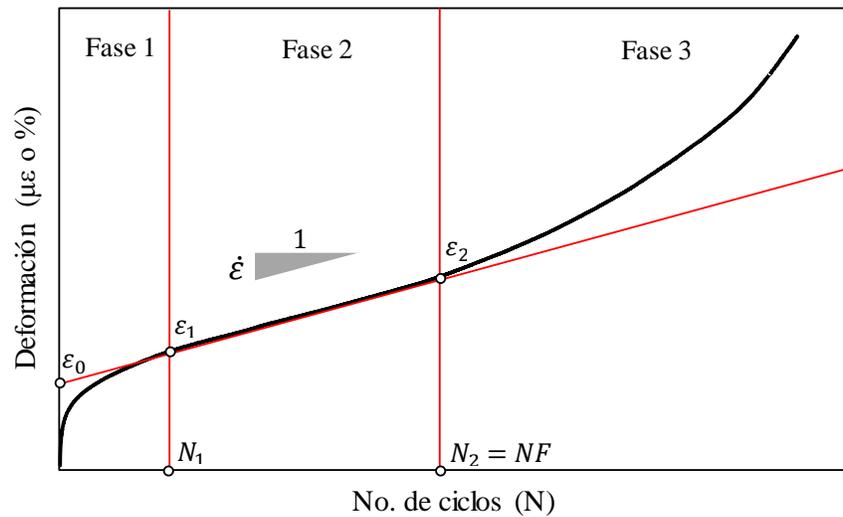
3.5.1 Generalmente, el software del equipo realizará el cálculo de la deformación ( $\epsilon$ ) axial acumulada por ciclo; siendo ésta el promedio de la deformación calculada para cada LVDT.

La deformación axial por ciclo es calculada como el desplazamiento vertical registrado por cada LVDT entre la separación entre los pines.

$$\epsilon(\mu\epsilon) = \frac{l_{axial}(mm)}{Separación_{pines}(mm)} * 1\,000\,000$$

$$\epsilon(\%) = \frac{l_{axial}(mm)}{Separación_{pines}(mm)} * 100$$

3.5.2 Graficar la deformación axial acumulada por ciclo contra el número de ciclos registrados durante todo el ensayo (figura 3.8).



**Figura 3.8 Curva de deformación permanente acumulada.**

3.5.3 Determinar el rango de ciclos en los que la mezcla presenta una tasa de deformación constante (Fase 2).

3.5.4 Calcular la tasa de deformación ( $\dot{\epsilon}$ ) como la pendiente de la curva en la Fase 2, en unidades de  $\%/Mc$ ; **Mc = millones de ciclos**.

En la figura 3.9 se puede observar cómo a 50000 ciclos la tendencia de la tasa de deformación se reflejaría como la línea roja resultando en una sobreestimación del valor  $\dot{\epsilon}$ ; por otro lado, conduciendo el ensayo hasta 100000 ciclos, al menos, se obtendría una tasa de deformación real como lo indica la línea azul.

3.5.5 Registrar la deformación axial acumulada al número de ciclos determinado por la especificación, cuando se indique.

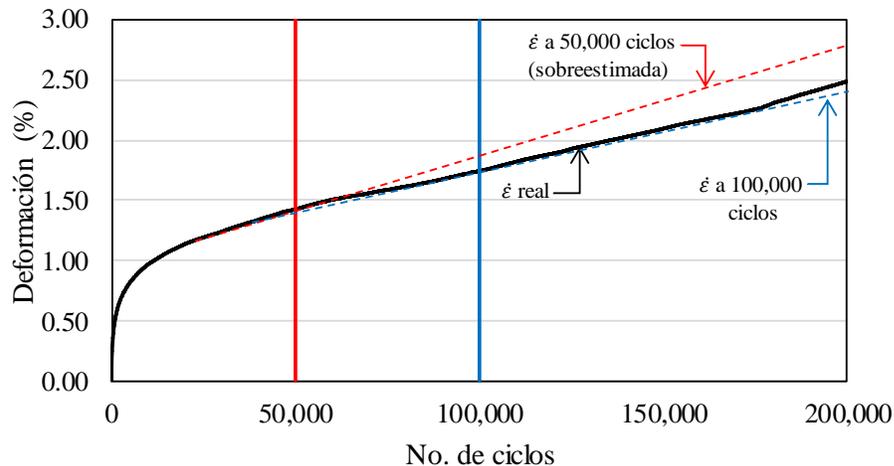


Figura 3.9 Estimación de  $\epsilon$

### 3.6. Registro de resultados

Reportar la siguiente información para cada uno de los especímenes:

- Gravedad específica teórica máxima ( $G_{mm}$ ), gravedad específica bruta ( $G_{mb}$ ) y porcentaje de vacíos de aire del espécimen de prueba
- Temperatura de prueba
- Temperatura del espécimen durante el ensayo
- Esfuerzo desviador (vertical) aplicado
- Esfuerzo de confinamiento (horizontal) aplicado
- Frecuencia de carga y duración del ciclo
- Número de ciclos de aplicación de la carga
- Deformación axial máxima registrada al número de ciclos especificado
- Tasa de deformación ( $\dot{\epsilon}$ )

**Tabla 3.4 Registro de datos del ensayo de deformación permanente**

Proyecto:			
No. Ensayo:		ID espécimen:	
Descripción:			
G <sub>mm</sub> =		G <sub>mb</sub> =	
V <sub>a</sub> = %		C.A.= %	
Diámetro= cm		Altura= cm	
Longitud del LVDT=		101.6 mm	
Fecha de inicio ensayo:		Fecha de término ensayo:	
RESUMEN DE RESULTADOS			
Temperatura de prueba: °C		Temperatura mín del espécimen: °C	
Temperatura máx del espécimen: °C		Esfuerzo desviador: kPa	
Esfuerzo de confinamiento: kPa		Frecuencia de carga: Hz	
Tiempo de carga: s		Tiempo de reposo: s	
Duración del ciclo: s		Número de ciclos de aplicación de la carga:	
Tasa de deformación ( $\dot{\epsilon}$ ): %/Mc		Rango de ciclos para determinación de $\dot{\epsilon}$ :	
Deformación axial acumulada: % a		ciclos	
Gráfica: Curva de evolución de la deformación			

### **3.7. Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados**

No hay criterios de repetibilidad y reproducibilidad de este método



## 4 MAC-IX Método de prueba para determinar la vida a la fatiga de mezclas asfálticas sujetas a flexión repetida

---

### 4.1. Objetivo

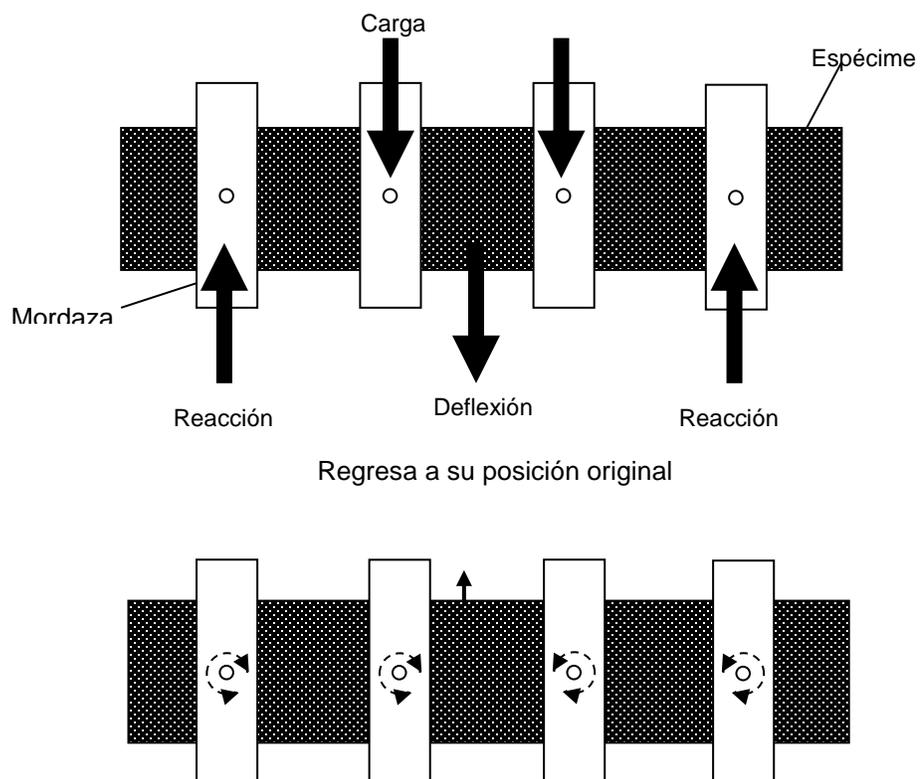
Determinar la vida a la fatiga de vigas de mezcla asfáltica, de 380mm de longitud, 50 mm de altura y 63 mm de ancho, compactadas en laboratorio y sujetas a flexión hasta la falla.

### 4.2. Equipo y herramientas

- **Máquina de ensayo**, servo hidráulica o servo neumática, capaz de aplicar una carga a compresión haversine controlada, en un rango de 0 a 5 kN con una resolución de 2 N y una precisión de 5N, y frecuencias en un rango de 5 a 10 Hz con una resolución de 0.005 Hz y una precisión de 0.01 Hz.
- **Cámara ambiental**, con un rango de medición de -10 a 25°C, una resolución de 0.25°C y precisión de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . La cámara debe mantener la temperatura del espécimen a  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$  durante el ensayo y de tamaño suficientemente grande para acomodar el espécimen de prueba y el espécimen de referencia con el termopar insertado en el centro para verificar la temperatura.
- **Aparato de carga**, controlado por computadora, el cual durante cada ciclo de carga responda a la orden del procesador de datos y el componente de control, ajuste y aplique una carga de tal manera que el espécimen experimente un nivel constante de deformación durante cada uno de los ciclos de carga, figura 4.1. El aparato de carga debe ser capaz de (1) proporcionar carga sinusoidal repetida en un rango de frecuencias de 5 a 10 Hz, (2) sujetar a los especímenes a flexión en cuatro puntos con rotación libre y traslación horizontal para todas las cargas y puntos de reacción, y (3) forzar al espécimen a regresar a su posición original (por ejemplo, deflexión cero) al final de cada uno de los pulsos de carga (La figura 4.2 ilustra las condiciones de carga).

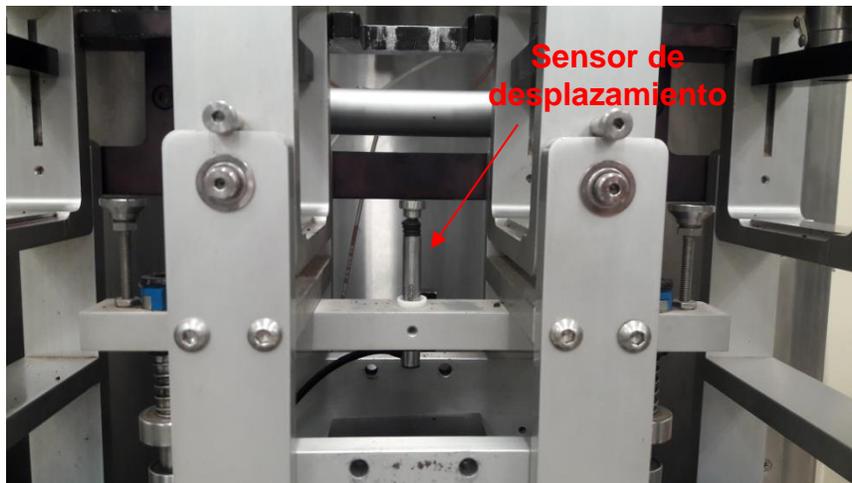


Figura 4.1 Aparato de carga de prueba de fatiga



**Figura 4.2 Características de carga y movimiento del aparato de prueba de fatiga**

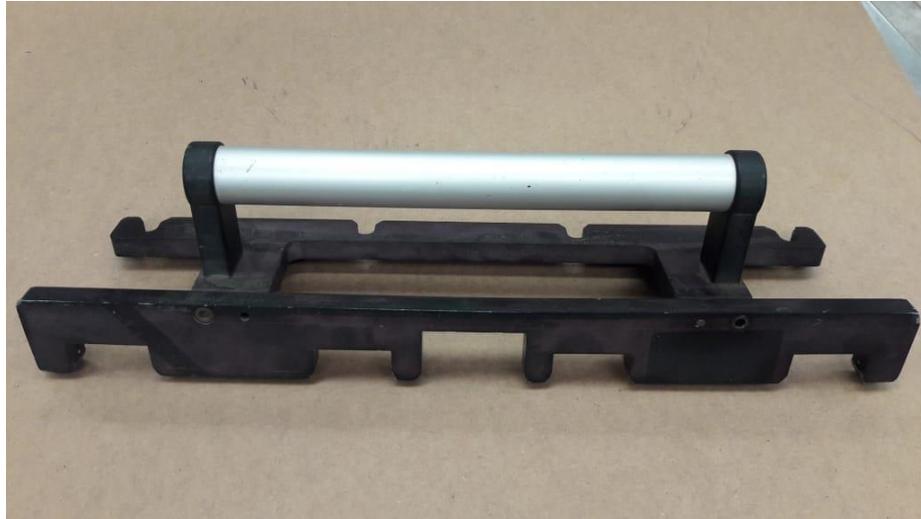
- **Sistema de control y adquisición de datos**, durante cada uno de los ciclos de carga el sistema de control y adquisición de datos debe ser capaz de medir la deflexión de la viga, calcular la deformación en el espécimen y ajustar la carga aplicada por el aparato de carga de tal manera que el espécimen experimente un nivel constante de deformación en cada ciclo de carga, además debe registrar los ciclos de carga, cargas aplicadas y deflexiones de la viga y calcular y registrar el esfuerzo máximo a tensión, la deformación máxima a tensión, el ángulo de fase, la rigidez, la energía disipada y la energía disipada acumulada para los intervalos del ciclo de carga especificado por el usuario.
- **Sensor de desplazamiento**, la deflexión debe ser medida con un LVDT, por ejemplo, como el mostrado en la figura 4.3. El LVDT debe tener un rango de medición de  $\pm 2.5$  mm con una resolución de 0.002 mm y una precisión de 0.005mm. El sistema de medición de desplazamiento debe poder ajustarse a cero.



**Figura 4.3 Montaje del sensor de desplazamiento**

- **Espaciador**, para configurar adecuadamente el espaciado entre las mordazas, figura 4.4.

- **Cortadora**, una máquina para cortar los especímenes de prueba a la longitud requerida y en un solo corte. El disco debe ser diamantado y de borde continuo.
- **Termopar**, sensor para monitorear la temperatura interna de la mezcla con un rango de medición apropiado para las temperaturas de ensayo y una precisión de 0.1°C.



**Figura 4.4 Espaciador de mordazas**

- **Vernier**, digital con un rango de medición de 0 a 200 mm y una resolución de 0.01 mm.
- **Flexómetro**, para medir el largo de la viga, con un rango de medición de al menos 1000 mm y una resolución de 1 mm.
- **Taladro**, con una broca de diámetro ligeramente mayor que el diámetro del cable del termopar.
- **Balanza**, con capacidad de 15 000 g y una resolución de 0.1 g.
- **Compactador de amasado**, 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.

### **4.3. Calibraciones y/o verificaciones**

- **Celda de carga**, calibrar la celda de carga en el rango de trabajo con un laboratorio de calibración acreditado y al menos una vez al año o de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

- **Transductor de desplazamiento vertical (LVDT).** Calibrar el sensor de desplazamiento con un calibrador de longitud como el que se muestra en la figura 4.5 o con un laboratorio de calibración acreditado. Se recomienda calibrarlo, en todo su rango de trabajo, antes de usarlos por primera vez, al menos una vez al año o después de cualquier cambio en la configuración electrónica del equipo donde se emplea el sensor.
- **Balanza,** calibrar o verificar con una resolución de 0.1 g. Se recomienda que la calibración sea en, al menos, 5 puntos (1000, 2000, 3000, 4000 y 5000 g) dentro del rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.

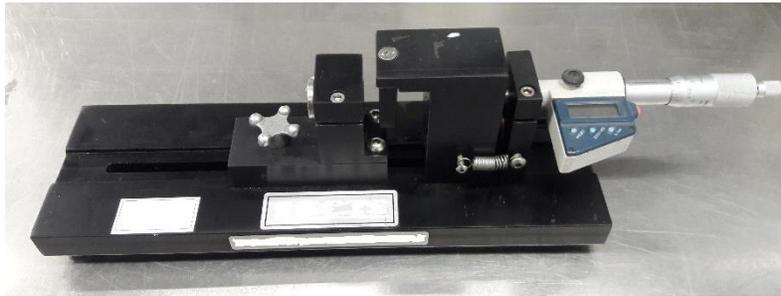


Figura 4.5 Calibrador de sensor de deformación (lvdt)

- **Sensores de temperatura.** Calibrar o verificar el sensor de temperatura de la cámara ambiental, así como el sensor para monitorear la temperatura del espécimen. Se recomienda verificarlos en el rango de trabajo y al menos una vez al año.
- **Vernier,** calibrar con un laboratorio de calibración acreditado en al menos 10 puntos, considerando el rango de trabajo, y al menos una vez cada 12 meses.

## 4.4. Método de prueba

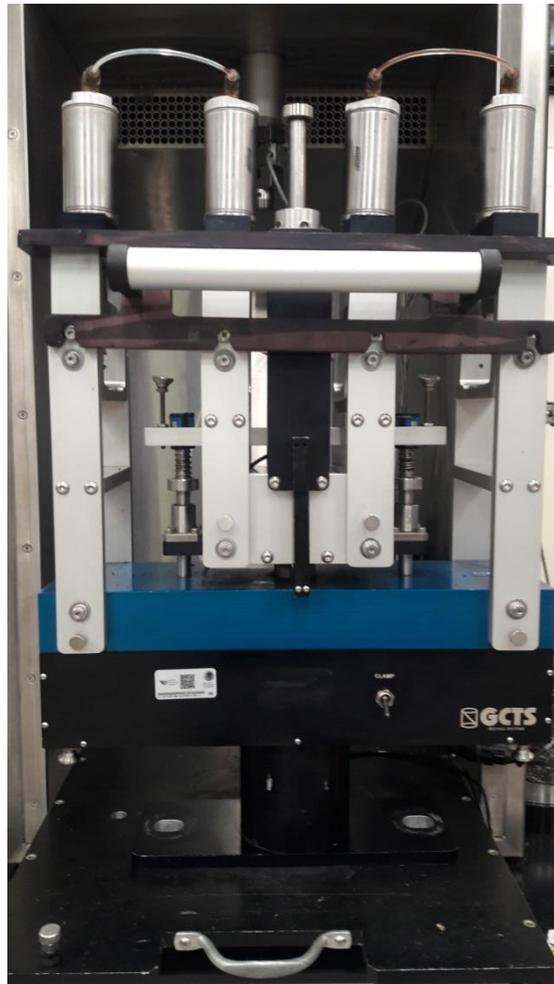
### 4.4.1 Preparación del espécimen

#### *Especímenes de laboratorio*

- 4.4.1.1 Preparar al menos 2vigas, por nivel de deformación a evaluar, de **380 mm de largo, 63 mm de ancho y 50 mm** al contenido de vacíos de aire de **6±0.5%**.
- 4.4.1.2 Fabricar la mezcla de acuerdo con el *Método estándar para la preparación y compactación de losas de mezcla asfáltica en caliente* (MAC-VI).
- 4.4.1.3 Medir la altura y el ancho del espécimen con una aproximación de **0.01 mm** en tres diferentes puntos a lo largo de la longitud del espécimen. Medir la longitud de la viga con una aproximación de **1 mm**. Calcular el promedio de las tres mediciones para cada una de las dimensiones y registrar los promedios.

## **4.4.2 Ejecución de la prueba**

- 4.4.2.1 Colocar el espaciador y el espécimen en el marco de carga, figura 4.6. El espaciamiento entre las mordazas debe ser de 119 mm centro a centro.
- 4.4.2.2 Aplicar presión suficiente para a las mordazas para mantener el espécimen en su lugar. Se recomienda que este esté entre 300 a 500 kPa.



**Figura 4.6 Marco de carga y espaciador**

- 4.4.2.3 Conectar el sensor de deformación (LVDT) al sistema de adquisición de datos y ajustarlo a cero.
- 4.4.2.4 Acondicionar el espécimen a una temperatura de **20± 0.5 °C** durante dos horas. Usar el espécimen de monitoreo para determinar el momento en que el espécimen alcanza la temperatura especificada de ensayo.



**Figura 4.7 Montaje de la prueba de fatiga**

4.4.2.5 Configurar el archivo de prueba a la deformación cíclica haversine deseada (**250 a 750  $\mu\epsilon$** ), frecuencia de carga de **10 Hz** y los intervalos de los ciclos de carga para los cuales los resultados de la prueba son registrados y calculados.

4.4.2.6 Se recomienda utilizar las frecuencias de muestreo presentadas en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1 Muestreo recomendado de datos en la prueba de fatiga**

Ciclos	Muestreo	Datos por ciclo
1 - 100	Todos	100
100 - 1000	2 de cada 20	100
1000 - 10000	2 de cada 200	100
10000 - 1000000	2 de cada 2000	100
> 1000000	2 de cada 5000	100

4.4.2.7 Determinar la rigidez inicial del espécimen para el ciclo **50**. Esta rigidez es un estimado de la rigidez inicial, la cual es usada como una referencia para determinar la falla del espécimen, una reducción del 50 por ciento o más representa la falla del espécimen.

Nota 4.1 La selección de los intervalos de los ciclos de carga para los cuales los resultados del ensayo son calculados y registrados puede ser limitada por la cantidad de memoria disponible para el almacenamiento de los datos.

4.4.2.8 Después de seleccionar los parámetros de prueba apropiados comenzar el ensayo. Activar los componentes de registro y control de manera que los resultados del ensayo para los intervalos de los ciclos de carga seleccionados sean monitoreados y registrados.

4.4.2.9 Asegurarse de que el sistema de prueba está operando apropiadamente.

4.4.2.10 Cuando el espécimen ha experimentado más del **50** por ciento de reducción de la rigidez terminar el ensayo.

4.4.2.11 Para que el ensayo se considere válido el espécimen debe soportar al menos **10 000 ciclos** de carga, para el nivel de deformación seleccionado, antes de que su rigidez inicial sea reducida en un 50 por ciento o más.

4.2.4.12 Realizar el ensayo a diferentes niveles de deformación (**250 a 750  $\mu\epsilon$** ).

## 4.5. Cálculos

### 4.5.1 Cálculo del esfuerzo máximo de tensión

$$\sigma_t = \frac{0.357P}{bh^2}$$

donde

$\sigma_t$ = esfuerzo máximo de tensión, Pa

P = Carga aplicada por el actuador, Newton

b = ancho promedio del espécimen, mm

h = altura promedio del espécimen, mm

### 4.5.2 Cálculo de la deformación máxima a tensión

$$\epsilon_t = \frac{12d}{3L^2 - 4a^2}$$

donde

$\epsilon_t$ = deformación máxima a tensión (m/m)

d= deflexión máxima en el centro de la viga, m

a= distancia interior entre mordazas, 0.357/3 m, (0.119 m)

L= longitud de la viga entre las mordazas exteriores, 0.375 m

### 4.5.3 Cálculo de la rigidez a flexión

$$S = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t}$$

donde

S= rigidez a flexión, Pa

$\epsilon_t$ = deformación máxima a tensión (m/m)

$\sigma_t$ = esfuerzo máximo de tensión, Pa

### 4.5.4 Cálculo del ángulo de fase

$$\phi = 360 * f * s$$

donde

f= frecuencia de carga, Hz

s= retraso del tiempo entre  $P_{m\acute{a}x}$  y  $\delta_{m\acute{a}x}$ , s

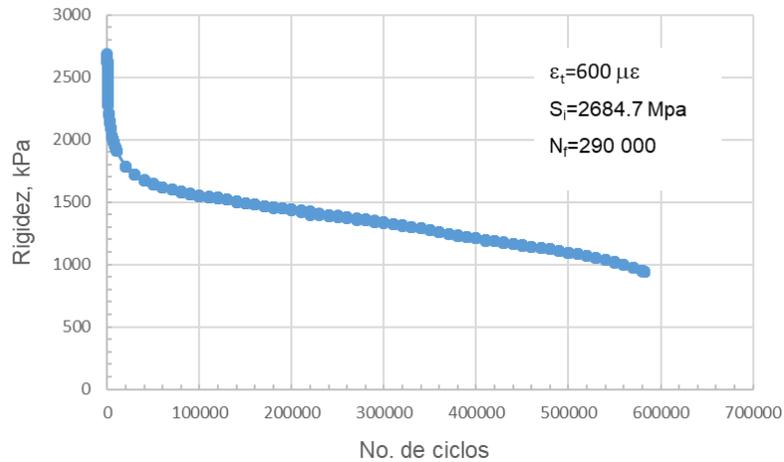
Nota 4.1 Cuando se usa software de ensayo automatizado en los componentes de registro y control del sistema de prueba, el ángulo de fase es calculado por un algoritmo contenido en el software.

## 4.6. Registro de resultados

Reportar la siguiente información:

- Proyecto y descripción de la mezcla asfáltica en caliente (tipo y contenido de asfalto, granulometría del agregado).
- Gravedad específica teórica máxima ( $G_{mm}$ ) de la mezcla y la gravedad específica ( $G_{mb}$ ) y porcentaje de vacíos de aire de cada uno de los especímenes de ensayo.
- Identificación y dimensiones del espécimen (longitud, altura y ancho promedio) en centímetros hasta cuatro cifras significativas.
- Fecha de inicio y termino del ensayo
- Temperatura promedio durante el ensayo con una aproximación de 0.2 °C.
- Incluir memoria de cálculo (libro de Excel) con los resultados del ensayo listados en la tabla 4.1 para cada intervalo de ciclo de carga seleccionado por el operador hasta tres cifras significativas.
- Reportar la rigidez a flexión inicial y los ciclos a la falla

- Reportar los ciclos de carga para los cuales los resultados de la prueba son registrados y calculados
- Construir la curva de rigidez contra ciclos de carga de cada uno de los especímenes ensayados como es mostrado en la figura 4.8.



**Figura 4.8 Curva de rigidez**

**Tabla 4.2 Registro de datos de la prueba de fatiga**

Proyecto								
No. Ensayo:			ID espécimen:					
Descripción:								
G <sub>mm</sub> =			G <sub>mb</sub> =			V <sub>a</sub> = %	C.A <sub>o</sub> = %	
Largo= cm			Altura= cm			Ancho= cm		
Fecha inicio ensayo:					Fecha término del ensayo:			
Rigidez inicial (S <sub>i</sub> )= MPa				No. ciclos a la falla (N <sub>f</sub> )=				
<b>RESUMEN DE RESULTADOS DE PRUEBA DE FATIGA</b>								
Degradación S %	No. ciclo	Temp °C	Deflexión mm	carga	σ <sub>t</sub> kPa	ε <sub>t</sub> με	S MPa	φ °
30	10 000	20.0	0.318	529	1167	594	1965.9	38.48
40	50 000	20.1	0.319	453	999	595	1679.2	40.49
50	220006	20.0	0.330	392	865	600	1403.2	41.74

**Registro de datos de prueba de fatiga**

Ciclo de carga*	Temp °C	Deflexión mm	Carga N	σ <sub>t</sub> kPa	ε <sub>t</sub> με	S MPa	φ °
1							
2							
3							
300							
400							

Nota: Reportar todos los ciclos de carga registrados por el equipo durante el ensayo.

## 4.7. Criterios para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad en los resultados

No hay criterios de repetibilidad y reproducibilidad de este método.

## **Bibliografía**

---

1. AASHTO T321 (2007). Standard Method of Test for Determining the Fatigue life of Compacted Hot mix (HMA) subjected to Repetead Flexural Bending.
2. AASHTO TP 79-15 (2016). Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).



# 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 A1.1 Tamaño de especímenes según el tamaño máximo del agregado**

Tamaño máximo del agregado in	Diámetro mínimo mm	Altura mínima mm
2 (50.8 mm)	203.2	76.2
1 ½ (38.1 mm)	152.4	57.2
1 (25.4 mm)	101.6	38.1
¾ (19.1 mm)	76.2	28.6
½ (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:

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

Va = Vacíos de aire, %

Gmb = Gravedad específica bruta de la mezcla compacta, adimensional

Gmm = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, adimensional



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

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

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