

ENSAYO DE TENSIÓN INDIRECTA PARA DETERMINAR EL MÓDULO RESILIENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

INV E – 749 – 13

1 OBJETO

- 1.1 Esta norma se refiere a los procedimientos para preparar y ensayar probetas fabricadas en el laboratorio o recuperadas de mezclas asfálticas de pavimentos, para determinar valores del módulo resiliente, aplicando el ensayo de tensión indirecta con carga repetida.
- 1.2 A la fecha, no se han hecho declaraciones sobre reproducibilidad y sesgo para esta norma y, por lo tanto, no se debe utilizar para la aceptación o rechazo de un material con fines de pago.
- 1.3 Esta norma reemplaza la norma INV E-749-07.

2 DEFINICIONES

- 2.1 *Carga de contacto (P_{contacto})* – Carga vertical aplicada a la muestra para mantener un contacto positivo entre ella y la banda de carga. La carga de contacto (P_{contacto}) es 4 % de la carga máxima ($P_{\text{máx}}$) y no debe ser menor de 22.5 N (5 lb) ni mayor de 89 N (20 lb).

$$P_{\text{contacto}} = 0.04 P_{\text{máx}}$$

[749.1]

- 2.2 *Núcleo* – Espécimen cilíndrico intacto que se remueve del pavimento mediante perforación y muestreo en un sitio determinado. El núcleo puede comprender una, dos, o más de dos capas diferentes.
- 2.3 *Carga cíclica resiliente (carga vertical resiliente), ($P_{\text{cíclica}}$)* – Carga aplicada al espécimen, usada directamente para calcular el módulo resiliente.

$$P_{\text{cíclica}} = P_{\text{máx}} - P_{\text{contacto}}$$

[749.2]

- 2.4 *Forma de carga de medio seno verso* – Forma requerida para el pulso de carga para el ensayo de módulo resiliente. El pulso es de forma $(1 - \cos \theta)/2$, con la curva variando desde la carga de contacto (P_{contacto}) hasta la máxima ($P_{\text{máx}}$).

- 2.5** *Módulo resiliente instantáneo* – Determinado a partir de los gráficos deformación-tiempo, como se describe en la Sección 9.
- 2.6** *Capa* – Parte del pavimento construida con un determinado material y colocada con equipo y técnicas similares. El espesor de una capa asfáltica es el obtenido a partir de una pasada de la máquina pavimentadora y del proceso subsiguiente de compactación, y puede ser igual o menor que el espesor del núcleo.
- 2.7** *Carga axial máxima aplicada ($P_{máx}$)* – Carga total máxima aplicada a la muestra. Incluye la carga de contacto y la carga cíclica (resiliente).

$$P_{máx} = P_{\text{contacto}} + P_{\text{cíclica}}$$

[749.3]

- 2.8** *Espécimen de ensayo (probeta)* – Parte de la capa que se usa en el ensayo. Su espesor puede ser igual o menor que el de la capa.
- 2.9** *Deformación total* – Determinada a partir de los gráficos deformación-tiempo, como se describe en la Sección 9.

3 RESUMEN DEL MÉTODO

- 3.1** El ensayo de tensión indirecta con cargas repetidas para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas se lleva a cabo aplicando cargas de compresión con ondas de forma de medio seno verso. La carga se aplica verticalmente sobre un plano diametral de un espécimen cilíndrico de concreto asfáltico. Se miden las deformaciones recuperables horizontal y vertical resultantes y, a partir de ellas, se calculan valores de la relación de Poisson resiliente. Posteriormente, se calculan valores del módulo resiliente a partir de la relación de Poisson. De la interpretación de los datos de deformación resultan dos valores del módulo resiliente: uno, llamado módulo resiliente instantáneo, que se calcula empleando la deformación recuperable que ocurre instantáneamente durante la parte de descarga de un ciclo; el otro, llamado módulo resiliente total, se calcula empleando la deformación recuperable total, que incluye tanto la recuperable instantánea, como la recuperable dependiente del tiempo, que continúa durante la descarga y el resto del período de reposo de un ciclo.

4 IMPORTANCIA Y USO

- 4.1** Los valores del módulo resiliente se pueden emplear para evaluar la calidad relativa de los materiales, así como para generar datos de entrada para el diseño, la evaluación y el análisis de pavimentos. El ensayo se puede emplear para estudiar los efectos de la temperatura y la carga sobre el módulo resiliente.

5 EQUIPO

- 5.1** *Máquina de ensayo* – La máquina de ensayo debe ser de carga vertical, de cadena cerrada, con un dispositivo de aplicación de carga electro-hidráulico o neumático capaz de producir ciclos repetidos de pulsos de carga de forma de medio seno verso, dentro de un determinado intervalo de frecuencias, duraciones de carga y niveles de carga.
- 5.2** *Dispositivo de aplicación de carga* – Debe tener la posibilidad de ensayar especímenes de 101.6 o 152.4 mm (4 o 6") de diámetro y con espesores hasta de 63.5 mm (2 ½"). El dispositivo debe ser suficientemente compacto para ser usado dentro de una cámara ambiental. Debe tener una placa de carga fija en la parte inferior y una móvil en la superior. El movimiento de la placa superior debe ser guiado por dos columnas, una a cada lado del espécimen y equidistantes del eje de carga y de las bandas de carga, para asegurarle un movimiento mínimo de traslación o rotación durante la carga del espécimen. Las columnas de guía deben tener una superficie de contacto prácticamente sin fricción. Se deberá inspeccionar con frecuencia la superficie de las columnas para comprobar si presenta estrías a causa de la fricción. El alineamiento del dispositivo dentro del sistema de carga se debe obtener de manera que la fricción sea limitada. La placa de carga superior debe poseer suficiente rigidez, para prevenir deflexiones excesivas o indebidas durante la carga. La Figura 749 - 1 muestra las bandas de carga, las cuales deben ser perpendiculares a la línea que une las dos columnas de guía.
- 5.3** *Sistema de control de temperatura* – El sistema de control de temperatura deberá ser capaz de funcionar dentro de un intervalo de temperaturas desde 5 hasta 45° C (41 – 113° F) con una precisión de $\pm 1^\circ \text{C}$ ($\pm 2^\circ \text{F}$). El sistema debe incluir un gabinete de temperatura controlada, de tamaño suficiente para mantener al menos 3 especímenes durante el período al ensayo, como se describe en el numeral 7.4.

- 5.4 Sistema de medición y registro** – El sistema de medición y registro deberá incluir sensores para medir y registrar, simultáneamente, deformaciones horizontales y verticales y cargas. El sistema deberá ser capaz de medir deformaciones horizontales y verticales en el intervalo de 0.00038 mm (0.000015") de deformación. Las celdas de carga se deben calibrar con exactitud, con una resolución de 8.9 N (2 lbf) o mejor.



Figura 749 - 1. Espécimen con las bandas de carga

- 5.4.1 Adquisición de datos** – Los dispositivos de medida o registro deberán proporcionar las medidas de deformación en tiempo real y ser capaces de controlar lecturas en ensayos conducidos a 1.0 Hz. Se recomienda el uso de sistemas de control por computador. El sistema de adquisición de datos debe ser capaz de colectar 200 barridos (escaneos) por segundo (un barrido incluye todos los valores de carga y deformación en un punto de tiempo dado). Se debe disponer, también, de la posibilidad de obtener gráficos en tiempo real (simultáneamente con la recolección de datos del sistema de monitoreo del computador), para verificar el progreso del ensayo. Si se utilizan registradores gráficos en banda de papel sin sistemas de monitoreo por computador, se deberá ajustar la escala del dibujo para que haya un balance entre la reducción de escala requerida como resultado del tiempo de reacción de la pluma y la amplificación de escala necesaria para que los valores representados en el dibujo presenten suficiente exactitud. Para los fines de los cálculos, se deberán usar los valores de carga reales y no los proyectados, por lo cual el sistema de adquisición de datos deberá ser capaz de monitorear los valores de carga de manera continua durante el ensayo.

Nota 1: Se pueden hacer ensayos a varias frecuencias. Se sugieren valores de 0.33 y 0.5 Hz.

- 5.4.2 Medida de la deformación** – Los valores de la deformación vertical y horizontal se deben medir sobre la superficie del espécimen empleando transductores lineales diferenciales variables (TLDVs) montados en puntos de medición a lo largo de los diámetros horizontal y vertical. La longitud de medición puede ser de tres tamaños en relación con el diámetro del espécimen: **(1)** $\frac{1}{4}$ del diámetro o 25.4 mm (1") para especímenes de 101.6 mm (4") de diámetro, o 38.1 mm (1 $\frac{1}{2}$ ") para especímenes de 152.4 mm (6") de diámetro; **(2)** la mitad del diámetro o 50.8 mm (2") para especímenes de 101.6 mm (4") de diámetro, o 76.2 mm (3") para especímenes de 152.4 mm (6") de diámetro; y **(3)** un diámetro o 101.6 mm (4") para probetas de 101.6 mm (4") de diámetro, o 152.4 mm (4") para probetas de 152.4 mm (6") de diámetro. Es necesario montar 2 TLDVs en cada cara del espécimen, uno en posición horizontal y otro en posición vertical, por lo que se requieren 4 TLDVs para las medidas de deformación en un espécimen.

Nota 2: Los resultados obtenidos con una longitud de medida de $\frac{1}{4}$ del diámetro del espécimen son los que brindan la mejor precisión.

- 5.4.3 Medida de la carga** – Las cargas repetidas se deberán medir con una celda de carga electrónica, con una capacidad adecuada para la máxima carga requerida y una sensibilidad de 0.5 % de la carga pico proyectada. La celda de carga debe ser monitoreada y verificada mensualmente durante el período de ejecución de ensayos de módulo resiliente, empleando un anillo de prueba calibrado, con el fin de tener la certeza de que la celda opera de manera correcta.
- 5.5 Bandas de carga** – Se necesitan bandas de carga de acero, con superficies de contacto cóncavas, maquinadas con un radio de curvatura igual al radio nominal del espécimen de ensayo, para aplicar la carga al espécimen (nota 3). Las áreas de contacto de las bandas de carga deberán tener 12.7 mm ($\frac{1}{2}$ ") y 19 mm ($\frac{3}{4}$ ") de ancho, para las probetas de 101.6 mm (4") y 152.4 mm (6") de diámetro, respectivamente. Los bordes externos de las superficies curvadas deben ser limados levemente para remover las asperezas que puedan producir cortes a la muestra durante el ensayo. Se deben dibujar líneas delgadas a través de la longitud de cada banda en su parte central, para ayudar al alineamiento. Así mismo, se deben hacer marcas apropiadas para centrar el espécimen en la longitud de las bandas de carga. Esto se puede hacer, bien haciendo coincidir el centro del espécimen con una marca en el centro de la banda de carga, o bien posicionado el espécimen entre dos marcas en los extremos de su espesor, o ambos.

Nota 3: Los especímenes de ensayo pueden tener diámetros de 101.6 ± 0.10 mm ($4.000 \pm 0.004"$) o de 152.4 ± 0.15 mm ($6.000 \pm 0.006"$).

5.6 Dispositivos para marcar y alinear:

- 5.6.1** El dispositivo de alineamiento de los TLDVs debe alinear simultáneamente los TLDVs horizontal y vertical en las caras superior e inferior del espécimen para la colocación del adhesivo. Si no se usa este dispositivo, entonces se debe usar un elemento que permita marcar ejes mutuamente perpendiculares en las caras superior e inferior del espécimen, a través de su centro. Los ejes se deben marcar al mismo tiempo en las dos caras, para asegurar que quedan en el mismo plano.
- 5.6.2** Se debe emplear un dispositivo de alineamiento, para posicionar y colocar soportes horizontales y verticales para los medidores o TLDVs a lo largo de los diámetros horizontal y vertical del espécimen y sostenerlo en su lugar hasta que cure el pegante que sostiene los soportes. Deberá ser fácilmente removible, sin alterar los TLDVs una vez que cure el pegante, y no se podrá montar de manera destructiva en el espécimen. El dispositivo deberá ser capaz de montar el TLDV a longitudes de medición de $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ del diámetro del espécimen. El TLDV debe quedar tan cerca como sea posible de la superficie del espécimen (pero sin tocarla), con el fin de minimizar el efecto de pandeo. Se recomienda una separación de 5.08 mm (0.2") para asegurar resultados uniformes en los ensayos. El eje del TLDV no se deberá encontrar a más de 6.35 mm ($\frac{1}{4}"$) de la superficie del espécimen. La Figura 749 - 2 muestra un ejemplo de un dispositivo de alineamiento.



Figura 749 - 2. Dispositivos para marcar y alinear

6 ESPECÍMENES

6.1 Tamaño – Los ensayos de módulo resiliente se deben realizar sobre probetas de 101.6 ± 0.10 mm (4.000 ± 0.004) o de 152.4 ± 0.15 mm (6.000 ± 0.006) de diámetro, cuyo espesor puede variar entre 38.1 mm ($1 \frac{1}{2}$) y 63.5 mm ($2 \frac{1}{2}$). El espécimen puede ser un núcleo extraído del pavimento o una probeta compactada en el laboratorio por el método Marshall o con el compactador giratorio. Dependiendo de la altura del espécimen moldeado en el compactador giratorio y del espesor escogido para realizar el ensayo, se podrán aserrar entre 2 y 3 especímenes de ensayo a partir de un espécimen compactado.

6.2 Especímenes de núcleos:

6.2.1 Los núcleos para la preparación del espécimen (que pueden contener una o más capas susceptibles de ser ensayadas) deberán presentar

superficies lisas y uniformes y cumplir los requisitos de espesor y diámetro señalados en el numeral 6.1. Los núcleos que tengan muestras evidentes de deformación o de agrietamiento son inaceptables para el ensayo. Si las superficies de los extremos del núcleo son irregulares, se deberán rectificar cuanto sea necesario. Si del núcleo se van a separar especímenes de capas individuales, la operación se efectuará con una sierra de diamante y empleando agua o aire como refrigerante. Se pueden obtener especímenes de cada capa en el terreno, con el fin de hacer ensayos preliminares de resistencia a la tensión.

- 6.2.2** Si el núcleo es multicapa, las capas se deberán separar por sus interfaces. Si se detectan varias capas consecutivas del mismo material, se permite ensayarlas en conjunto como un solo espécimen. Luego del corte, se debe marcar la dirección del tránsito en cada capa, con el fin de mantener la orientación correcta.
- 6.2.3** Con el fin de limitar la falta de paralelismo de los dos lados planos, se recomienda colocar el espécimen sobre una superficie a nivel y medir su alejamiento de la perpendicularidad. El sensor de desplazamiento debe tener una precisión de 0.01 mm (0.0004"). La desviación estándar de dos superficies paralelas debe ser menor de 0.56 mm (0.022"). El rango aceptable de dos resultados de ensayos realizados para determinar el espesor de la muestra es 2.04 mm (0.08"). La Figura 749 - 3 muestra un dispositivo para medir la falta de paralelismo.
- 6.3** *Especímenes moldeados en el laboratorio* – Se deben preparar de acuerdo con procedimientos aceptables, tales como los indicados en las normas INV E-748 e INV E-800. Además, deberán cumplir los requisitos sobre tamaño señalados en el numeral 6.1.
- 6.4** *Eje diametral* – La marcación del eje diametral a ser ensayado se debe realizar con un dispositivo apropiado para ello, como se describe en el numeral 5.6. El eje debe ser paralelo al símbolo de dirección del tránsito (flecha) que se haya marcado durante la extracción del núcleo en la vía. La ubicación del eje diametral se puede rotar levemente, si resulta necesario para evitar el contacto de las bandas de carga con partículas anormalmente grandes, o vacíos superficiales, o para evitar el montaje del TLDV sobre una superficie con vacíos de gran tamaño. La segunda marca diametral deberá ser perpendicular a la primera. Estas marcas son necesarias para montar apropiadamente los TLDVs horizontal y vertical.



Figura 749 - 3. Dispositivo para medir la falta de paralelismo

- 6.5** El espesor (t) de cada espécimen de ensayo se debe medir con aproximación a 0.25 mm (0.01") antes del ensayo. Para obtenerlo, se promedian los resultados de cuatro lecturas realizadas a iguales intervalos a través del perímetro, a una distancia entre 12.7 mm ($\frac{1}{2}$ ") y 25.4 mm (1") del borde del espécimen.
- 6.6** El diámetro (D) de cada espécimen de ensayo se debe determinar con aproximación a 0.25 mm (0.01"), a partir de dos medidas en la mitad de su altura, una a lo largo del eje paralelo a la dirección del tránsito y otra perpendicular a la anterior.
- 6.7 Réplicas:**
- 6.7.1** El procedimiento de ensayo aplica tanto a especímenes compactados en el laboratorio como a núcleos extraídos de pavimentos. Se pueden obtener tres especímenes de ensayo de espesor igual a 38.1 mm (1 $\frac{1}{2}$ ") o 50.8 mm (2") a partir de una probeta compactada de 127 mm (5") o 178 mm (7") de altura. Se recomienda aserrar los dos extremos de cada probeta compactada, para obtener una superficie lisa. El procedimiento descrito en este numeral da lugar a tres réplicas de una probeta compactada. En el caso de núcleos, se requiere tomar tres especímenes de campo de una sección homogénea.

- 6.7.2** Tres especímenes dan lugar a un total de 12 valores de relación de Poisson y de módulo resiliente instantáneos y totales (cuatro valores por espécimen).
- 6.8** *Preparación del espécimen* – Para medidas de deformación en dos direcciones (horizontal y vertical), se montan los puntos de medición pegándolos al espécimen. Se espera hasta que se fijen apropiadamente y se seque el pegante antes de remover el porta pegante. Se adosan los TLDVs a las dos caras del espécimen, disponiéndolos por pares, vertical y horizontalmente. Se ajusta el sistema electrónico de medida y las amplificaciones necesarias para los cuatro TLDVs. Puede ser necesaria una activación inicial negativa si se está usando una amplificación elevada o si existe la posibilidad de exceder el rango de voltaje (o ambas).

7 PROCEDIMIENTO

- 7.1** El procedimiento involucra la determinación del módulo resiliente a unos valores definidos de carga, frecuencia y duración de la carga, a 25° C (77° F). Opcionalmente, se pueden hacer series de ensayos a varias temperaturas (por ejemplo, 5° C (41° F), 15° C (59° F), 20° C (68° F) y 25° C (77° F), a una frecuencia de carga específica para cada temperatura).
- 7.2** *Pre-requisitos del ensayo* – El ensayo se debe realizar luego de que se haya verificado el sistema de respuesta ensayando especímenes sintéticos, como se menciona en el numeral 8.1.
- 7.3** *Ensayo preliminar de resistencia a la tensión* – Antes de proceder a la ejecución del ensayo de módulo resiliente, se debe determinar la resistencia a la tensión, empleando un espécimen de ensayo tomado de la misma capa y tan cerca como sea posible al sitio de toma del núcleo para el ensayo del módulo. En el caso de los especímenes de laboratorio, se deberá elaborar una probeta adicional, con las mismas propiedades de las destinadas a la determinación del módulo. El ensayo se debe realizar en acuerdo con la norma INV E-786.
- 7.4** *Control de temperatura* – Los especímenes de ensayo compactados en el laboratorio se deben llevar a una temperatura de $25 \pm 1^\circ \text{C}$ ($77 \pm 2^\circ \text{F}$). Los núcleos también se deben colocar en un gabinete de temperatura controlada y se llevan a la temperatura especificada para el ensayo. A menos de que la temperatura sea controlada y la temperatura real sea conocida, los especímenes deberán permanecer en el gabinete a $25 \pm 1^\circ \text{C}$ ($77 \pm 2^\circ \text{F}$) por lo

menos durante 6 horas antes del ensayo. Se puede poner en el gabinete una muestra falsa para verificar la temperatura.

7.5 Alineamiento y fijación del espécimen:

- 7.5.1** El espécimen se debe colocar de manera que la marca colocada en la mitad de su espesor quede ubicada en la línea de acción del eje actuante o, alternativamente, comprobando que el espécimen está centrado exactamente entre las marcas finales de las bandas de carga. Las marcas diametrales se usan entonces para asegurar que el espécimen está alineado de arriba abajo con las bandas de carga. Con el uso de un espejo, se puede alinear la cara posterior de manera similar.
- 7.5.2** La superficie de contacto entre la probeta y cada banda de carga es crítica para la obtención de resultados apropiados. Si existen proyecciones o depresiones en la superficie de contacto que dejen una banda sin contacto en una longitud mayor de 19 mm ($\frac{3}{4}$ ") luego de completar la etapa de acondicionamiento de la carga, se deberá rotar el eje de ensayo o rechazar la probeta. Si no se dispone de un espécimen apropiado de reemplazo, se suspende el ensayo y se informan las razones para la suspensión.
- 7.6 Pre-acondicionamiento** – El pre-acondicionamiento y el ensayo se deben conducir mientras el espécimen se encuentra en un gabinete de temperatura controlada que satisfaga los requisitos indicados en el numeral 5.3.
- 7.6.1** La selección de las cargas por aplicar para el pre-acondicionamiento y el ensayo se basan en la resistencia a la tensión indirecta, determinada como se especifica en la norma INV E-786. Durante el ensayo, se deberán usar niveles de esfuerzo de 10 a 20 % de la resistencia a la tensión medida a $25 \pm 1^\circ C$ ($77 \pm 2^\circ F$). Se deberán mantener, también, las cargas de contacto indicadas en el numeral 2.1.
- 7.6.2** La secuencia del ensayo de módulo resiliente consiste en un ensayo inicial a lo largo del primer eje diametral (o a lo largo de la dirección del tránsito en el caso de núcleos), seguido por la rotación del espécimen en un ángulo de 90° . El espécimen de ensayo de deberá mantener a $25^\circ C$. La forma de la onda generada en el computador se debe ajustar con los amplificadores, para hacerla lo más próxima posible a la de medio seno verso. No se requiere ningún período de reposo entre el primer ensayo y el que se realiza después de la rotación. El número de

aplicaciones de carga para cada rotación durante los ciclos de pre-acondicionamiento es 100. Sin embargo, el número mínimo de aplicaciones de carga para una situación específica deberá ser tal, que las deformaciones del módulo resiliente sean estables (Ver numeral 7.7). El número mínimo de ciclos de carga es el necesario para obtener cinco ciclos estables, lo que significa un cambio de menos de 1 % en el módulo resiliente en 5 ciclos consecutivos. Cuando se usen más ciclos de pre-acondicionamiento, se deberá dejar constancia de ello, indicando los motivos. Así mismo, si el ensayo se detuvo por alguna razón, se debe dejar un tiempo suficiente para la relajación del espécimen, antes de reanudar la prueba.

- 7.7 Deformaciones horizontal y vertical** – Se deben controlar ambas deformaciones durante el pre-acondicionamiento. Si se produce una deformación total vertical acumulada mayor de 0.025 mm (0.001"), la carga se deberá reducir al mínimo valor posible, para mantener deformaciones adecuadas con propósitos de medición. Si el uso de menores niveles de carga no es adecuado con fines de medición, se suspende el pre-acondicionamiento y se generan 10 pulsos de carga para la determinación del módulo resiliente, dejando constancia de ello en el informe del ensayo.
- 7.8 Ensayo** – Al término del pre-acondicionamiento para cada rotación, el ensayo para determinar el módulo resiliente se adelanta como se describe a continuación:
- 7.8.1** Se registra la deformación individual medida por cada uno de los 4 dispositivos de medición de deformación tan pronto como se termina el pre-acondicionamiento (los pulsos de carga se aplican continuamente durante el pre-acondicionamiento y la recolección de datos para el módulo resiliente). Solamente se anotan los valores de carga y deformación para los últimos 5 ciclos del total de pulsos de carga aplicados. Un ciclo de carga consiste en un pulso de carga y un periodo de reposo subsecuente. El módulo resiliente se deberá calcular y reportar para cada ciclo, usando la ecuación de la Sección 9. Luego de 100 ciclos de pre-acondicionamiento, se usan los primeros cinco ciclos consecutivos para los cuales la carga aplicada no excede el rango máximo mostrado en la Tabla 749 - 1.
- 7.8.2** Luego de que el espécimen se ha ensayado a lo largo del primer plano diametral, se rota 90° y se repite el procedimiento indicado en el numeral 7.8.1.

- 7.8.3** Luego de completar el ensayo a lo largo de los dos planos diametrales perpendiculares, se debe realizar un ensayo de tensión indirecta a $25 \pm 1^\circ\text{ C}$ ($77 \pm 2^\circ\text{ F}$), de acuerdo con la norma INV E-786. Este ensayo se realiza para determinar la resistencia a la tensión del espécimen específico realmente usado en el ensayo de módulo. Para este espécimen, el eje de carga deberá ser el mismo de la primera posición en el ensayo del módulo.

Tabla 749 - 1. Máximo rango en la aplicación de carga luego de alcanzar condiciones estables

| MÓDULO ESTIMADO MPa (lb/pg ²) | MÁXIMO RANGO DE CARGA EN 5 CICLOS N (lbf) |
|--|---|
| < 3447.5 (< 500 000) | 44.5 (10) |
| < 6985 (< 1 000 000) | 90 (20) |

8 CONTROL DE CALIDAD Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD (QC/QA)

- 8.1** Cada semana, antes de comenzar los ensayos, el personal del laboratorio deberá ensayar uno o más espécímenes sintéticos, los cuales se deben seleccionar de manera que suministren una respuesta comparable a la de una probeta de concreto asfáltico a 25° C (77° F). Típicamente, se usan materiales como el polietileno para verificar el sistema de respuesta, aunque se puede usar otro que presente un módulo similar. Los espécímenes sintéticos se deberán ensayar a 25° C (77° F), con un tiempo de carga de 0.1 s y uno de reposo de 0.9 s, sobre ambos ejes, y con un nivel de carga similar al usado con el concreto asfáltico. La verificación del sistema con uno o varios materiales conocidos, es la mejor y más rápida manera de asegurar que el equipo trabaja como se espera. Sin embargo, el ensayo QC/QA se debe realizar cada vez que la alineación del sistema de carga pueda haber cambiado.

- 8.2** Los espécímenes se ensayan de la siguiente manera:

- 8.2.1** El espécimen se coloca en un gabinete de temperatura controlada que cumpla los requisitos indicados en el numeral 5.3, a 25° C (77° F). Las cargas aplicadas para pre-acondicionamiento y ensayo de los espécímenes sintéticos deben producir en el material una deformación entre 1 y 2.5 μm . Se deberá usar la siguiente ecuación (deducida de la ecuación que se presenta en el numeral 9.3.2) para obtener una estimación de la carga deseada:

$$\text{Carga} = \frac{M_R \text{ del material sintético} \times (\text{deformación}) \times (\text{espesor})}{(I_3 - I_2) \times (\text{relación de Poisson}_{\text{sintético}})} \quad [749.4]$$

- 8.2.2** El espécimen de ensayo se debe pre-acondicionar a lo largo del eje apropiado, antes de aplicarle un mínimo de 100 ciclos del pulso de carga especificado de forma medio seno verso, de 0.1 s de duración, con un reposo de 0.9 s. La forma de la onda generada en el computador se debe ajustar con los amplificadores hasta que las deformaciones horizontal y vertical sean estables y uniformes. El equipo se debe ajustar sintonizando de manera de conseguir la mejor simulación posible del medio seno deseado para la carga, y del intervalo deseado entre cargas.
- 8.2.3** Los resultados de la prueba QC/QA se deben almacenar como un registro permanente del sistema de respuesta para obtener la huella dactilar del sistema. Esta “huella dactilar” es un registro de la respuesta sintonizada del sistema y de su ajuste a la forma de onda requerida matemáticamente. Si todos los especímenes sintéticos no han sido ensayados para cada juego de 100 ciclos de módulo resiliente, la prueba QC/QA se deberá realizar sobre los faltantes, con el fin de verificar el sistema de respuesta.
- 8.3** Extensómetros, TLDVs y celdas de carga se deben calibrar como lo recomiendan sus fabricantes.

9 CÁLCULOS

- 9.1** *Deformación instantánea* – Se recomienda realizar regresiones en tres porciones de la curva de deformación. La primera, llamada “1”, indica la porción recta de la trayectoria de descarga, la segunda (“2”) representa la porción curva que une la trayectoria de descarga con la de recuperación, y la tercera (“3”) corresponde a la porción de recuperación, como se muestra en la Figura 749 - 4:
- 9.1.1** Regresión lineal en la porción recta correspondiente a la trayectoria de descarga entre T_1 y T_2 de la Figura 749 - 5, relacionados con T_m (desplazamiento pico), T_a y T_b :

$$Y = a + bX$$

[749.5]

Donde: Y: Valor de deformación;

X: Tiempo;

a, b: Constantes de regresión.

- 9.1.2** Regresión en la parte curva que conecta la trayectoria recta de descarga con la porción de recuperación, dando lugar a la siguiente ecuación hiperbólica entre T_2 y T_c (40 % del período de reposo).

$$Y = a + \frac{b}{X} \quad [749.6]$$

Donde los parámetros tiene el mismo significado que en la ecuación precedente.

- 9.1.3** Regresión en la porción de recuperación entre 40 y 90 % del período de reposo (rango recomendado), que da lugar a una ecuación hiperbólica. La porción de recuperación corresponde al tiempo desde $[(0.4 \times 0.9 \text{ s}) + 0.1] = 0.46 \text{ s}$ hasta $[(0.9 \times 0.9 \text{ s}) + 0.1] = 0.91 \text{ s}$, y está limitada por T_c y T_d (Figura 749 - 5).

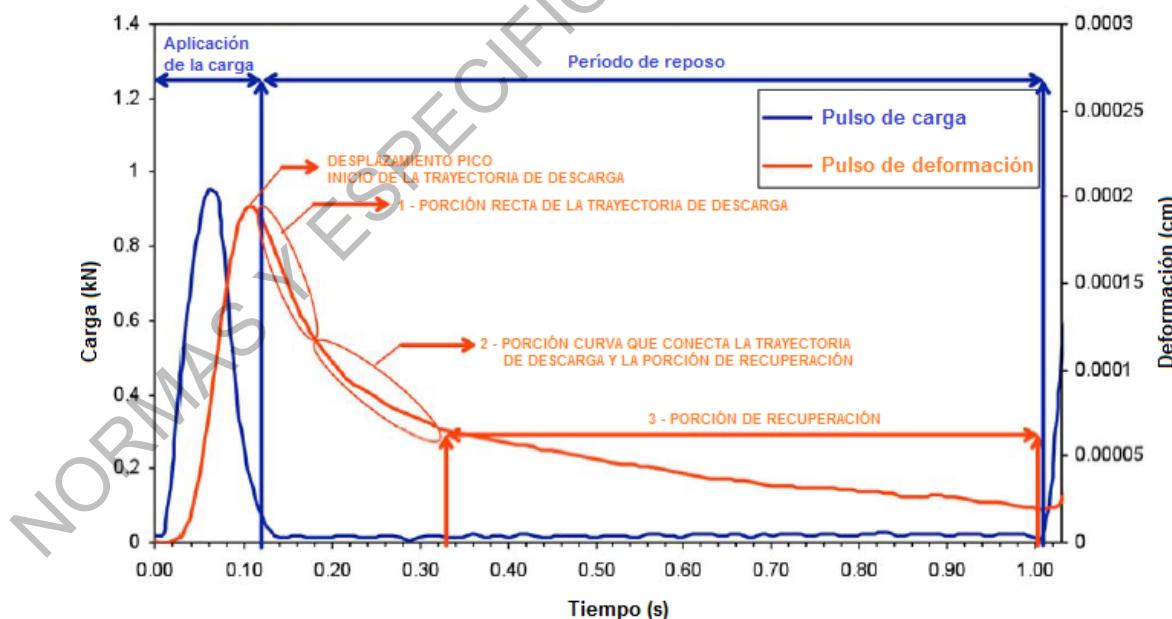


Figura 749 - 4. Regresiones en tres porciones de la curva de deformación

- 9.1.4** Se dibuja una tangente a esta hipérbola en el punto correspondiente al 55 % del período de reposo (punto recomendado) (T_{55}), que

corresponde al instante $[(0.9 \times 0.55) + 0.1] = 0.595s. La intersección de esta tangente con la prolongación de la recta de la trayectoria de descarga se usa para determinar el tiempo para la deformación instantánea. La ecuación de la trayectoria de descarga corresponde a la mitad del tiempo de carga ($0.5 \times 0.1 = 0.05$ s). Esta línea recta ocurre entre el tiempo de carga pico (T_m) más 0.005 (T_a) y el tiempo de carga pico más 0.05 s (T_b). Entonces, se selecciona el punto de la curva hipérbólica correspondiente al tiempo de la coordenada de la intersección (punto A en la Figura 749 - 5) para determinar la deformación instantánea, restando la deformación correspondiente al punto A en la curva de la deformación pico (Ver Figura 749 - 5).$

- 9.2 Deformación total** – Se determina de las gráficas deformación-tiempo, restando la deformación obtenida al final de un ciclo de carga-descarga, determinada tomando el promedio de los valores de deformación obtenidos para el tiempo comprendido entre el 85 y el 95 % del período de reposo a partir de los valores pico de deformación, como se muestra en la Figura 749 - 6. Ellos corresponden a los tiempos $[(0.9 \times 0.85) + 0.1] = 0.865$ s, y $[(0.9 \times 0.95) + 0.1] = 0.955$ s, designados como T_e y T_f en la Figura 749 - 6. Este valor incluye tanto la deformación instantánea recuperable, como la deformación recuperable retardada durante la porción del período de reposo de un ciclo.

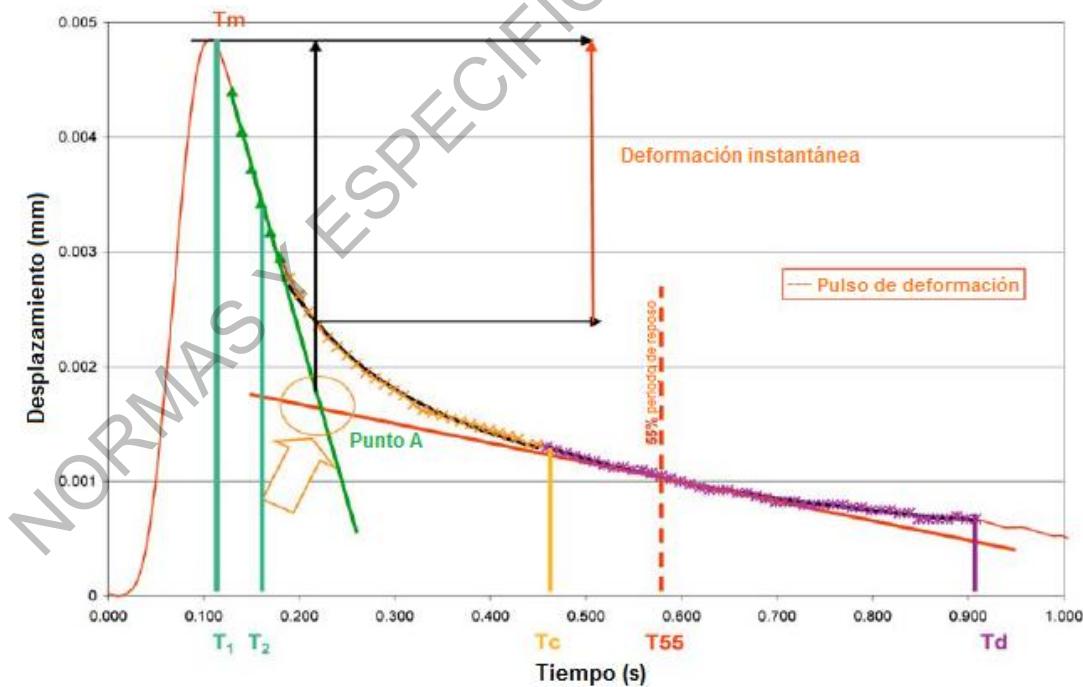


Figura 749 - 5. Determinación de la deformación instantánea

- 9.3** Las ecuaciones que se presentan en seguida están proyectadas para el cálculo de valores instantáneos o totales, dependiendo de los valores de deformación que se utilicen. Se considera que la deformación horizontal es positiva y la vertical negativa. El valor de la carga se asume positivo.

9.3.1 Relación de Poisson – Se debe calcular a partir de las deformaciones vertical y horizontal, con la ecuación que se presenta a continuación. De acuerdo con Zhang et al (1997), si la relación entre el ancho de la banda de carga y el diámetro del espécimen es 1/8, la relación de Poisson será independiente del diámetro del espécimen; no obstante, depende de la longitud de medición, de acuerdo con las constantes I1, I2, I3 e I4, presentadas en la Tabla 749 - 2.

$$\mu = \frac{I_4 - I_1 \times \left[\frac{\delta_v}{\delta_h} \right]}{I_3 - I_2 \times \left[\frac{\delta_v}{\delta_h} \right]} \quad [749.7]$$

Donde: μ : Relación de Poisson;

δ_v : Deformación vertical recuperable (instantánea o total), medida sobre el diámetro vertical del espécimen, mm (pg);

δ_h : Deformación horizontal recuperable (instantánea o total), medida sobre el diámetro horizontal del espécimen, mm (pg).

Tabla 749 - 2. Constantes para calcular el módulo resiliente y la relación de Poisson

| LONGITUD DE MEDICIÓN, COMO FRACCIÓN DEL DIÁMETRO DEL ESPÉCIMEN | I1 | I2 | I3 | I4 |
|--|----------|------------|------------|------------|
| 0.25 | 0.144357 | - 0.450802 | 0.155789 | - 0.488592 |
| 0.50 | 0.233936 | - 0.780056 | 0.307445 | - 1.069463 |
| 0.75 | 0.265925 | - 0.952670 | 0.430875 | - 1.934486 |
| 1.00 | 0.269895 | - 1.000000 | - 0.062745 | - 3.587913 |

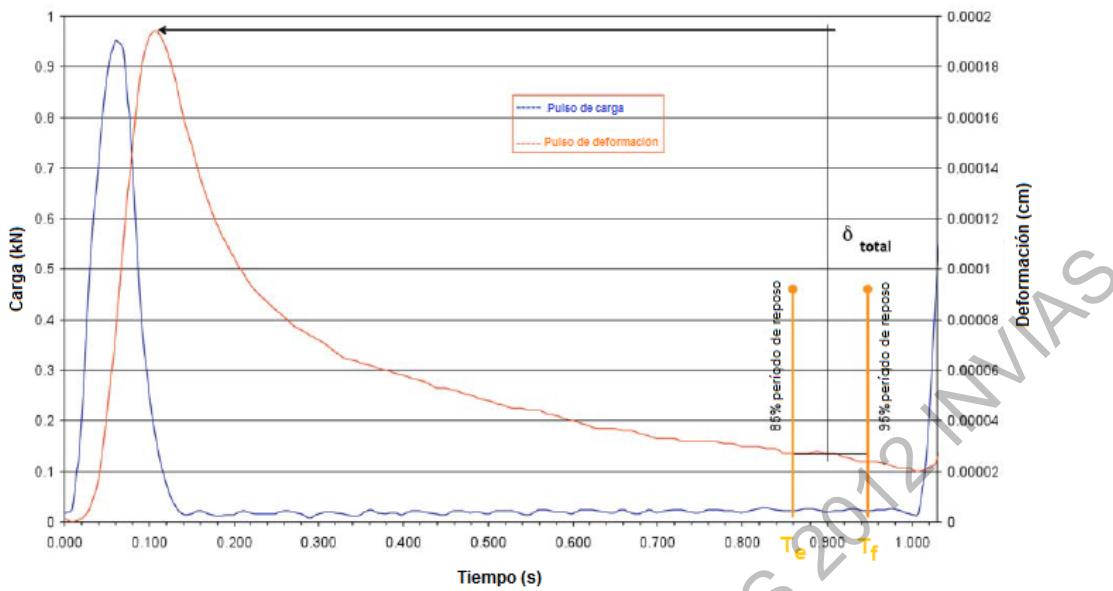


Figura 749 - 6. Determinación de la deformación total

- 9.3.1.1** El rango esperado para la relación de Poisson es 0.25 – 0.45. Si el valor calculado está por fuera de él, se deberá revisar el espécimen para ver si presenta alguna deformación visible y/o grietas debido a daño, y se presenta el informe correspondiente.
- 9.3.1.2** La relación de Poisson se debe calcular para cada juego de TLDVs (horizontal y vertical). Para el primer plano diametral se estiman dos relaciones, las cuales se obtienen de las dos caras del espécimen. Otro par de relaciones se obtiene al rotar la probeta, dando como resultado un total de cuatro relaciones de Poisson por espécimen.

- 9.3.2** *Módulo resiliente* – Se calcula a partir de la relación de Poisson obtenida en el numeral 9.3.1 y de la deformación horizontal (instantánea o total):

$$M_R = \frac{P_{\text{cíclica}}}{\delta_h \times t} (I_1 - I_2 \times \mu) \quad [749.8]$$

| | |
|--|--|
| Donde: M_R : | Módulo resiliente de elasticidad instantáneo o total, MPa, (lbf/pg ²); |
| δ_h : | Deformación horizontal recuperable (instantánea o total), mm (pg.); |
| μ : | Relación de Poisson instantánea o total; |
| t: | Espesor del espécimen, mm (pg.); |
| $P_{cíclica} = (P_{máx} - P_{contacto})$: | Carga cíclica aplicada al espécimen, N (lbf); |
| $P_{máx}$: | Carga máxima aplicada, N (lbf); |
| $P_{contacto}$: | Carga de contacto, N (lbf). |

9.3.2.1 Para cada deformación horizontal se debe usar su relación de Poisson correspondiente, por lo que se obtendrán cuatro valores de módulo resiliente (dos caras más dos rotaciones) para cada espécimen.

- 9.4** En la Figura 749 - 7 se muestra un diagrama de flujo para determinar la deformación instantánea.
- 9.5** En la Figura 749 - 8 se muestra un diagrama de flujo para determinar la deformación total.
- 9.6** En la Tabla 749 - 3 se presenta una recomendación sobre el tiempo para el cálculo del desplazamiento resiliente.

Tabla 749 - 3. Recomendaciones de tiempo para el desplazamiento resiliente

| RECOMENDACIONES DEL NCHRP RESEARCH RESULTS DIGEST No. 285, JANUARY 2004, PROJECT 1-28 A | | CONSIDERANDO UN PULSO DE CARGA DE 0.1 s Y UN TIEMPO DE REPOSO DE 0.9 s LOS TIEMPOS DEL CICLO TOTAL PARA LOS ESTIMATIVOS DE LA CURVA SON | |
|---|---------------------------|---|---|
| T_c | 40% del período de reposo | T_c | 0.46 s |
| T_d | 90% del período de reposo | T_d | 0.91 s |
| T_{55} | 55% del período de reposo | T_{55} | 0.595 s |
| T_e | 85% del período de reposo | T_e | 0.865 s |
| T_f | 95% del período de reposo | T_f | 0.955 s |
| T_1 | $T_m + T_a$ | T_a | 0.005 s |
| T_2 | $T_m + T_b$ | T_b | $\frac{1}{2} T_{pulso\ de\ carga}$ (cuando $T_{pulso\ de\ carga}$ es igual a 0.1 s, $T_b = 0.05$) |

10 INFORME

10.1 Se debe presentar la siguiente información general:

10.1.1 Identificación de la muestra.

10.1.2 Espesor promedio del espécimen de ensayo (t), redondeado a 0.254 mm (0.01").

10.1.3 Diámetro promedio del espécimen de ensayo (D), redondeado a 0.254 mm (0.01").

10.1.4 Resistencia a la tensión indirecta (inicial), redondeada a 1 MPa, de un espécimen comparable usado para seleccionar el nivel de esfuerzo (o de carga) para el ensayo.

10.1.5 Resistencia a la tensión indirecta (final), redondeada a 1 MPa, del espécimen luego de completado el ensayo de módulo resiliente.

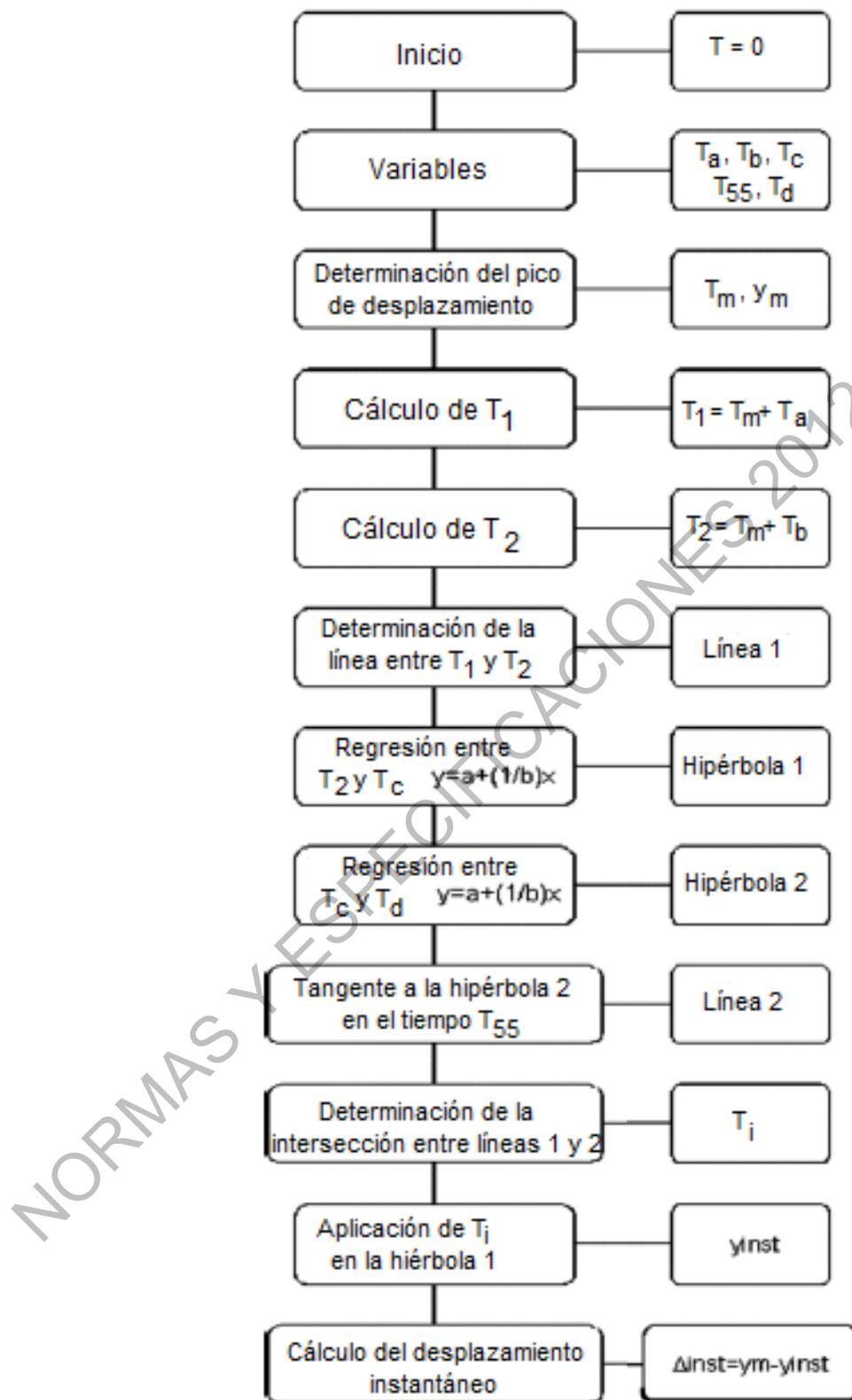


Figura 749 - 7. Diagrama de flujo para la determinación de la deformación instantánea

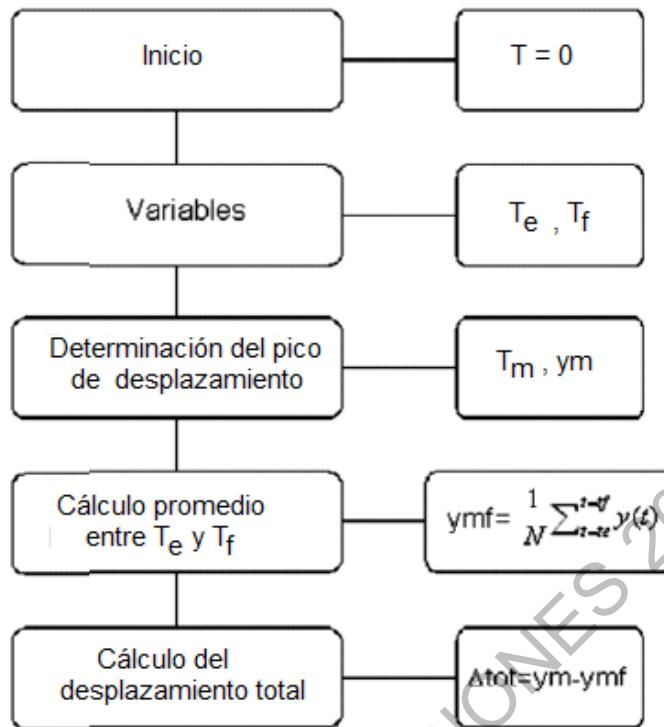


Figura 749 - 8. Diagrama de flujo para la determinación de la deformación total

10.1.6 Se puede presentar la siguiente información adicional, si se considera relevante:

10.1.6.1 Si se requirió el aserrado de núcleos.

10.1.6.2 Si el espécimen tenía alguna base oblicua (alejada de la perpendicularidad respecto del eje, en más de 0.5° o 3.175 mm (1/8") en una longitud de 304.8 mm (12"), al colocarlo sobre una superficie a nivel y medir la desviación de la perpendicularidad).

10.1.6.3 Si se usó un espécimen falso para monitorear la temperatura. Si no se usó, indicar el tiempo durante el cual se mantuvo el espécimen de prueba a la temperatura de ensayo en la cámara ambiental.

10.1.6.4 Si el ensayo no se pudo completar por daño o falla del espécimen.

10.1.6.5 Si había proyecciones o depresiones de más de 1.59 mm (1/16") en la superficie de ensayo y, sin embargo, el

espécimen se ensayó por no haber otro de reemplazo. En este caso, indicar la magnitud de las proyecciones o depresiones.

10.1.6.6 En el caso de núcleos, si se olvidó marcar la dirección del tránsito sobre ellos o si el ensayo no se realizó en la dirección marcada, por alguna razón.

10.2 Además, se debe presentar la siguiente información sobre los datos y los resultados del ensayo:

10.2.1 *Módulo resiliente instantáneo para cada espécimen:*

10.2.1.1 Los niveles de carga vertical ($P_{cíclica}$).

10.2.1.2 La carga de contacto ($P_{contacto}$) usada durante los últimos cinco ciclos de carga.

10.2.1.3 Deformaciones recuperables instantáneas horizontal y vertical, medidas durante los últimos cinco ciclos de carga.

10.2.1.4 Relaciones de Poisson instantáneas, calculadas durante los últimos cinco ciclos de carga.

10.2.1.5 Módulos resilientes instantáneos, calculados durante los últimos cinco ciclos de carga.

10.2.1.6 Valores promedio y desviaciones estándar de la relación de Poisson y del módulo resiliente instantáneos, para todas las réplicas usadas con un determinado tipo de mezcla.

10.2.2 *Módulo resiliente total para cada espécimen:*

10.2.2.1 Los niveles de carga vertical ($P_{cíclica}$).

10.2.2.2 La carga de contacto ($P_{contacto}$) usada durante los últimos cinco ciclos de carga.

10.2.2.3 Deformaciones recuperables totales horizontal y vertical, medidas durante los últimos cinco ciclos.

10.2.2.4 Relaciones de Poisson totales, calculadas durante los últimos cinco ciclos de carga.

10.2.2.5 Módulos resilientes totales, calculados durante los últimos cinco ciclos de carga.

10.2.2.6 Valores promedio y desviaciones estándar de la relación de Poisson y del módulo resiliente totales, para todas las réplicas usadas con un determinado tipo de mezcla.

10.2.3 Se debe obtener un total de 24 resultados, considerando tres réplicas, dos rotaciones y dos tiempos de recuperación (instantáneo o total).

11 PRECISIÓN Y SESGO

11.1 *Precisión:*

11.1.1 Se determinó que la desviación estándar de repetibilidad era 7 %, en ensayos realizados por triplicado sobre 6 muestras diferentes. La reproducibilidad aún no ha sido determinada. Por lo tanto, esta norma no se puede emplear para aceptar o rechazar un material con fines de pago.

11.1.2 Para el espécimen sintético seleccionado para QC/QA, dos resultados obtenidos por el mismo operador en diferentes instantes se deben considerar aceptables si no difieren en más de 5 %.

11.2 *Sesgo* – No se puede presentar información sobre sesgo, por cuanto no se dispone de un valor de referencia aceptado.

12 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 7369 – 11