

MODULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS

INV E – 156 – 13

1 OBJETO

- 1.1 Este método describe procedimientos para la determinación del módulo de resiliencia de suelos de subrasante y de materiales granulares de base y de subbase. Incluye la preparación de las muestras y el ensayo bajo condiciones que simulan, razonablemente, las características físicas y los estados de esfuerzos de los materiales en pavimentos flexibles sometidos a las cargas móviles del tránsito.
- 1.2 Los métodos descritos son aplicables a muestras inalteradas de subrasantes naturales y compactadas en el terreno; así como a muestras alteradas desuelos de subrasante y de materiales granulares, preparadas para el ensayo mediante compactación en el laboratorio.
- 1.3 En este método, los niveles de esfuerzo empleados para determinar el módulo resiliente tienen en cuenta la ubicación del espécimen dentro de la estructura del pavimento. Las muestras que representan las capas de base y de subbase se someten a estados de esfuerzos diferentes a los que se aplican a un material de subrasante. Generalmente, el tamaño del espécimen de ensayo depende del tipo de material, definido por su granulometría y su plasticidad.
- 1.4 El valor del módulo resiliente determinado por este método es una medida del módulo elástico de los materiales ensayados, reconociendo ciertas características de no linealidad.
- 1.5 Los valores del módulo resiliente se pueden emplear en conjunto con modelos de análisis de respuesta estructural, tanto para valorar la respuesta de los materiales ante la acción de las cargas, como para diseñar estructuras de pavimentos.
- 1.6 Esta norma reemplaza la norma INV E–156–07.

2 DEFINICIONES

- 2.1 *Materiales granulares de base y subbase* – Incluyen mezclas de suelo-agregado y agregados naturales y triturados. Excluyen el uso de cualquier tipo de agente

ligante o estabilizante. Estos materiales se clasifican en los tipos 1 y 2, definidos en los numerales 2.3 y 2.4.

- 2.2** *Subrasante* – Suelos que son preparados y compactados antes de colocar las capas de subbase y/o base. Estos materiales se clasifican, también, en los tipos 1 y 2 definidos en los numerales 2.3 y 2.4.
- 2.3** *Material Tipo 1* – Para el propósito de las pruebas de módulo resiliente, el material Tipo 1 incluye todos los granulares sin tratar de base y subbase y todos los de subrasante sin tratar, que cumplan con los siguientes requisitos: menos de 70 % pasa el tamiz de 2.00 mm (No. 10), menos del 20 % pasa el tamiz de 75 μm (No. 200) y el índice de plasticidad es menor o igual a 10 %. Los suelos clasificados como Tipo 1 se deberán moldear en moldes de 150 mm de diámetro.
- 2.4** *Material Tipo 2* – Para el propósito de las pruebas de módulo resiliente, el material Tipo 2 incluye todos los granulares sin tratar de base y subbase y todos los de subrasante sin tratar, que no cumplan los criterios para los materiales del Tipo 1. Las muestras de suelo no tratado tomadas con tubo de pared delgada (norma INV E-105), caen en la categoría Tipo 2.
- 2.5** *Forma de carga de medio seno verso* – Forma requerida para el pulso de carga. El pulso es de forma: $(1 - \cos \theta) / 2$, como se muestra en la Figura 156 - 1.
- 2.6** *Carga axial máxima aplicada ($P_{\text{máx}}$)* – Carga total aplicada a la muestra. Incluye la carga de contacto y la carga cíclica (resiliente).

$$P_{\text{máx}} = P_{\text{contacto}} + P_{\text{cíclica}} \quad [156.1]$$

- 2.7** *Carga de contacto (P_{contacto})* – Carga total aplicada a la muestra para mantener un contacto positivo entre ella y la platina cabezal.

$$P_{\text{contacto}} = 0.1 P_{\text{máx}} \quad [156.2]$$

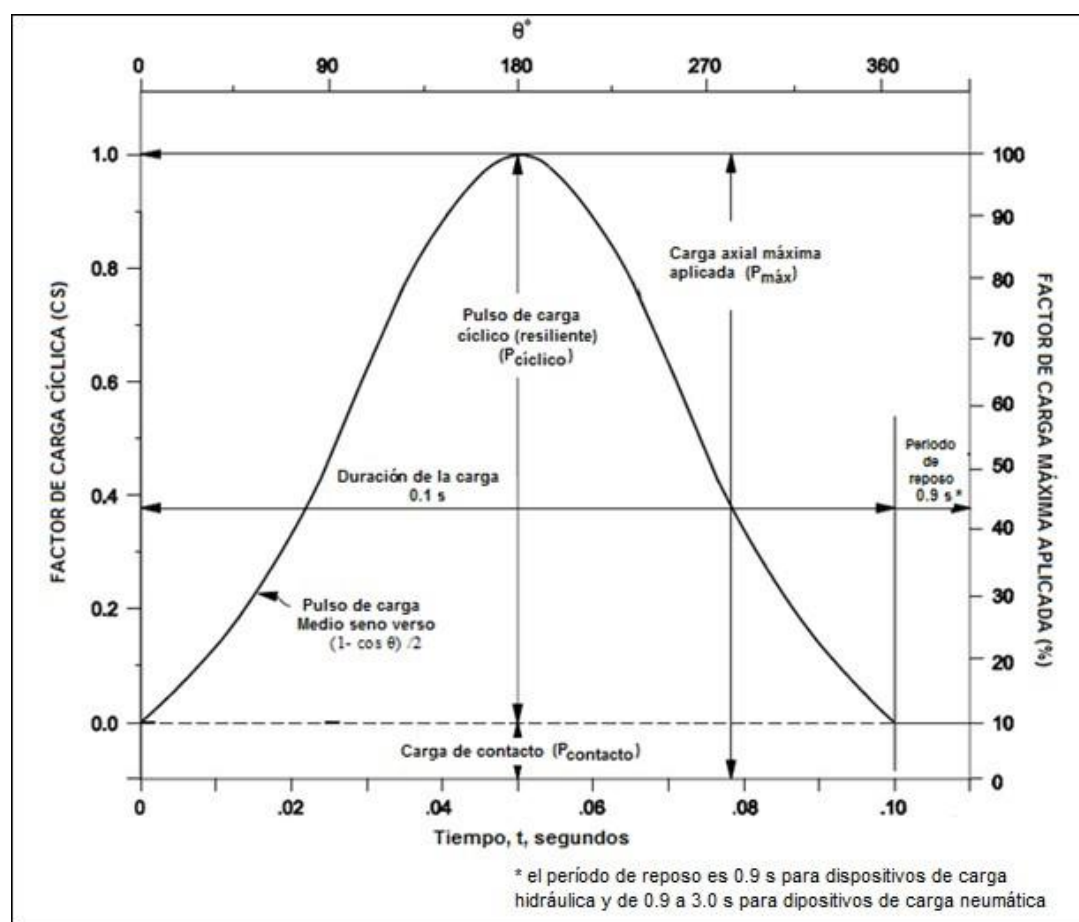


Figura 156 - 1. Definición gráfica de términos

- 2.8** *Esfuerzo axial máximo aplicado ($S_{máx}$)* – Esfuerzo total aplicado a la muestra, incluyendo el esfuerzo de contacto y el esfuerzo cíclico (resiliente):

$$S_{máx} = P_{máx}/A \quad [156.3]$$

Donde: A: Sección transversal inicial del espécimen.

- 2.9** *Esfuerzo axial cíclico ($S_{cíclico}$)* – Esfuerzo vertical cíclico (resiliente) aplicado en cada serie contemplada en la prueba.

$$S_{cíclico} = P_{cíclico}/A \quad [156.4]$$

- 2.10** *Esfuerzo de contacto (S_{contacto})* – Esfuerzo axial aplicado a la muestra, que se mantiene durante la prueba para asegurar el contacto entre la platina cabezal y el espécimen:

$$S_{\text{contacto}} = P_{\text{contacto}}/A \quad [156.5]$$

También,

$$S_{\text{contacto}} = 0.1 S_{\text{máx}} \quad [156.6]$$

- 2.11** *Esfuerzo radial total (S_3)* – Presión de confinamiento aplicada en la cámara triaxial (esfuerzo principal intermedio y menor).

- 2.12** *Deformación axial resiliente (ϵ_r)* – Deformación axial resiliente (recuperada) debida a $S_{\text{cíclico}}$.

- 2.13** *Deformación unitaria axial resiliente (ϵ_r)* – Deformación unitaria axial resiliente (recuperada) debida a $S_{\text{cíclico}}$:

$$\epsilon_r = \epsilon_r / L \quad [156.7]$$

Donde: L: Longitud inicial de la muestra de ensayo.

- 2.14** *Módulo resiliente (M_r)* – Es la relación entre las amplitudes del esfuerzo axial repetido y de la deformación unitaria axial resultante:

$$M_r = S_{\text{cíclico}} / \epsilon_r \quad [156.8]$$

- 2.15** *Duración de la carga* – Intervalo de tiempo durante el cual el espécimen es sometido a un esfuerzo desviador (usualmente 0.1 s).

- 2.16** *Duración del ciclo* – Intervalo de tiempo entre aplicaciones sucesivas de un esfuerzo axial cíclico (usualmente de 0.1 a 3.1 s, dependiendo del tipo de dispositivo de carga).

3 RESUMEN DEL MÉTODO

- 3.1** Se aplica un esfuerzo axial cíclico repetido, de magnitud, duración (0.1 s) y frecuencia fijas, a un espécimen cilíndrico de ensayo, debidamente preparado y acondicionado. Durante y entre las aplicaciones del esfuerzo dinámico desviador, el espécimen está sometido a un esfuerzo estático en su contorno, proporcionado por medio de una cámara de presión triaxial. Se mide la deformación axial total resiliente (recuperable) de respuesta del espécimen y se calcula el módulo resiliente relacionando el esfuerzo axial desviador con la deformación unitaria axial resultante.

4 IMPORTANCIA Y USO

- 4.1** El ensayo de módulo resiliente proporciona una relación básica entre el esfuerzo y la deformación de los materiales bajo cargas repetidas, aplicable a los modelos de análisis estructural de los sistemas multicapas de pavimentos.
- 4.2** También, proporciona un medio de evaluación de los materiales de construcción de pavimentos, incluyendo los suelos de subrasante, bajo una gran variedad de situaciones (humedad, densidad, etc.) y de estado de esfuerzos, que simulan las condiciones de trabajo de un pavimento cuando recibe las cargas móviles del tránsito.

5 EQUIPO

- 5.1** *Cámara de compresión triaxial* – La cámara de compresión triaxial se utiliza para contener la muestra y el fluido de confinamiento durante el ensayo. En la Figura 156 - 2 se muestra una cámara con TLDV (transductores lineales diferenciales variables) exteriores, para ser utilizada en el ensayo de resiliencia de suelos. La cámara es similar a muchas celdas triaxiales normales, excepto que es algo más grande para facilitar la acción de la celda de carga que es montada internamente y del equipo de medida de deformaciones, el cual tiene salidas adicionales para las guías eléctricas de los aparatos de medición.
- 5.1.1** Se puede utilizar aire como fluido confinante en la cámara triaxial.
- 5.1.2** La cámara puede ser acrílica, de policarbonato u otro material resistente que permita observar el espécimen durante el desarrollo del ensayo.

- 5.2** *Dispositivo de aplicación de carga* – La fuente externa de carga puede ser cualquier dispositivo capaz de producir ciclos repetidos de pulsos de carga de forma de medio seno verso, de las siguientes duraciones:

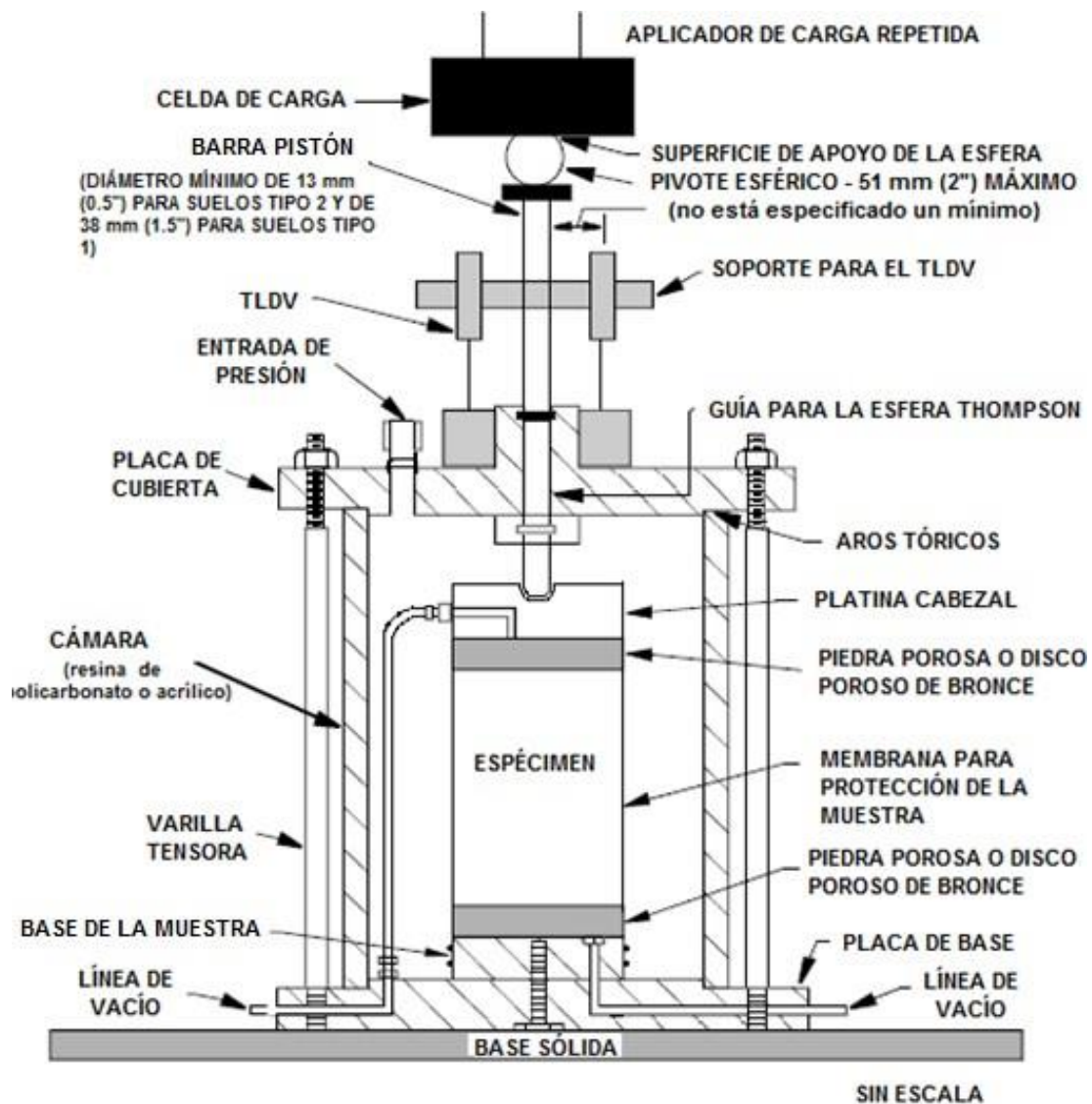
TIPO DE DISPOSITIVO DE APLICACIÓN DE CARGA	DURACIÓN DEL PULSO DE CARGA (s)	PERÍODO DE REPOSO (s)
Neumático	0.1	0.9 a 3.0
Hidráulico	0.1	0.9

- 5.2.1** El pulso de carga de forma de medio seno verso debe estar de acuerdo con la definición 2.5. Todo pre-acondicionamiento y ensayo se deben realizar empleando pulsos de carga de forma de medio seno verso. La forma de la onda de medio seno verso generada por el sistema y la forma de la onda de respuesta, se deben presentar en pantalla de modo que el operario pueda ajustar las amplificaciones, para asegurar que haya coincidencia durante el pre-acondicionamiento y el ensayo.

- 5.3** *Equipo de medida de la carga y de la respuesta del espécimen:*

- 5.3.1** El dispositivo para medir la carga axial es una celda electrónica de carga, colocada entre el aplicador de carga repetida y el vástago del pistón, como lo muestra la Figura 156 - 2. La celda de carga debe tener la siguiente capacidad:

DIÁMETRO DEL ESPÉCIMEN (mm)	CAPACIDAD MÁXIMA DE CARGA (kN)	EXACTITUD REQUERIDA (N)
71	2.2	± 4.5
100	8.0	± 10.0
152	22.24	± 22.24



NOTA 1: TLDV = Transductor Lineal Diferencial Variable

NOTA 2: Los extremos de los TLDV deben descansar sobre la celda de carga o sobre soportes unidos rigidamente a ella

Figura 156 - 2. Cámara triaxial típica con TLDV exteriores y celda de carga

Nota 1: Los requerimientos sobre capacidad de carga y exactitud presentan una relación aproximadamente lineal, cuando se dibujan contra la sección transversal del espécimen. Los requerimientos para las celdas de carga empleadas con otros diámetros de probetas deben conservar la misma relación lineal aproximada.

Nota 2: Durante los períodos de ensayo, la celda de carga se debe verificar cada quincena o luego de 50 ensayos, lo que ocurra primero, empleando un anillo de calibración. Otra posibilidad consiste en insertar otra celda calibrada y hacer mediciones independientes con las dos celdas para verificar la exactitud de las cargas. Por ningún motivo se deben realizar medidas de módulo resiliente si se encuentra que el sistema está por fuera de calibración o si la celda de carga no satisface los requisitos de tolerancia establecidos por el fabricante en relación con su exactitud.

5.3.2 Las presiones de la cámara de ensayo son controladas con manómetros convencionales de presión o transductores (aparatos medidores de presión) con exactitud de 0.7 kPa (0.1 lbf/pg²).

5.3.3 *Deformación axial* – El equipo para medir la deformación axial está constituido por dos TLDV fijados en lados opuestos de la barra pistón en el exterior de la cámara, como se muestra en el esquema de la Figura 156 - 2. Estos dos transductores deben quedar equidistantes de la barra y se deben apoyar sobre superficies fijas y duras, que sean perpendiculares a los ejes de los TLDV. Los TLDV deben ser accionados por resorte. Se requieren los siguientes rangos de TLDV:

DIÁMETRO DEL ESPÉCIMEN (mm)	RANGO (mm)
71	± 1
100	± 2.5
152	± 6

Nota 3: Los dos TLDV deben cumplir las siguientes especificaciones: (1) linealidad, ± 0.25 % de la escala total; (2) repetibilidad, ± 1 % de la escala total; (3) sensibilidad máxima, 2 mv/v (corriente alterna) o 5 mv/v (corriente continua).

Nota 4: El requerimiento sobre rango presenta una relación aproximadamente lineal cuando se dibuja contra la sección transversal del espécimen. Si se usan especímenes de otros diámetros, los requerimientos para los TLDV deben mantener la misma relación lineal.

5.3.3.1 Se debe mantener un contacto positivo entre las puntas de los TLDV y su superficie de apoyo durante todo el ensayo. Además, los TLDV deben estar conectados de manera que puedan ser leídos y analizados de manera independiente. Sus resultados se deben promediar para los fines de los cálculos posteriores.

Nota 5: La desalineación o la presencia de polvo en el vástago del TLDV hacen que pierda el movimiento libre, razón por la cual el vástago se debe revisar antes de la prueba. Es necesario aplicarle, de manera regular, un producto limpiador recomendado por el fabricante.

5.3.3.2 Los TLDV se deben calibrar cada quincena o luego de 50 ensayos de módulo resiliente, lo primero que ocurra, usando un micrómetro con una resolución compatible, o un juego de bloques de calibradores maquinados especialmente. Los ensayos de módulo no se deben adelantar si los TLDV no

satisfacen los requerimientos de tolerancia del fabricante en relación con su exactitud.

5.3.4 Es necesario mantener una señal de excitación adecuada y un campo de grabación adicionado a los dispositivos de medida para registrar, simultáneamente, las deformaciones y la carga axial. La señal debe ser clara y libre de ruido. Se deben usar cables blindados para las conexiones. Si se usa un filtro, su frecuencia debe ser tal, que no atenúe la señal. Se debe registrar un mínimo de 200 datos de cada TLDV durante un ciclo de carga.

5.4 *Equipo para la preparación del espécimen* – Se requiere una gran variedad de equipos para la preparación de muestras inalteradas para ensayos y para obtener especímenes compactados que sean representativos de las condiciones en el terreno. El empleo de diferentes materiales y de distintos métodos de compactación en el terreno, implica el uso de técnicas variadas de compactación en el laboratorio.

5.4.1 *Equipo para recortar especímenes de ensayo de muestras inalteradas de tubos de pared delgada* – Como el descrito en la norma INV E–153.

5.4.2 *Elementos misceláneos* – Calibrador micrométrico, regla metálica calibrada a 0.5 mm, membranas de caucho de 0.25 a 0.79 mm de espesor, aros tóricos, fuente de vacío con cámara de burbuja y regulador, membrana de expansión, piedras porosas (para suelos de subrasante), discos porosos de bronce (para materiales de subbase y base), balanzas, recipientes para determinar la humedad, horno, formatos para registro de datos, etc.

6 PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES DE ENSAYO

6.1 *Tamaño del espécimen* – La longitud del espécimen no deberá ser menor de dos veces el diámetro. Se deben usar diámetros de 71 u 86 mm en especímenes inalterados de suelos cohesivos (Tipo 2). Para materiales Tipo 1 o especímenes compactados Tipo 2, el diámetro mínimo del molde debe ser igual a 5 veces el tamaño máximo de las partículas del suelo. Si la partícula mayor del suelo excede el 25 % del diámetro del molde disponible, estas partículas se deben separar.

6.2 *Especímenes inalterados de subrasante* – Los especímenes inalterados se recortan y preparan como se describe en la norma INV E–153. La humedad de

las muestras de los tubos de pared delgada se debe determinar de acuerdo con la norma INV E-122. El espécimen recortado del tubo de pared delgada debe tener una longitud, al menos, igual al doble de su diámetro y deberá estar libre de defectos como grietas, bordes partidos que no se puedan arreglar durante la preparación, o partículas que sean sobretamaños en relación con el conjunto de la muestra.

6.3 *Preparación del suelo para especímenes compactados de laboratorio* – Tanto las muestras del Tipo 1 como las del Tipo 2, se deben preparar con una densidad y una humedad similares a las prevalecientes en el terreno. Deberán ser sometidas a compactación en el laboratorio todas las muestras de materiales granulares de base y subbase, así como las de subrasante de las cuales no se disponga de muestras inalteradas.

6.3.1 *Contenido de agua* – La humedad del espécimen compactado en el laboratorio debe corresponder a la obtenida en el campo cuando se realiza alguna de las pruebas de densidad en el terreno (normas INV E-161, INV E-162 o INV E-164). Si no se dispone de datos sobre la humedad in-situ, se deberá atender lo indicado en el numeral 6.3.3. La humedad de los especímenes compactados en el laboratorio no debe variar en más de 1.0 % para materiales de Tipo 1, ni más de 0.5 % para materiales de Tipo 2, respecto de la obtenida en el terreno.

6.3.2 *Densidad de compactación* – La densidad del espécimen compactado debe corresponder a la densidad húmeda obtenida cuando se realiza alguna de las pruebas de densidad en el terreno (normas INV E-161, INV E-162 o INV E-164). Si no se dispone de datos sobre la densidad in-situ, se deberá atender lo indicado en el numeral 6.3.3. La densidad húmeda de laboratorio no deberá diferir en más de 3 % de la obtenida en el terreno.

6.3.3 Si no se dispone de alguno de los datos de humedad o densidad, entonces se deberá utilizar el porcentaje de la densidad seca máxima y la correspondiente humedad óptima obtenidos según las normas INV E-141 o INV E-142, según lo que establezca la especificación aplicable de la entidad para la cual se realiza el ensayo. El contenido de agua no deberá variar en más de 1.0 % para materiales de Tipo 1, ni más de 0.5 % para materiales de Tipo 2, respecto de la óptima de objetivo. Así mismo, la densidad húmeda del espécimen compactado en el laboratorio no deberá diferir en más de 3 % de la densidad húmeda objetivo.

6.3.3.1 *Ejemplo* – Si la densidad húmeda deseada es 1950 kg/m^3 y la humedad deseada es 8.0 % para un material de Tipo 1, entonces la humedad para compactar la muestra se deberá encontrar entre 7.0 y 9.0 %. Para la misma humedad deseada en un material del Tipo 2, el contenido aceptable de humedad para compactar se deberá encontrar entre 7.5 y 8.5 %. En relación con la densidad húmeda para los dos tipos, el rango aceptable es $1892 - 2009 \text{ kg/m}^3$.

6.3.4 *Reconstitución de la muestra* – Los especímenes de los Tipos 1 y 2 se deben reconstituir como se indica en el Anexo A. La humedad objetivo y la densidad objetivo que se deben usar para determinar la cantidad requerida de material, son las mencionadas en el numeral 6.3. El Anexo A suministra guías para reconstituir el material, de manera de obtener una cantidad suficiente del mismo para preparar el espécimen en las condiciones deseadas de humedad y densidad. Tras completar este paso, se puede proceder a la compactación.

6.4 *Métodos y equipos de compactación para especímenes reconstituidos:*

6.4.1 *Compactación de especímenes de materiales Tipo 1* – El método general para compactar estos materiales se presenta en el Anexo B.

6.4.2 *Compactación de especímenes de materiales Tipo 2* – El método general para compactar estos materiales se presenta en el Anexo C. Si se va a emplear compactación vibratoria, se empleará el método del Anexo B.

6.4.3 Los especímenes preparados se deben proteger contra cambios de humedad, aplicándoles la membrana triaxial y ensayándolos en un plazo no mayor de cinco días. El espécimen se debe pesar antes del almacenamiento y en el momento mismo de retirarlo de éste, para verificar si se produjo alguna pérdida de humedad. Si la pérdida excede de 1 % para los materiales del Tipo 1 o de 0.5 % para los del Tipo 2, el espécimen se deberá descartar y será necesario preparar uno nuevo. Se permite la reutilización del material de los especímenes que no hayan sido sometidos a ensayo.

7 PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS DE SUBRASANTE

- 7.1** El procedimiento descrito en esta Sección se emplea para muestras de suelos de subrasante sin tratar, inalteradas o compactadas en el laboratorio. Pueden incluir especímenes del Tipo 1 de 150 mm de diámetro, o del Tipo 2 de 70 mm.
- 7.2** *Ensamble de la cámara triaxial* – Los especímenes recortados de muestras inalteradas y especímenes compactados en el laboratorio se colocan en la cámara triaxial y en el aparato de carga, según los siguientes pasos:
- 7.2.1** Se colocan una piedra porosa y un papel de filtro húmedo encima de la base de la muestra en la cámara triaxial, como se muestra en la Figura 156 - 2.
- 7.2.2** Se coloca cuidadosamente el espécimen sobre la piedra. Se coloca la membrana en un dilatador de membrana, se aplica vacío al dilatador, se coloca cuidadosamente la membrana sobre el espécimen, y se quitan el vacío y el dilatador de membrana. Se sella la membrana al pedestal (o a la placa de base) con un aro tórico u otro sello de presión.
- 7.2.3** Se colocan sobre la muestra un papel de filtro húmedo y la platina cabezal que tiene incorporada una piedra porosa húmeda, se dobla la membrana y se sella a la platina cabezal con un aro tórico u otro sello de presión.
- 7.2.4** Si el espécimen se ha compactado o almacenado con la membrana, y las piedras porosas y la muestra ya están ligadas a la membrana de caucho en su lugar, se omiten los pasos 7.2.1, 7.2.2 y 7.2.3. En cambio, se coloca el espécimen previamente ensamblado sobre la placa de base de la cámara triaxial.
- 7.2.5** Se conecta la línea de drenaje del fondo de la muestra a una fuente de vacío a través del punto medio de una cámara de burbujas. Se aplica un vacío de 7 kPa (1 lbf/pg²). Si hay burbujas, se buscan y corrigen los escapes. La existencia de un sello hermético asegura que la membrana permanezca en contacto firme con el espécimen. Los escapes a través de los agujeros que se forman en la membrana se pueden eliminar cubriendo la superficie de ésta con látex de caucho líquido o usando una segunda membrana.

- 7.2.6** Cuando se hayan eliminado los escapes, se desconecta el suministro de vacío y se colocan la cámara sobre la placa de base y la placa decubierta sobre la cámara. Se inserta el pistón de carga y se obtiene una conexión firme con la celda de carga. Se ajustan firmemente los tensores de la cámara.
- 7.2.7** Se desliza el ensamble para que quede en posición bajo el dispositivo de aplicación de carga axial. La correcta colocación de la cámara es extremadamente crítica para eliminar las fuerzas laterales en la barra pistón. Se acopla el dispositivo de carga al pistón de la cámara triaxial.
- 7.3** *Ejecución del ensayo de módulo resiliente* – Se requieren las siguientes etapas para efectuar el ensayo del módulo resiliente sobre un espécimen de subrasante instalado en la cámara triaxial y colocado bajo el aparato de carga:
- 7.3.1** Se abren todas las válvulas de drenaje que conducen al espécimen, para simular condiciones drenadas. La simulación de condiciones no drenadas requiere saturación previa, procedimiento de prueba que no está contemplado en esta norma.
- 7.3.2** Si la línea de suministro de la cámara de presión no está conectada, se conecta y se aplica una presión confinante de pre-acondicionamiento (presión de la cámara) de 41.4 kPa (6 lbf/pg²) al espécimen de ensayo. En cada secuencia de carga se debe mantener el esfuerzo axial de contacto de 10 % ± 0.7 kPa respecto del máximo esfuerzo axial aplicado.
- 7.3.2.1** Las cargas aplicadas a la barra pistón de la celda se deben ajustar a los esfuerzos mostrados en la Tabla 156 - 1, después de contabilizar la carga neta ascendente o descendente resultante, calculada como se indica a continuación:

$$F = (A \times P) - W \quad [156.9]$$

- Donde:
- F: Fuerza resultante;
- A: Sección transversal de la barra pistón;
- P: Presión de confinamiento;

W: Masa de la barra pistón y del sistema para medir deformación montado en el exterior del espécimen.

Tabla 156 - 1. Secuencia de ensayo para suelos de subrasante

Secuencia No.	Presión de cámara S_3		Esfuerzo axial máximo $S_{m\acute{a}x}$		Esfuerzo cíclico $S_{c\acute{i}clico}$		Esfuerzo constante $0.1 S_{m\acute{a}x}$		Número de aplicaciones de carga
	kPa	lbf/pg ²	kPa	lbf/pg ²	kPa	lbf/pg ²	kPa	lbf/pg ²	
0	41.4	6	27.6	4	24.8	3.6	2.8	.4	500-1000
1	41.4	6	13.8	2	12.4	1.8	1.4	.2	100
2	41.4	6	27.6	4	24.8	3.6	2.8	.4	100
3	41.4	6	41.4	6	37.3	5.4	4.1	.6	100
4	41.4	6	55.2	8	49.7	7.2	5.5	.8	100
5	41.4	6	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
6	27.6	4	13.8	2	12.4	1.8	1.4	.2	100
7	27.6	4	27.6	4	24.8	3.6	2.8	.4	100
8	27.6	4	41.4	6	37.3	5.4	4.1	.6	100
9	27.6	4	55.2	8	49.7	7.2	5.5	.8	100
10	27.6	4	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
11	13.8	2	13.8	2	12.4	1.8	1.4	.2	100
12	13.8	2	27.6	4	24.8	3.6	2.8	.4	100
13	13.8	2	41.4	6	37.3	5.4	4.1	.6	100
14	13.8	2	55.2	8	49.7	7.2	5.5	.8	100
15	13.8	2	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100

Nota: Las secuencias de carga 14 y 15 no se usan en materiales clasificados como Tipo 1

7.3.3 Acondicionamiento – Se comienza el ensayo aplicando 500 repeticiones de una carga equivalente a un esfuerzo axial máximo de 27.6 kPa (4 lbf/pg²) y un esfuerzo cíclico correspondiente de 24.8 kPa (3.6 lbf/pg²), usando un pulso de carga medio seno verso como se describe en el numeral 5.2. Si la muestra todavía está experimentando disminución de altura al final de las 500 repeticiones del período de acondicionamiento, se debe continuar el ciclo de esfuerzo hasta completar 1000 repeticiones antes de comenzar el ensayo, como lo indica la serie 0 de la Tabla 156 - 1.

7.3.3.1 La anterior secuencia de esfuerzos constituye el acondicionamiento de la muestra; esto es, la eliminación de los efectos del intervalo entre la compactación y la carga, y la eliminación de la carga inicial contra la recarga. Este acondicionamiento de carga ayuda, también, a disminuir los

efectos de un contacto inicialmente imperfecto entre las platinas de los extremos y el espécimen de ensayo.

- 7.3.3.2** Si la deformación unitaria vertical permanente alcanza 5 % durante el período de acondicionamiento, el proceso de acondicionamiento se da por terminado. Para muestras recompactadas, se debe repasar el proceso de compactación para identificar las razones por las cuales la muestra no alcanzó una compactación apropiada. Si, como consecuencia de este repaso, no se encuentra ninguna explicación, se deberá refabricar el material y ensayarlo por segunda vez. Si alcanza de nuevo una deformación unitaria vertical permanente de 5 % durante el acondicionamiento, el ensayo se dará por finalizado y se hará la anotación correspondiente en el informe.
- 7.3.4** *Ensayo del espécimen* – El ensayo se realiza siguiendo la secuencia de carga indicada en la Tabla 156 - 1. Se comienza por disminuir el esfuerzo máximo axial a 13.8 kPa (2 lbf/pg²) (Secuencia No. 1 – Tabla 156 - 1) y se ajusta la presión de cámara a 41.4 kPa (6 lbf/pg²).
- 7.3.5** Se aplican 100 repeticiones del esfuerzo desviador cíclico, 12.4 kPa (1.8 lbf/pg²), usando el pulso de carga de forma de seno medio verso, con las duraciones descritas en el numeral 5.2. Se registra en un formulario apropiado la deformación recuperable para los últimos cinco ciclos, separadamente para cada TLDV y el promedio de los dos TLDV (Ver Tabla 156 - 3).
- 7.3.6** Se aumenta la carga máxima axial a 27.6 kPa (4 lbf/pg²) (Secuencia No. 2) y se repite lo indicado en el paso 7.3.5 para el nuevo nivel de esfuerzo.
- 7.3.7** Se continúa el ensayo con las secuencias de carga restantes (Tabla 156 - 1), registrando la deformación vertical recuperada. Si en algún momento la deformación unitaria permanente de la muestra excede el 5 %, se debe parar la prueba y reportar el resultado en el informe.
- 7.3.8** Al terminar la prueba del ensayo del módulo resiliente, se verifica la deformación vertical permanente a la cual fue sometido el espécimen durante la porción del módulo resiliente del ensayo. Si ella no excedió de 5 % y si se desea obtener información sobre la resistencia, se continúa con el procedimiento de ensayo de corte rápido (numeral

7.3.9). Si, por el contrario, se excedió el 5 %, la prueba se da por concluida y no se realiza ningún ensayo adicional diferente del indicado en el numeral 7.3.11.

7.3.9 *Prueba rápida de corte* – Se aplica al espécimen una presión de cámara de 27.6 kPa (4 lbf/pg²). Se aplica carga axial por el método de deformación controlada, a una velocidad de 1 % de deformación por minuto. Se continúa cargando hasta que (1) la carga decrezca con un incremento de deformación, (2) se alcance el 5 % de deformación, o (3) se alcance la capacidad de la celda de carga. Los datos internos del transductor de deformación y de la celda de carga se deben usar para registrar la deformación del espécimen y las cargas en intervalos máximos de 3 segundos.

7.3.10 Una vez concluida la prueba de corte triaxial, se reduce la presión de confinamiento a cero y se remueve la muestra de la cámara.

7.3.11 Se retira la membrana del espécimen y usa la totalidad de éste para determinar el contenido de agua, de acuerdo con la norma INV E-122.

7.3.12 Se dibuja la curva esfuerzo-deformación del espécimen en la prueba triaxial de corte.

8 PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE MATERIALES DE BASE Y SUBBASE

8.1 El procedimiento descrito en esta Sección aplica a todos los materiales granulares de base y subbase. Incluye especímenes de materiales clasificados en los Tipos 1 y 2.

8.2 *Ensamble de la cámara triaxial* – Cuando se completa la compactación, se colocan el disco poroso de bronce y el cabezal sobre la superficie superior del espécimen. Se debe rodar la membrana de caucho fuera del borde del molde y sobre el cabezal de la muestra. Si el cabezal de la muestra sobresale del borde del molde, la membrana se deberá sellar herméticamente contra el cabezal con un aro tórico. Si no sobresale, el sellado se puede aplicar después. Se instala el espécimen en la cámara del triaxial como se indica en los numerales 7.2.1 a 7.2.7.

8.2.1 Se conecta la línea de suministro de presión a la cámara y se aplica una presión de confinamiento de 103.4 kPa (15 lbf/pg²).

8.2.2 Se suspende el suministro del vacío de la entrada de saturación de vacío y se abren las válvulas de drenaje a la presión atmosférica.

8.3 *Ejecución del ensayo de módulo resiliente* – Después de que se haya preparado el espécimen de ensayo y que se haya colocado en el dispositivo de carga como se describe en el numeral 7.2.1, se necesitan los siguientes pasos para efectuar el ensayo de módulo resiliente:

8.3.1 Si todavía no se ha hecho, se ajusta la posición del dispositivo de carga axial o el soporte de la base de la cámara triaxial en cuanto sea necesario, para acoplar el pistón del dispositivo de generación de carga y el pistón de la cámara triaxial. El pistón de la cámara triaxial deberá quedar firmemente apoyado sobre la celda de carga. En cada secuencia de carga se debe mantener un esfuerzo axial de contacto que sea $10\% \pm 0.7$ kPa del esfuerzo axial máximo aplicado.

8.3.1.1 Las cargas aplicadas con la barra pistón de la celda superior se deben ajustar a los esfuerzos mostrados en la Tabla 156 - 2, después de contabilizar la carga neta ascendente o descendente resultante, calculada como se indica a continuación:

$$F = (A \times P) - W \quad [156.10]$$

Donde: F: Fuerza resultante;

A: Sección transversal de la barra pistón;

P: Presión de confinamiento;

W: Masa de la barra pistón y del sistema para medir deformación montado en el exterior del espécimen.

8.3.2 Se ajustan los dispositivos de registro de datos para los TLDV y la celda de carga, si se requiere.

8.3.3 *Acondicionamiento* - Se coloca una presión de confinamiento de 103.4 kPa (15 lbf/pg²) y se aplica un mínimo de 500 repeticiones de una carga equivalente al máximo esfuerzo axial de 103.4 kPa y el correspondiente al esfuerzo cíclico de 93.1 kPa (13.5 lbf/pg²), de acuerdo con la

secuencia 0 de la Tabla 156 - 2, usando un pulso de carga medio seno verso, como se describe en el numeral 5.2. Si la muestra todavía está experimentando disminución de longitud al final de las 500 repeticiones, se deberá continuar hasta completar 1000, como lo indica la secuencia 0 de la Tabla 156 - 2, antes comenzar el ensayo.

8.3.3.1 La anterior secuencia de esfuerzos constituye el acondicionamiento de la muestra, esto es, la eliminación de los efectos del intervalo entre la compactación y la carga, y la eliminación de la carga inicial contra la recarga. Este acondicionamiento de carga ayuda, también, a disminuir los efectos de un contacto inicialmente imperfecto entre las platinas de los extremos y el espécimen de ensayo. Las válvulas de drenaje se deben abrir a la presión atmosférica durante la prueba de módulo resiliente. Esto simulará las condiciones de drenaje. La simulación de la condición no drenada requiere saturación previa. Tal procedimiento no está contenido en este método.

Tabla 156 - 2. Secuencia de ensayo para materiales de base/subbase

Secuencia No.	Presión de cámara S_3		Esfuerzo axial máximo $S_{m\acute{a}x}$		Esfuerzo cíclico $S_{c\acute{i}clico}$		Esfuerzo constante $0.1 S_{m\acute{a}x}$		Número de aplicaciones de carga
	kPa	lbf/pg ²	kPa	lbf/pg ²	kPa	lbf/pg ²	kPa	lbf/pg ²	
0	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	500-1000
1	20.7	3	20.7	3	18.6	2.7	2.1	.3	100
2	20.7	3	41.4	6	37.3	5.4	4.1	.6	100
3	20.7	3	62.1	9	55.9	8.1	6.2	.9	100
4	34.5	5	34.5	5	31.0	4.5	3.5	.5	100
5	34.5	5	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
6	34.5	5	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
7	68.9	10	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
8	68.9	10	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
9	68.9	10	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
10	103.4	15	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
11	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
12	103.4	15	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
13	137.9	20	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
14	137.9	20	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
15	137.9	20	275.8	40	248.2	36.0	27.6	4.0	100

8.3.3.2 Si la deformación permanente total alcanza 5 % durante el acondicionamiento, el proceso de acondicionamiento se debe

terminar. Se debe repasar el proceso de compactación para identificar las razones por las cuales la muestra no alcanzó una compactación apropiada. Si, como consecuencia de este repaso, no se encuentra ninguna explicación, se deberá refabricar el material y ensayarlo por segunda vez. Si alcanza de nuevo una deformación unitaria vertical permanente de 5 % durante el acondicionamiento, el ensayo se dará por finalizado y se hará la anotación correspondiente en el informe.

- 8.3.4** *Prueba del espécimen* – La prueba se ejecuta siguiendo la secuencia de carga de la Tabla 156 - 2, usando un pulso de carga de forma de medio seno verso, como se describió anteriormente. Se reduce el esfuerzo axial máximo a 20.7 kPa (3 lbf/pg²) y se ajusta la presión de cámara a 20.7 kPa (3 lbf/pg²), (Secuencia No. 1, Tabla 156 - 2).
- 8.3.5** Se aplican 100 repeticiones del esfuerzo cíclico correspondiente, usando el pulso de carga descrito en el numeral 5.2. Se debe registrar en el formato correspondiente, la deformación recuperable de los últimos cinco ciclos para cada LVDT y la deformación promedio para los dos LVDT (Ver Tabla 156 - 3).
- 8.3.6** Se continúa con la secuencia No. 2, incrementando el esfuerzo axial máximo a 41.4 kPa (6 lbf/pg²) y se repite el paso 8.3.5 para este nuevo nivel de esfuerzo.
- 8.3.7** Se continúa la prueba con las restantes secuencias de la Tabla 156 - 2 (secuencias 3 a 15), registrando la deformación vertical recuperada. Si para algún tiempo de carga, la deformación unitaria permanente total excede el 5 %, se debe parar la prueba y hacer la anotación correspondiente.
- 8.3.8** Al terminar la prueba del ensayo del módulo resiliente, se verifica la deformación vertical permanente a la cual fue sometido el espécimen durante la porción del módulo resiliente del ensayo. Si ella no excedió de 5 % y si se desea obtener información sobre la resistencia, se continúa con el procedimiento de ensayo de corte rápido (numeral 8.3.9). Si, por el contrario, se excedió el 5 %, la prueba se da por concluida y no se realiza ningún ensayo adicional diferente del indicado en el numeral 8.3.11.

8.3.9 Prueba de rápida de corte – Se aplica una presión de cámara de 34.5 kPa (5 lbf/pg²) al espécimen. Se aplica carga axial por el método de deformación controlada, a una velocidad de 1% de deformación por minuto. Se continúa cargando hasta que (1) la carga decrezca con un incremento de deformación, (2) se alcance el 5 % de deformación, o (3) se alcance la capacidad de la celda de carga. Los datos internos del transductor de deformación y de la celda de carga se deben usar para registrar la deformación del espécimen y las cargas en intervalos máximos de 3 segundos.

8.3.10 Una vez concluida la prueba de corte triaxial, se reduce la presión de confinamiento a cero y se remueve la muestra de la cámara.

8.3.11 Se retira la membrana del espécimen y usa la totalidad de éste para determinar el contenido de agua de acuerdo con la norma INV E-122.

8.3.12 Se dibuja la curva esfuerzo-deformación del espécimen en la prueba triaxial de corte.

9 CÁLCULOS

9.1 Los cálculos se efectúan empleando una disposición tabular a partir de un formato apropiado (Ver Tabla 156 - 3). Se debe calcular el valor del módulo resiliente para cada uno de los cinco últimos ciclos de cada secuencia de carga. Estos valores se promedian después en una hoja de cálculos.

Tabla 156 - 3. Reporte para la prueba de módulo resiliente en suelos de subrasante y materiales no tratados de base/subbase

COLUMNA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PARÁMETRO	Presión de cámara	Esfuerzo axial máximo nominal	Ciclo No.	Carga máxima axial real	Carga cíclica aplicada real	Carga de contacto aplicada real	Esfuerzo máx. axial aplicado real	Esfuerzo cíclico aplicado real	Esfuerzo contacto aplicado real	Deformación resiliente Lectura TLDV No. 1	Deformación resiliente Lectura TLDV No. 2	Deformación resiliente promedio	Deformación resiliente unitaria	Módulo resiliente
DESIGNACIÓN	S ₃	S _{máx}	C _i	P _{máx}	P _{cíclico}	P _{contacto}	S _{máx}	S _{cíclico}	S _{contacto}	H ₁	H ₂	H _{prom.}	ε _r	M _r
UNIDAD	kPa	kPa	---	N	N	N	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	mm/mm	MPa
PRECISIÓN	-----	-----	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---
ÚLTIMOS CINCO CICLOS	41.4	13.8	1	57.5	51.8	5.7	13.8	12.4	1.4	.01118	.01120	.01119	.000079	157.0
			2	57.0	51.3	5.7	13.7	12.3	1.4	.01120	.01123	.01122	.000079	155.4
			3	58.0	52.2	5.8	13.9	12.5	1.4	.01118	.01122	.01120	.000079	158.1
			4	57.5	51.8	5.7	13.8	12.4	1.4	.01116	.01119	.01118	.000079	157.2
			5	57.7	51.9	5.8	13.8	12.4	1.4	.01119	.01119	.01119	.000079	157.0
	PROMEDIO			57.5	51.8	5.7	13.8	12.4	1.4	.01118	.01121	.01119	.000079	157.0
	DESV. ESTÁNDAR			0.4	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	.00001	.00002	.00001	.000000	1.0

10 INFORME

10.1 En todos los informes debe aparecer la identificación del espécimen, el tipo de material (Tipo 1 o Tipo 2) y fecha de ensayo. El informe debe incluir, además, los formularios cuyos modelos se muestran en las Tablas 156 - 3, 156 - 4 y 156 - 5.

10.1.1 El formulario para el cálculo del módulo resiliente (Tabla 156 - 3) se diligencia de la siguiente manera:

10.1.1.1 *Columna 1* – Se anota la presión de cámara para la secuencia de ensayo. Solo se requiere anotar la información correspondiente a los últimos cinco ciclos. El valor debe corresponder, exactamente, a uno de los niveles de presión de cámara mostrados en la Tabla 156 - 1 (subrasantes) o en la Tabla 156 - 2 (base/subbase).

10.1.1.2 *Columna 2* – Se anota el esfuerzo cíclico axial nominal para la secuencia de ensayo. Solo se requiere anotar la información correspondiente a los últimos cinco ciclos. El valor debe corresponder, exactamente, a uno de los esfuerzos cíclicos axiales nominales mostrados en la Tabla 156 - 1 (subrasantes) o en la Tabla 156 - 2 (base/subbase).

10.1.1.3 *Columnas 4 a 9* – Se anotan las magnitudes de las cargas y de los esfuerzos reales aplicados durante cada uno de los últimos cinco ciclos de carga.

10.1.1.4 *Columnas 10 a 12* – Se anota la deformación axial resiliente de la muestra para cada TLDV durante los últimos cinco ciclos (columnas 10 y 11). El promedio de los valores de respuesta se anota en la columna 12. Este valor se usa para calcular la deformación unitaria axial del material.

10.1.1.5 *Columna 13* – Se anota la deformación unitaria axial paracada uno de los últimos cinco ciclos. Este valor se calcula dividiendo cada valor de la columna 12 por la longitud original del espécimen, L_0 , dato que deberá aparecer en la Tabla 156 - 4 (especímenes recompactados) o en la Tabla 156 - 5 (especímenes de tubo de pared delgada).

10.1.1.6 Columna 14 – Se calcula el módulo resiliente para cada uno de los últimos cinco ciclos, dividiendo cada valor de la columna 8 por el correspondiente de la columna 13.

10.1.1.7 Promedio – Se saca el promedio de los datos de cada columna durante los últimos cinco ciclos.

10.1.1.8 Desviación estándar – Se calcula la desviación estándar de los valores de cada columna durante los últimos cinco ciclos, con la ecuación:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad [156.11]$$

10.1.2 Los formularios con la información básica relacionada con los especímenes recompactados y los provenientes de tubos de pared delgada (Tablas 156 - 4 y 156 - 5, respectivamente), se deben llenar con la información solicitada en ellos y la adicional que se considere necesaria.

11 NORMAS DE REFERENCIA

AASHTO T 307 – 99 (2007)

Tabla 156 - 4. Información sobre muestras recompactadas

1 FECHA DE MUESTREO

2 NÚMERO DE MUESTRA

3 TIPO DE MATERIAL (tipo 1 o Tipo 2):

4 INFORMACIÓN SOBRE EL ENSAYO
 PRE-ACONDICIONAMIENTO – MÁS DE 5 % DE DEFORMACIÓN PERMANENTE (SÍ O NO):
 ENSAYO - MÁS DE 5 % DE DEFORMACIÓN PERMANENTE (SÍ O NO):
 ENSAYO – NÚMERO DE SECUENCIAS DE CARGA COMPLETADAS (0 – 15):

5 INFORMACIÓN SOBRE LA MUESTRA
 DIÁMETRO, mm
 PARTE SUPERIOR:
 PARTE MEDIA:
 PARTE SUPERIOR:
 PROMEDIO:
 ESPESOR DE MEMBRANA (1), mm:
 ESPESOR DE MEMBRANA (2), mm:
 DIÁMETRO NETO, mm:
 ALTURA DE LA MUESTRA CON TAPA Y BASE, mm:
 ALTURA DE TAPA Y BASE, mm:
 LONGITUD INICIAL L_0 , mm:
 ÁREA INICIAL A_0 , mm²:
 VOLUMEN INICIAL $A_0 L_0$, mm³:

6 MASA DE LA MUESTRA
 MASA INICIAL DEL RECIPIENTE MÁS EL SUELO HÚMEDO, g:
 MASA FINAL DEL RECIPIENTE MÁS EL SUELO HÚMEDO, g:
 MASA DEL SUELO USADO, g:

7 PROPIEDADES DEL SUELO
 HUMEDAD IN-SITU, % (INDICAR MÉTODO DE MEDIDA):
 DENSIDAD HÚMEDA IN-SITU, kg/m³ (INDICAR MÉTODO DE MEDIDA):
 o
 HUMEDAD ÓPTIMA, %:
 DENSIDAD SECA MÁXIMA, kg/m³ (INDICAR MÉTODO DE MEDIDA):
 95 % DENSIDAD SECA MÁXIMA, kg/m³:

8 PROPIEDADES DE LA MUESTRA
 HUMEDAD DE COMPACTACIÓN, %:
 DENSIDAD DE COMPACTACIÓN, kg/m³:

9 ENSAYO DE CORTE RÁPIDO
 SE ADJUNTA GRÁFICA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (SÍ O NO):
 RESISTENCIA MÁXIMA AL CORTE, kPa:
 LA MUESTRA ALCANZÓ LA FALLA DURANTE LA PRUEBA (SÍ O NO):

10 FECHA DE ENSAYO _____

OBSERVACIONES _____

OPERARIO: _____

FECHA: _____

Tabla 156 - 5. Información sobre muestras de tubo de pared delgada

- 1 FECHA DE MUESTREO**
- 2 NÚMERO DE MUESTRA**
- 3 TIPO DE MATERIAL (tipo 1 o Tipo 2):**
- 4 DISTANCIA APROXIMADA DE LA SUBRASANTE AL PUNTO DE MUESTREO, m:**
- 5 INFORMACIÓN SOBRE EL ENSAYO**
 PRE-ACONDICIONAMIENTO – MÁS DE 5 % DE DEFORMACIÓN PERMANENTE (SÍ O NO):
 ENSAYO - MÁS DE 5 % DE DEFORMACIÓN PERMANENTE (SÍ O NO):
 ENSAYO – NÚMERO DE SECUENCIAS DE CARGA COMPLETADAS (0 – 15):
- 6 INFORMACIÓN SOBRE LA MUESTRA**
 DIÁMETRO, mm
 PARTE SUPERIOR:
 PARTE MEDIA:
 PARTE SUPERIOR:
 PROMEDIO:
 ESPESOR DE MEMBRANA (1), mm:
 ESPESOR DE MEMBRANA (2), mm:
 DIÁMETRO NETO, mm:
 ALTURA DE LA MUESTRA CON TAPA Y BASE, mm:
 ALTURA DE TAPA Y BASE, mm:
 LONGITUD INICIAL L_0 , mm:
 ÁREA INICIAL A_0 , mm²:
 VOLUMEN INICIAL $A_0 L_0$, mm³:
 MASA INICIAL, g:
- 7 PROPIEDADES DEL SUELO**
 HUMEDAD IN-SITU, % (INDICAR MÉTODO DE MEDIDA):
 HUMEDAD DESPUÉS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE, %:
 DENSIDAD HÚMEDA, kg/m³
 DENSIDAD SECA, kg/ m³
- 8 ENSAYO DE CORTE RÁPIDO**
 SE ADJUNTA GRÁFICA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (SÍ O NO):
 RESISTENCIA MÁXIMA AL CORTE, kPa:
 LA MUESTRA ALCANZÓ LA FALLA DURANTE LA PRUEBA (SÍ O NO):
- 9 FECHA DE ENSAYO** _____

OBSERVACIONES _____

OPERARIO: _____

FECHA: _____

ANEXO A

(Aplicación obligatoria)

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

A.1 Este anexo brinda guías para reconstituir el material a ser ensayado, de manera de producir un volumen suficiente para preparar el tipo de muestra apropiado (Tipo 1 o Tipo 2), con la densidad y la humedad deseadas.

A.1.1 *Acondicionamiento de la muestra* – Si la muestra de suelo está muy húmeda cuando se recibe del terreno, se secará hasta que se pueda disgregar con un palustre. El secado puede ser al aire o mediante el empleo de un aparato para secar, de tal forma que la temperatura no exceda de 60° C (140° F). La disgregación se hará evitando la reducción del tamaño natural de las partículas individuales. Para desmenuzar terrones arcillosos, se ha encontrado apropiado el empleo de algún elemento forrado en caucho para ejercer una presión moderada sobre las partículas retenidas en el tamiz de 4.75 mm (No. 4).

A.1.2 *Preparación de la muestra* - Se determina la humedad de la muestra, w_1 , mediante la norma INV E-122. La masa de la muestra para hallar humedad no deberá ser menor de 200 g para suelos con un tamaño máximo de partículas menor o igual a 4.75 mm (No. 4), ni de 500 g para suelos con tamaño máximo de partículas mayor que 4.75 mm (No. 4).

A.1.2.1 Se determina el volumen, V , del espécimen compactado que se va a preparar. La altura del espécimen compactado deberá ser ligeramente mayor que la requerida para el ensayo de resiliencia, para permitir el recorte de sus extremos, si es necesario. La compactación de especímenes con relación altura/diámetro entre 2.1 y 2.2 resulta adecuada para este propósito.

A.1.2.2 Se determina la masa de los sólidos del suelo secado al horno, W_s , requerida para obtener la masa unitaria seca (ρ_d) deseada, así:

$$W_s \text{ (lb)} = \rho_d \text{ (lb/pie}^3\text{)} \times V \text{ (pie}^3\text{)} \quad [156.12]$$

$$W_s (g) = W_s (lb) \times 454 \quad [156.13]$$

A.1.2.3 Se determina la masa del suelo secado al aire, W_{ad} , con humedad w_1 , requerida para obtener W_s . Se deberá dejar una cantidad adicional, W_{as} , de, por lo menos 500 g, para proporcionar material para la determinación de la humedad en el momento de compactación:

$$W_{ad} (g) = (W_s + W_{as}) \times (1 + w_1/100) \quad [156.14]$$

A.1.2.4 Se determina la masa del agua, W_{aw} , requerida para aumentar la humedad existente, w_1 , hasta la humedad deseada para la compactación, w (Ver numeral 6.3.3):

$$W_{aw} = (W_s + W_{as}) \times \frac{(w - w_1)}{100} \quad [156.15]$$

A.1.2.5 Se coloca el suelo con masa W_{ad} , determinada anteriormente, dentro de una bandeja para mezclar.

A.1.2.6 Se agrega al suelo en pequeñas dosis la masa de agua W_{aw} , y se mezcla completamente después de cada adición. Con este aporte de agua, la humedad del suelo pasa de w_1 a w .

A.1.2.7 Se coloca la mezcla en una bolsa plástica. Se sella la bolsa, se coloca ésta dentro de una segunda bolsa que también sesella. Se mantiene la muestra en estas condiciones entre 16 y 48 horas. Después del almacenamiento, se pesan el suelo húmedo y el recipiente, con aproximación al gramo más próximo, y se anota este valor en los formatos apropiados.

A.1.2.8 El material está ahora listo para la compactación.

ANEXO B

(Aplicación obligatoria)

COMPACTACIÓN DE SUELOS DE LOS TIPOS 1 Y 2 POR VIBRACIÓN

B.1 Objeto:

- B.1.1** Los suelos se pueden recompactar usando un molde partido y un vibrador. Se debe escoger un molde cuyo diámetro sea, como mínimo, cinco veces el tamaño máximo de las partículas del suelo a ensayar. Si el tamaño máximo de partícula excede el 25 % del diámetro del molde disponible de mayor tamaño, las partículas que no cumplan la relación deberán ser trituradas. La longitud de todos los especímenes deberá ser igual al doble de su diámetro.
- B.1.2** Los especímenes se deben compactar en seis capas en un molde partido, sobre la base del equipo triaxial mostrado en la Figura 156B -
1. Las fuerzas de compactación serán producidas por un martillo de impacto vibratorio con acción amasante, alimentado por aire o electricidad, y de tamaño suficiente para proporcionar a la muestra la densidad requerida sin deteriorar la membrana que la protege.

B.2 Equipo:

- B.2.1** *Un molde partido* – Con diámetro interior de 152.4 mm y una altura mínima de 381 mm (o una altura suficiente para permitir la conducción de la cabeza de compactación en la última capa).
- B.2.2** *Dispositivo de compactación vibratoria* – Martillo eléctrico giratorio o de demolición con una entrada nominal de 250 a 1200 vatios, capaz de aplicar 1800 a 3000 impactos por minuto. La cabeza de compactación debe tener un espesor mínimo de 13 mm y un diámetro no menor de 146 mm.

B.3 Procedimiento:

- B.3.1** Para el caso de platinas removibles, se ajusta la de fondo en su lugar en la base de la celda triaxial. Es esencial que se obtenga un sello hermético y que la interfaz de la platina de fondo constituya un cuerpo rígido, ya que los cálculos de deformación asumen que ella no tendrá ningún movimiento bajo carga.

- B.3.2** Se colocan las dos piedras porosas más la tapa, sobre la platina de fondo. Se determinan la altura total de la platina inferior, la tapa, y las piedras con aproximación a 0.25 mm.
- B.3.3** Se remueven la tapa de la muestra y la piedra porosa de bronce si ésta se usó. Se mide el espesor de la membrana de caucho con un medidor micrométrico

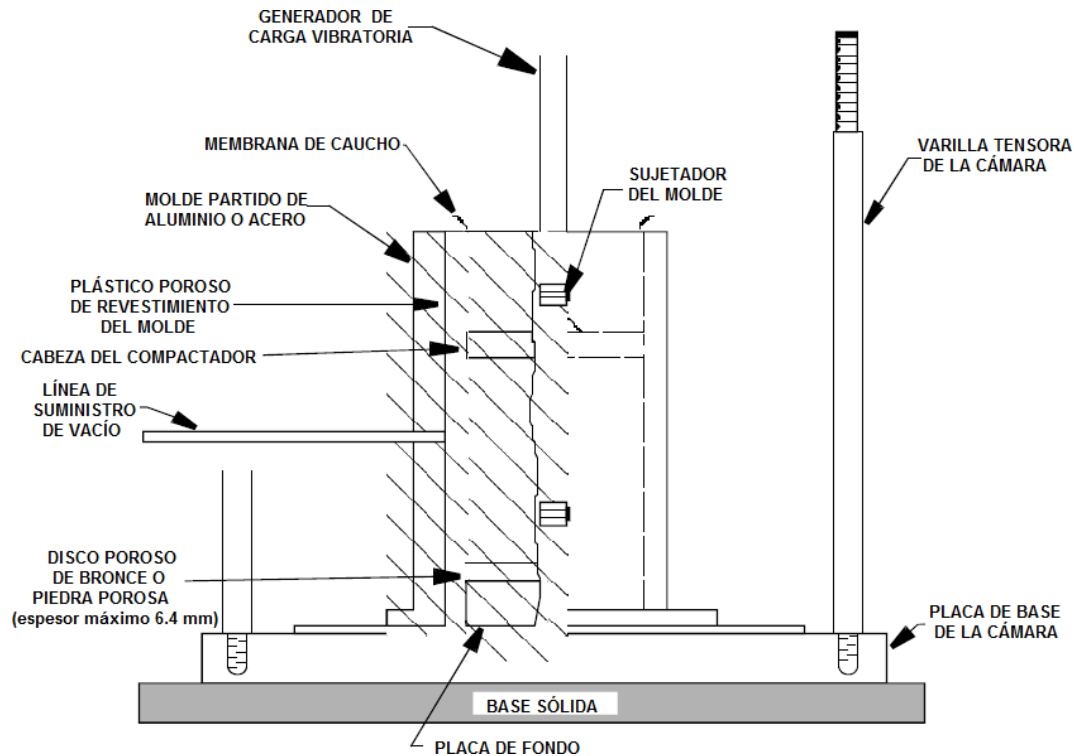


Figura 156B - 1. Aparato para compactación vibratoria de suelos no cohesivos

- B.3.4** Se coloca la membrana de caucho sobre la platina de fondo y la piedra porosa inferior. Se fija la membrana a la platina de fondo empleando un aro tórico u otro sello hermético.
- B.3.5** Se coloca el molde partido alrededor de la placa de fondo y se sube la membrana por dentro del molde. Se aprieta firmemente el molde partido en su sitio. Se debe tener cuidado para evitar pinchazos en la membrana.
- B.3.6** Se estira la membrana apretadamente sobre el borde del molde. Se aplica un vacío al molde para remover todas las arrugas de la membrana. El empleo de plástico poroso que forme un forro tubular

asegura que la membrana se ajuste exactamente alrededor del perímetro interior del molde. El vacío se debe mantener durante el proceso de compactación.

- B.3.7** Se usan calibradores para determinar, con aproximación a 0.25 mm, el diámetro interior del molde forrado con la membrana y la distancia desde la parte superior de la piedra porosa hasta el borde del molde.
- B.3.8** Se determina el volumen, V , del espécimen que se va a preparar, empleando el diámetro medido en el paso B.3.7 y un valor de altura entre 305 y 318 mm.
- B.3.9** Se determina la masa del material con la humedad preparada, que se debe compactar dentro del volumen V determinado en el paso B.3.8, para obtener la masa unitaria deseada.
- B.3.10** Para especímenes de 152.4 mm de diámetro y una altura de 305 mm, se requiere compactar el material en seis capas de 50 mm cada una. Se determina la masa del suelo húmedo requerido para cada capa, W_L :

$$W_L = \frac{W_t}{N} \quad [156.16]$$

Donde: W_t : Masa total para producir un espécimen con una determinada densidad;

N : Número de capas en que se va a compactar el suelo en el molde.

- B.3.11** Se coloca la masa total requerida de suelo para todas las capas, W_{ad} , dentro de una bandeja para mezcla. Se agrega la cantidad de agua necesaria, W_{aw} , y se mezcla perfectamente.
- B.3.12** Se determina la masa del suelo húmedo más la de la bandeja de mezclado.
- B.3.13** Se coloca dentro del molde la cantidad requerida de suelo húmedo para una capa, W_L . Se debe tener cuidado para evitar pérdidas. Se usa una espátula para quitar el material del borde del molde y se forma un pequeño montículo en el centro del mismo.

- B.3.14** Se inserta la cabeza del vibrador y se vibra el suelo hasta que la distancia entre la superficie compactada y el borde del molde sea igual a la distancia medida en el paso B.3.7, menos el espesor de la capa escogida en el paso B.3.10. Esto puede requerir la extracción e introducción de la cabeza del vibrador varias veces hasta que, por experiencia, se obtenga la medida del tiempo de vibración requerido.
- B.3.15** Se repiten los pasos B.3.13 y B.3.14 para cada nueva capa, escarificando antes la capa previamente compactada, en un espesor aproximado de 6.4 mm. La distancia medida desde la superficie de la capa compactada hasta el borde del molde, se va viendo reducida sucesivamente por el espesor de cada nueva capa elegido en el paso B.3.10. La superficie final deberá ser un plano pulido y horizontal. Como un paso final recomendado cuando se han usado discos porosos de bronce, se coloca la tapa sobre la muestra y se asienta con la cabeza del vibrador. De ser necesario, porque la primera membrana se haya degradado, se deberá colocar una segunda membrana al término del proceso de compactación.
- B.3.16** Cuando se haya completado la compactación, se determina la masa de la bandeja de mezcla más el suelo sobrante de la compactación. La masa determinada en el paso B.3.12 menos la masa medida ahora, es la masa del suelo húmedo utilizado (masa del espécimen). Se verifica el contenido del agua de compactación (w_c) del suelo remanente en la bandeja. Se debe haber tenido la precaución de cubrir la bandeja con el suelo húmedo durante el proceso de compactación, para evitar que el material perdiera humedad. El contenido de agua de la muestra se determina por medio de la norma INV E-122.
- B.3.17** Se procede en seguida como se indica en la Sección 8 de esta norma.

ANEXO C

(Aplicación obligatoria)

COMPACTACIÓN DE SUELOS DEL TIPO 2

C.1 *Objeto:*

- C.1.1** El método descrito en este Anexo se refiere a la compactación de muestras de suelo del Tipo 2, para determinar su módulo resiliente.
- C.1.2** El método general de compactación de los suelos del Tipo 2 es el estático (una versión modificada del método de doble émbolo). Si se dispone de muestras de tubo de pared delgada, los especímenes no requieren recompactación.
- C.1.3** El proceso consiste en compactar una masa conocida de suelo en un volumen que ha sido fijado por las dimensiones del molde de compactación. El diámetro mínimo admisible para el molde es 71 mm. Se debe escoger un molde cuyo diámetro sea, como mínimo, cinco veces el tamaño máximo de las partículas del suelo a ensayar. Si el tamaño máximo de partícula excede el 25 % del diámetro del molde disponible más grande, las partículas de mayor tamaño deberán ser trituradas. La longitud de todos los especímenes deberá ser igual al doble de su diámetro. La Figura 156C - 1 muestra un ensamble típico para compactar por este método. Como alternativa para los suelos carentes de cohesión, se puede usar un molde con membrana, sostenido por vacío, como se describe en el Anexo B.

C.2 *Equipo:*

- C.2.1** El equipo es el que se muestra en la Figura 156C - 1.

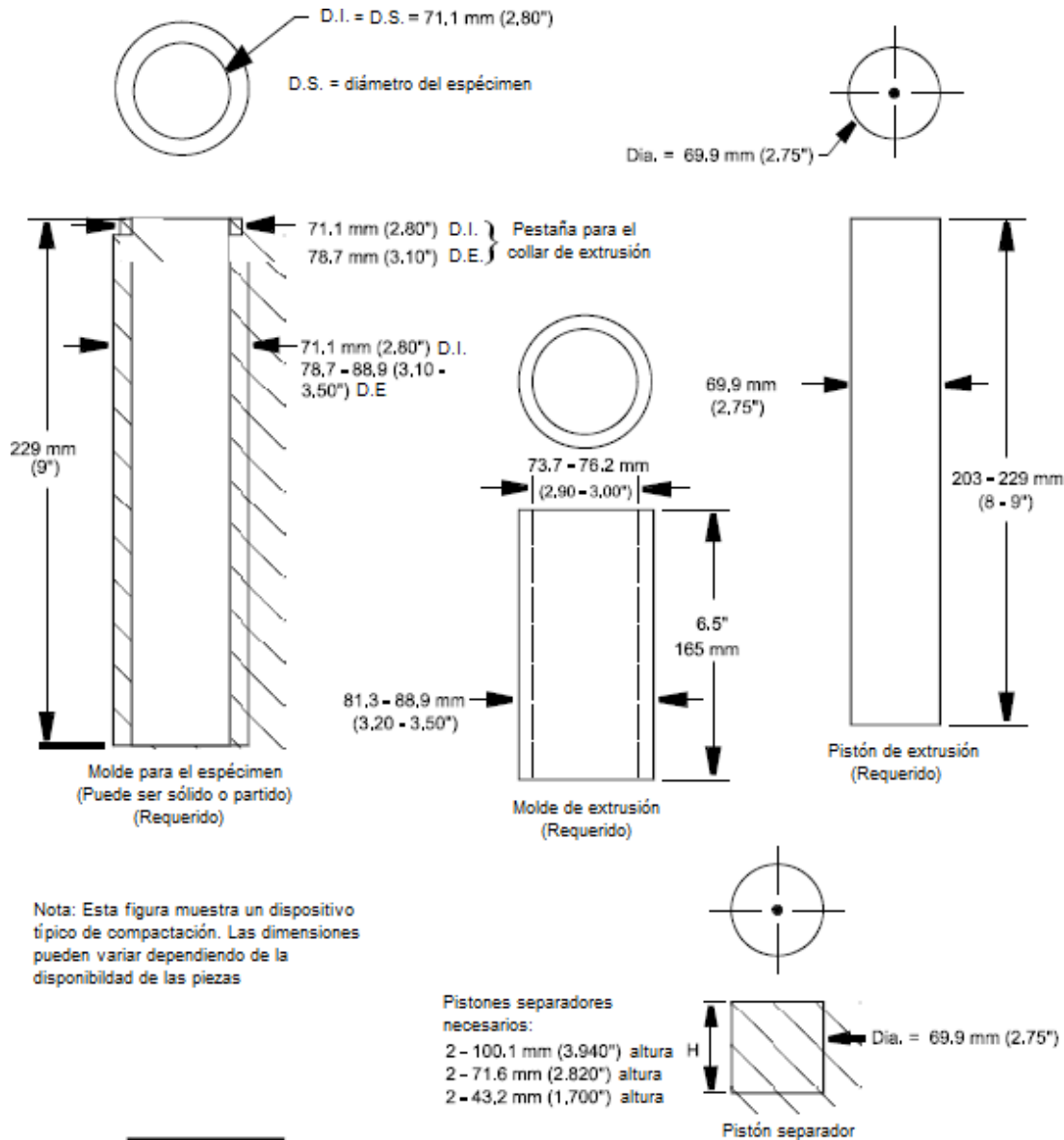
C.3 *Procedimiento:*

- C.3.1** Para compactar las muestras mediante este método, el material se debe colocar en el molde en cinco capas. La masa del suelo húmedo requerido para cada capa, W_t , se determina como $W_t/5$.
- C.3.2** Se coloca uno de los pistones separadores dentro del molde de la muestra.

- C.3.3** Se coloca la masa del suelo W_L , determinada en el paso C.3.1, dentro del molde para la muestra. Se usa una espátula para quitar el suelo del borde del molde y formar un ligero montículo en el centro.
- C.3.4** Se inserta el segundo pistón separador y se coloca el conjunto en la máquina de carga a presión. Se aplica una carga pequeña y se ajusta la posición del molde con respecto a la masa de suelo, de manera que las distancias entre los bordes del molde y los respectivos tapones sean iguales. La presión desarrollada por el suelo a causa de la carga inicial sirve para mantener el molde en su lugar. Teniendo ambos pistones separadores simultáneamente en posición para que no haya cambio de volumen, se obtienen masas unitarias más uniformes por capa.
- C.3.5** Se aumenta lentamente la carga, hasta que los pistones descansen firmemente contra los extremos del molde. Se mantiene esta carga por lo menos durante 1 minuto. La cantidad de rebote del suelo depende de la rata de carga y de la duración de la misma. Para una rata de cargamás baja y a mayor duración de la carga, el rebote será menor (Figura 156C - 2).
- Nota C.1: Para obtener densidades uniformes, es necesario tener mucho cuidado para centrar la primera capa de suelo exactamente entre los extremos del molde. Las verificaciones y los ajustes necesarios se deben hacer luego de completar los pasos C.3.4 y C.3.5.*
- Nota C.2: Medir los movimientos del pistón de compactación para determinar el volumen alcanzado por cada capa, es una alternativa aceptable al uso de los pistones separadores para ello.*
- C.3.6** Se disminuye la carga hasta cero y se retira el conjunto de la máquina de carga.
- C.3.7** Se remueve el pistón de carga, se escarifica la superficie de la capa compactada, se pone la masa correcta del suelo, W_L , para una segunda capa y se forma un montículo. Se agrega un pistón espaciador de la altura mostrada en la Figura 156C - 3.
- C.3.8** Se aumenta la carga lentamente, hasta que los pistones separadores descansen firmemente contra el borde del molde. Se mantiene la carga por lo menos durante 1 minuto (Figura 156C - 3).
- C.3.9** Se remueve la carga, se voltea el molde y se remueve el pistón separador inferior dejando el superior en posición. Se escarifica la superficie del fondo de la capa 1 y se pone la masa correcta del suelo,

W_L , para la tercera capa y se forma un montículo. Se añade un pistón separador de la altura mostrada en la Figura 156C - 4.

- C.3.10** Se coloca el ensamble en la máquina de carga. Se aumenta la carga lentamente, hasta que los pistones separadores descansen firmemente contra el borde del molde. Se mantiene la carga por lo menos durante 1 minuto.
- C.3.11** Se siguen los pasos indicados en las Figuras 156C - 5 y 156C - 6 para compactar las otras dos capas.
- C.3.12** Después que se haya completado la compactación, se determina el contenido del agua del suelo remanente en la bandeja (w_c), empleando para ello la norma INV E-122.
- C.3.13** Se coloca el pistón de extrusión dentro del molde de compactación y se fuerza el espécimen hacia afuera del molde compactación y dentro del molde de extrusión. La extrusión debe ser cuidadosa, para evitar cualquier impacto sobre el espécimen.
- C.3.14** Se usa el molde de extrusión para deslizar cuidadosamente el espécimen compactado sobre una placa sólida. La placa debe ser circular, hecha de un material que no absorba humedad, con un diámetro igual al del espécimen y un espesor de 13 mm.
- C.3.15** Se determina la masa del espécimen compactado, con aproximación al gramo. Se miden la altura y el diámetro del espécimen con aproximación a 0.25 mm (0.01") y se registran los valores en un formato adecuado.
- C.3.16** Se coloca sobre la superficie superior del espécimen una placa igual a la descrita en el paso C.3.14.
- C.3.17** Empleando un dilatador de membranas al vacío, se coloca una membrana sobre el espécimen. Se halan cuidadosamente los extremos de la membrana sobre las placas, y se asegura la membrana a ellas colocando aros tóricos u otros sellos de presión para proporcionar un sellado hermético.
- C.3.18** En seguida, se procede como se indica en la Sección 7 de esta norma.

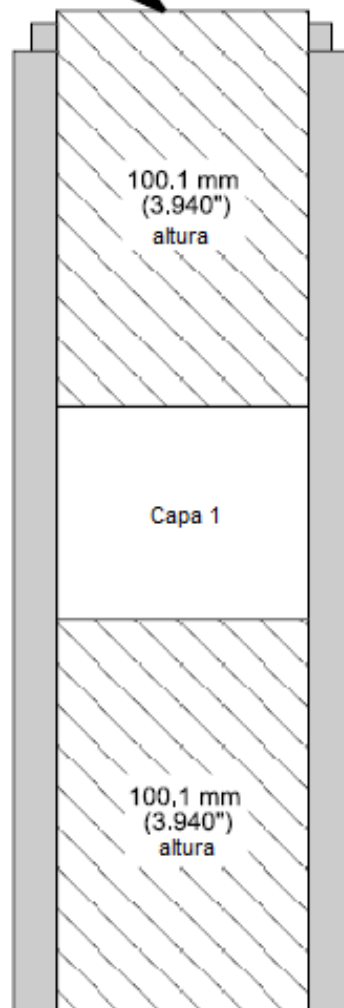


SIN ESCALA

H = las dimensiones se muestran en las figuras C.2 a C.6

Figura 156C - 1. Equipo para la compactación estática de suelos del Tipo 2

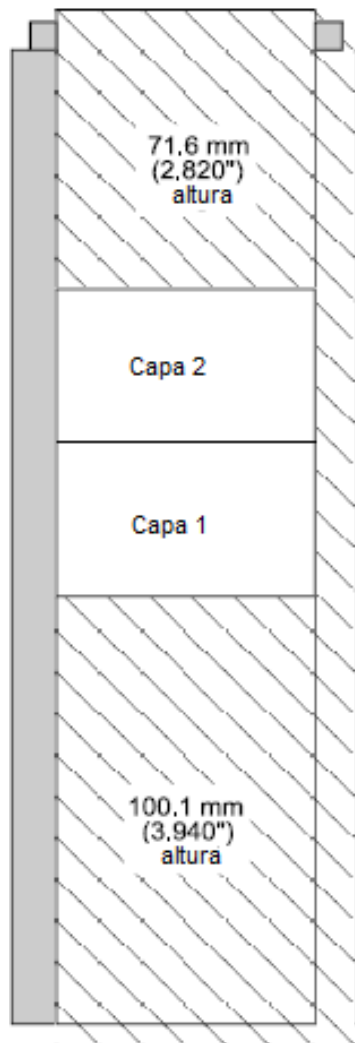
Los pistones deben ser cilindros sólidos de altura especificada y 70.9 mm (2.79") de diámetro



PASO C.3.5 - CAPA 1

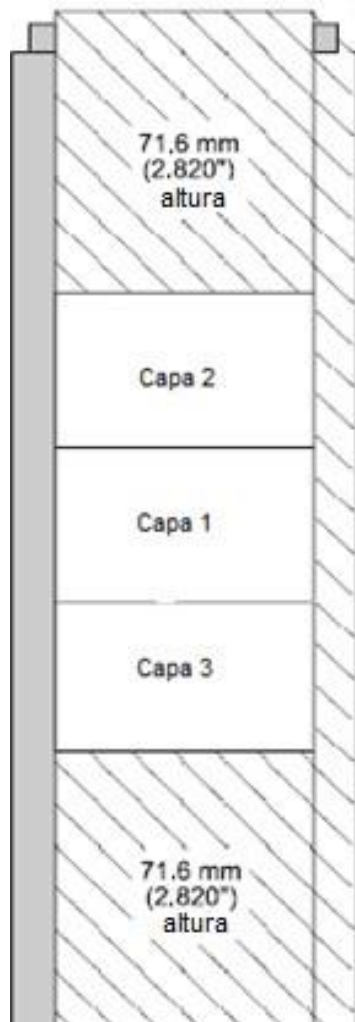
- Se mide la masa correcta de suelo para compactar una capa
- Se coloca en el material en el molde y se remueve
- Se insertan pistones de altura dada
- Los dos pistones compactan hasta que quedan a ras con el borde del molde
- Se remueve el pistón superior
- Se escarifica la superficie de la capa 1
- Se procede con el paso siguiente

Figura 156C - 2. Compactación de la primera capa de un suelo de Tipo 2

**PASO C.3.7 - CAPA 2**

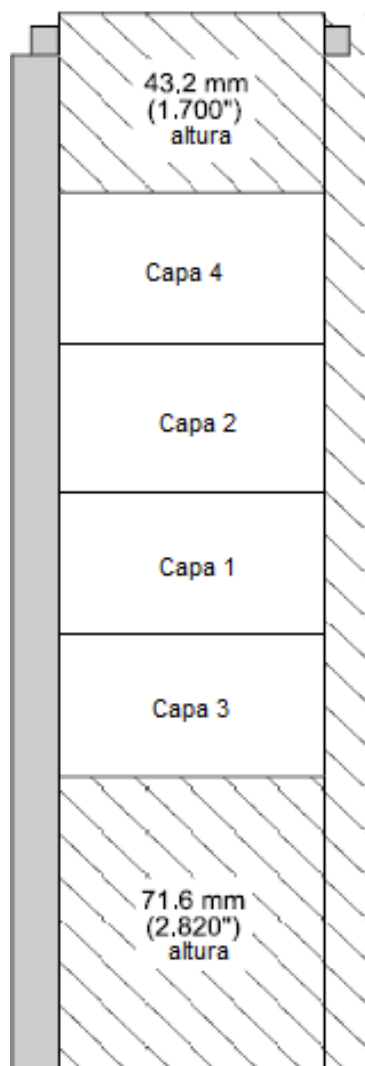
- Se mide la masa correcta para usar en la capa
- Se coloca el material en el molde y se forma un montículo
- Se inserta el pistón de 71.6 mm
- Se presiona hasta que los pistones quedan a ras con los bordes del molde
- Se voltea el molde y se retira el pistón de 100.1 mm, dejando el otro en su lugar
- Se escarifica la superficie expuesta de la capa 1
- Se procede con el paso siguiente

Figura 156C - 3. Compactación de la segunda capa de un suelo de Tipo 2

**PASO C.3.9 - CAPA 3**

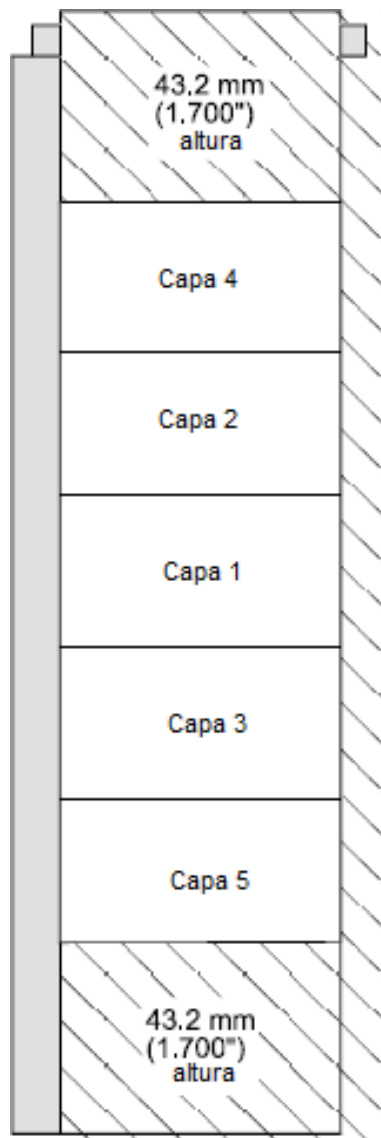
- Se mide la masa correcta para usar en la capa
- Se coloca el material en el molde y se forma un montículo
- Se inserta el pistón de 71.6 mm
- Se presiona hasta que los pistones quedan a ras con los bordes del molde
- Se voltea el molde y se retira el pistón que está sobre la capa 2, dejando en su lugar el que está sobre la capa 3
- Se escarifica la superficie expuesta de la capa 2
- Se procede con el paso siguiente

Figura 156C - 4. Compactación de la tercera capa de un suelo de Tipo 2

**PASO 3.11 - CAPA 4**

- Se mide la masa correcta para usar en la capa
- Se coloca el material en el molde y se forma un montículo
- Se inserta el pistón de 43.2 mm
- Se presiona hasta que los pistones quedan a ras con los bordes del molde
- Se voltea el molde y se retira el pistón de 71.6 mm, dejando el otro en su lugar
- Se escarifica la superficie expuesta de la capa 3
- Se procede con el paso siguiente

Figura 156C - 5. Compactación de la cuarta capa de un suelo de Tipo 2

**PASO 3.11 - CAPA 5**

- Se mide la masa correcta para usar en la capa
- Se coloca el material en el molde y se forma un montículo
- Se inserta el pistón de 43.2 mm
- Se presiona hasta que los pistones quedan a ras con los bordes del molde
- Se saca el espécimen del molde con un aparato de extrusión
- Se envuelve en una membrana de caucho
- Se somete a ensayo para hallar el módulo resiliente

Figura 156C - 6. Compactación de la quinta capa de un suelo de Tipo 2