

## EXPANSIÓN UNIDIMENSIONAL, CONTRACCIÓN Y PRESIÓN DE EXPANSIÓN DE MEZCLAS DE SUELO-CAL

INV E – 607 – 13

### 1 OBJETO

- 1.1** Los métodos de ensayo descritos en esta norma suministran procedimientos para realizar ensayos de expansión, contracción y presión de expansión sobre muestras de suelo-cal, y se pueden utilizar para determinar el contenido de cal requerido para lograr el control deseado de cambios volumétricos causados por aumentos o disminuciones de humedad.
- 1.2** Estos ensayos se pueden usar para determinar: 1) las magnitudes de los cambios de volumen bajo condiciones de carga variable, 2) la velocidad del cambio volumétrico, y 3) la magnitud del cambio de presión al cambiar el contenido de humedad de las mezclas de suelo-cal. Si se desea, también se puede determinar la permeabilidad de las mezclas de suelo-cal para diferentes condiciones de carga.

*Nota 1: Los cambios en las condiciones de campo pueden tener efectos importantes sobre las características de expansión y contracción de los suelos. Por lo tanto, se deben tratar de duplicar lo mejor posible las condiciones de campo iniciales y las previsibles en el futuro, particularmente en relación con la humedad y la densidad.*

- 1.3** Esta norma reemplaza la norma INV E-804-07.

### 2 IMPORTANCIA Y USO

- 2.1** A partir de los resultados de estos ensayos se puede calcular el potencial relativo de expansión de las mezclas de suelo-cal que contienen diferentes cantidades de cal. A partir de tal evaluación, se puede determinar la cantidad de cal necesaria para reducir la expansión a un nivel aceptable. Los datos se pueden utilizar, entonces, para el diseño y el establecimiento de requisitos de especificaciones para rellenos estructurales y subrasantes donde se encuentren suelos expansivos y se desee brindar cierto grado de control sobre la expansión y la contracción en las fundaciones de estructuras y en los suelos de subrasante de carreteras. Los resultados de los ensayos también permiten establecer si los suelos son susceptibles o no de estabilizar con cal.

### 3 EQUIPO

- 3.1** El aparato debe cumplir los requerimientos de la norma INV E-151, "Consolidación unidimensional de los suelos", exceptuando que el espesor mínimo del espécimen será de 19 mm ( $\frac{3}{4}$ "). El aparato debe tener los medios para ejercer una presión sobre el espécimen de, al menos, 200 % de la máxima carga esperada de diseño y, al menos, la máxima presión de expansión.
- 3.2** *Medidor micrométrico* – Montado sobre el aparato como muestra la Figura 607 - 1, o con otra disposición igualmente funcional. La sensibilidad del medidor será de  $\pm 0.0025$  mm ( $\pm 0.0001$ ").
- 3.3** *Anillo de carga* – Maquinado a la misma altura del anillo del espécimen, con una exactitud de  $\pm 0.02$  mm ( $\pm 0.001$ ") y que se pueda fijar al consolidómetro.

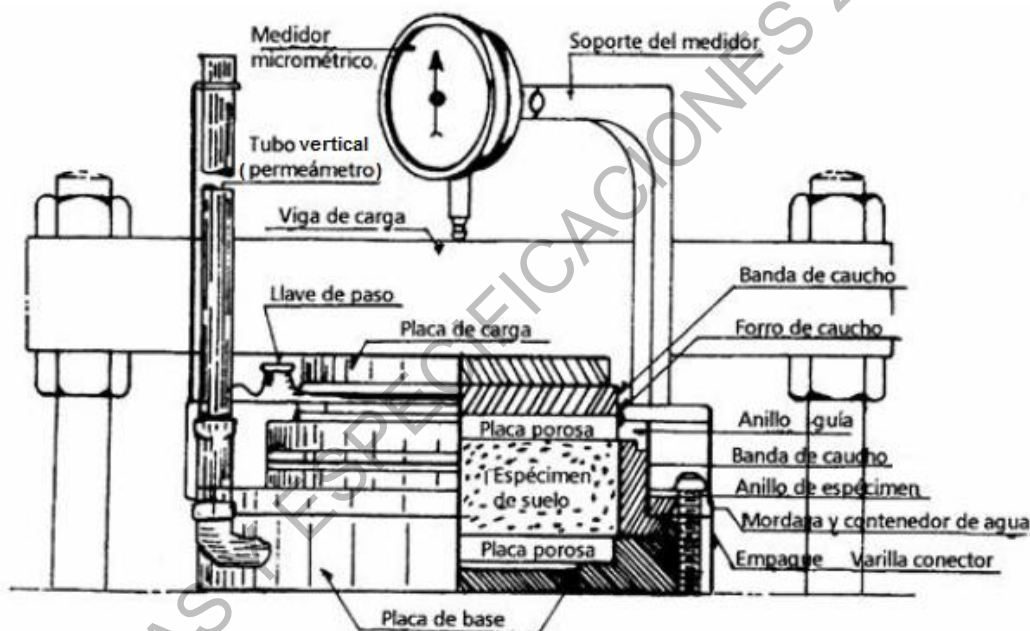


Figura 607 - 1. Consolidómetro de anillo fijo

- 3.4** *Consolidómetro* – Equipado con una llave de paso inferior para el drenaje y un tubo vertical (permeámetro) para remover cualquier aire atrapado bajo el espécimen y para añadir agua al espécimen, respectivamente, como se muestra en la Figura 607 - 1.
- 3.5** *Collar de extensión* – Para compactar especímenes, aproximadamente de 100 mm (4") de altura y del mismo diámetro del anillo del espécimen.

*Nota 2: Los especímenes se pueden compactar en un molde más grande que el anillo del espécimen y ser recortados luego para encajarlos en el anillo del espécimen.*

**3.6** *Martillo compactador* – Del tipo requerido para la norma INV E-141.

**3.7** *Placas de vidrio* – Dos, para cubrir cada anillo del consolidómetro.

## 4 MUESTREO

**4.1** Las muestras de suelo natural para estos ensayos se deben obtener de acuerdo con cualquier método aprobado de muestreo de suelos. Las muestras no se deberán secar en el horno antes de preparar los especímenes de ensayo.

## 5 PROCEDIMIENTO

**5.1** Se ensamblan en el recipiente del espécimen desocupado la base del consolidómetro, el anillo del espécimen, las piedras porosas y la placa de carga con el anillo de carga, con la misma disposición que será usada para ensayar el espécimen.

**5.2** Se coloca el montaje sobre el aparato de carga en la misma posición que ocupará durante el ensayo.

**5.3** Se aplica sobre la placa de carga una carga que produzca una presión unitaria de 2.4 kPa (50 lbf/pie<sup>2</sup>).

**5.4** Se anota la lectura inicial del medidor micrométrico,  $r_1$ . Se marcan las partes del aparato, para poderlo reensamblar en la misma posición durante el ensayo del espécimen de suelo-cal.

**5.5** Se prepara un mínimo de 1000 g (2 lb aproximadamente) de mezcla de suelo-cal con los contenidos deseados de cal y de agua, de acuerdo con la norma INV E-603. La mezcla no deberá tener partículas mayores de 4.75 mm (tamiz No. 4).

**5.6** Se determina la masa del anillo del consolidómetro.

**5.7** Con el collar de extensión en su sitio sobre el anillo del consolidómetro ensamblado, se compacta el espécimen en dicho anillo hasta obtener la masa unitaria húmeda deseada, con el martillo de compactación apropiado. El espécimen deberá tener un espesor cerca de 6 mm ( $\frac{1}{4}$ ") mayor que la altura del anillo de carga.

- 5.8** Se retira el collar de extensión y se recorta el exceso de material de la parte superior del espécimen con una regla metálica u otra herramienta.
- 5.9** Se toma una muestra de los recortes y se coloca en un recipiente hermético, para determinar posteriormente el contenido de agua, según la norma INV E-122.
- 5.10** Inmediatamente después de recortar el espécimen compactado, se pesan el espécimen y el anillo y se cubren las superficies expuestas del espécimen con placas de vidrio sostenidas con abrazaderas, hasta que éste sea colocado en el aparato de carga.
- 5.11** Se calcula la densidad inicial húmeda del espécimen que llena a ras el anillo del consolidómetro, usando el volumen calculado del anillo del consolidómetro y la masa neta del espécimen. La densidad húmeda calculada se debe encontrar dentro de  $16.02 \text{ kg/m}^3$  ( $1 \text{ lb/pe}^3$ ), y la humedad dentro del  $\pm 1 \%$  de los valores requeridos.
- 5.12** Si no se logra la densidad esperada, se descarta ese espécimen. Se repite el proceso de compactación, ajustando el esfuerzo de compactación hasta obtener la masa unitaria deseada.
- 5.13** Cualquier curado de los especímenes de suelo-cal se deberá hacer en este momento. El curado se debe realizar en recipientes sellados para prevenir la evaporación del agua o la carbonatación de la cal.
- 5.14** Al final del período de curado se coloca en el aparato de carga el espécimen con su anillo de consolidómetro confinante, de acuerdo con la norma INV E-151, de manera que las partes queden ensambladas en las mismas posiciones que se usaron para la calibración inicial (Ver numeral 5.4).
- 5.15** Se aplica una carga de asentamiento que produzca una presión de  $2.4 \text{ kPa}$  ( $50 \text{ lbf/pe}^2$ ).
- 5.16** Se registra la lectura del medidor micrométrico,  $r_2$ . Utilizando la diferencia entre  $r_1$  y  $r_2$ , se determina la altura exacta del espécimen.

## **6 ENSAYOS DE EXPANSIÓN**

---

- 6.1** Las características expansivas de los suelos expansivos tratados y no tratados con cal, varían según los patrones de esfuerzo aplicados.

- 6.2** Se necesitan al menos dos especímenes duplicados para un ensayo completo.
- 6.3** Utilizando los procedimientos descritos en esta norma y en la norma INV E-151, se determinan los datos para dos series de ensayos: 1) *Cargado y expandido*, por el que el espécimen no saturado se somete a saturación con agua y luego se somete a carga para prevenir la elevación del espécimen (curva A de la Figura 607 - 2), y 2) *Expandido y cargado*, por el que el espécimen es saturado previamente (curva B de la Figura 607 - 2). Cualquier otro procedimiento de carga es intermedio entre los descritos y queda representado por puntos a lo largo de una trayectoria como la que representa la curva C en la Figura 607 - 2.
- 6.4** *Cargado y expandido* – Después de aplicar la carga inicial de asentamiento y de tomar la lectura inicial del medidor, se satura el espécimen No.1 de la siguiente manera:
- 6.4.1** Se llena el tubo vertical (permeámetro) con agua destilada (nota 3), cuidando de remover cualquier burbuja de aire que pueda estar atrapada en el sistema, humedeciendo lentamente la piedra porosa inferior y drenando a través de la llave de paso inferior. (La cabeza de agua en el tubo vertical debe ser suficientemente baja para que el espécimen no se levante).
- Nota 3: A menos que se especifique lo contrario, se debe utilizar siempre agua destilada. A menudo, resulta deseable usar un agua que tenga los mismos constituyentes químicos del agua subterránea o transportada que se encuentra en el campo, debido a los efectos del intercambio de bases.*
- 6.4.2** Cuando el espécimen se comience a expandir, se incrementa la carga lo necesario para mantenerlo con su altura original.
- 6.4.3** Después de alcanzar la carga máxima, que es una medida indirecta de la máxima presión de expansión, se mantiene constante por un mínimo de 48 horas, y luego se reduce la carga hasta  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$  y  $\frac{1}{8}$  de la máxima y, finalmente, hasta la carga de asentamiento de 2.4 kPa (50 lbf/pie<sup>2</sup>). Se mide la altura del espécimen para cada valor de carga. Se debe utilizar un mayor número de cargas si se requiere un mayor detalle en la curva de ensayo.
- 6.4.4** Se mantienen todas las cargas durante 24 horas o más, de ser necesario, hasta obtener valores de altura constantes.
- 6.4.5** Se extrae el espécimen del recipiente anular y se determina su masa inmediatamente, así como después de secarlo en horno a 105° C (221° F).

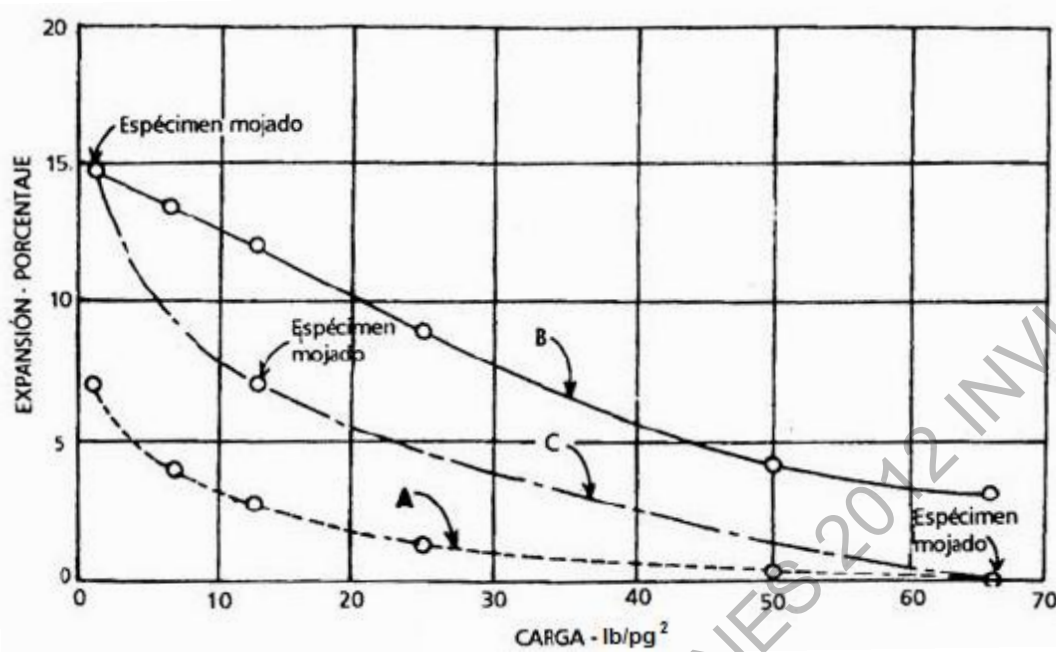


Figura 607 - 2. Ejemplo de curvas carga-expansión para especímenes húmedos

- 6.4.6** Se determina el contenido de agua del espécimen completo, de acuerdo con la norma INV E-122.
- 6.4.7** Se toma una muestra del espécimen secado al horno para determinar la gravedad específica de acuerdo con la norma INV E-128.
- 6.4.8** Se calculan el grado de saturación (a partir del contenido de agua), la densidad bulk seca y la gravedad específica del espécimen.
- 6.5** *Expandido y cargado* – Después de aplicar la carga inicial de asentamiento y de tomar la lectura inicial del medidor micrométrico, se satura el espécimen No. 2 de acuerdo con lo descrito en el numeral 6.4.
- 6.5.1** Se permite que el espécimen se expanda bajo la carga de asentamiento durante un mínimo de 48 horas o hasta que se complete la expansión.
- 6.5.2** Se carga el espécimen sucesivamente a  $1/8$ ,  $1/4$ ,  $1/2$  y 1 veces el valor de la carga máxima que se aplicó al espécimen No.1, para determinar las características de preconsolidación del espécimen. Se debe utilizar un mayor número de cargas si se requiere un mayor detalle en la curva de ensayo.
- 6.5.3** Se sigue el procedimiento especificado en la norma INV E-151 para realizar las medidas y las determinaciones.

**6.6** *Expansión bajo carga individual* – Cuando se desee realizar ensayos individuales de expansión para otras condiciones de carga, se utiliza el siguiente procedimiento:

- 6.6.1** Después de aplicar las cargas iniciales de asentamiento y de tomar las lecturas iniciales del medidor micrométrico, se carga cada espécimen con el valor de carga deseado y se satura de acuerdo con el numeral 6.4.1.
- 6.6.2** Se deja expandir el espécimen bajo la carga aplicada durante 48 horas o hasta que se complete la expansión. Se mide la altura del espécimen expandido.
- 6.6.3** Se reduce la carga hasta el valor de la carga de asentamiento. Se deja que la altura llegue a ser constante y se mide; entonces, se retira el espécimen del anillo y se hacen las determinaciones de contenido de agua, densidad bulk seca, gravedad específica y grado de saturación, de acuerdo con el numeral 6.4.1. Un ejemplo de ensayo sobre un espécimen intermedio se muestra en la curva C de la Figura 607 - 2.

*Nota 4: Como ejemplo, la curva C está dibujada a través del punto de expansión cero y del punto de máxima presión de expansión de la curva A, los datos del ensayo del espécimen intermedio y el punto de máxima expansión de la curva B.*

## 7 ENSAYO DE PERMEABILIDAD

- 7.1** Después de completar la saturación de cualquiera de los especímenes descritos en los numerales 6.4, 6.5 y 6.6, se pueden tomar lecturas de permeabilidad en cualquier instante durante los ensayos, llenando el tubo permeámetro vertical.
- 7.2** Se registra la cabeza inicial,  $H_i$ , y se permite que el agua percole a través del espécimen.
- 7.3** Se mide la cabeza en el tubo,  $H_f$ , y el tiempo transcurrido en minutos para la caída de la cabeza.
- 7.4** Los ensayos de permeabilidad para cualquier condición particular de carga se deben llevar a cabo, por lo menos, durante 24 horas.

## 8 ENSAYOS DE CONTRACCIÓN

---

**8.1** Cuando se necesiten medidas de contracción durante el secado, se prepara un espécimen adicional de acuerdo con los numerales 5.5 y 5.6. Se moldea este espécimen en el recipiente anular, bajo las mismas condiciones de densidad bulk y de contenido de agua usadas para los especímenes No. 1 y No. 2 de expansión.

**8.1.1** Se miden la altura inicial, el volumen, el contenido de agua, y la densidad, como se describe en los numerales 5.6 a 5.16.

**8.2** *Determinación de las alturas de contracción* – Si se desea la altura del espécimen secado al aire, se seca, como mínimo, al contenido de agua correspondiente al límite de contracción, dejando el espécimen al aire, determinado como se indica en la norma INV E-127.

**8.2.1** Se colocan el espécimen seco y el recipiente anular en la máquina de carga.

**8.2.2** Se aplica la carga de asentamiento de 2.4 kPa (50 lbf/pie<sup>2</sup>) y se lee el medidor.

**8.3** *Determinación del volumen de contracción* – Para medir el volumen de contracción, se deja secar al aire el espécimen en el anillo, por lo menos hasta el contenido de agua correspondiente al límite de contracción.

**8.3.1** Después de que el espécimen se haya secado al aire, se remueve del recipiente anular y se determina su volumen por el método de la parafina, que es el mismo utilizado en la determinación del límite de contracción de la norma INV E-129, excepto que el contenido inicial de agua y el volumen del espécimen se determinan al comienzo de este método de ensayo.

**8.3.2** Si el espécimen de contracción se rompe en piezas separadas, se mide el volumen de cada pieza y se suman para obtener el volumen total.

## 9 CÁLCULOS

---

**9.1** *Datos del ensayo de expansión* – Se calcula la relación de vacíos como sigue:



$$e = \frac{h - h_0}{h_0} \quad [607.1]$$

Donde: e: Relación de vacíos (volumen de vacíos/volumen de sólidos);  
 h: Altura del espécimen;  
 h<sub>0</sub>: Altura del material sólido para el contenido de vacíos cero.

**9.1.1** Se calcula la expansión como porcentaje de la altura original, de la siguiente manera:

$$\Delta, \% = \frac{h_2 - h_i}{h_i} \quad [607.2]$$

Donde: Δ: Expansión, como porcentaje del volumen inicial;  
 h<sub>i</sub>: Altura inicial del espécimen;  
 h<sub>2</sub>: Altura del espécimen bajo una condición de carga específica.

**9.2** *Datos del ensayo de permeabilidad* – Se calcula la rata de permeabilidad, por medio de la siguiente fórmula básica para el permeámetro de cabeza variable:

$$k = \left[ \frac{A_p \times L_s}{A_s \times 12} \right] \left[ \frac{1}{t} \right] \ln \left( \frac{H_i}{H_f} \right) \quad [607.3]$$

Donde: k: Rata de permeabilidad, pies/año;  
 A<sub>p</sub>: Área del tubo vertical que suministra la cabeza de percolación, pg<sup>2</sup>;  
 A<sub>s</sub>: Área del espécimen, pg<sup>2</sup>;  
 L<sub>s</sub>: Longitud del espécimen, pg;  
 H<sub>i</sub>: Carga (cabeza) de agua inicial, pg;  
 H<sub>f</sub>: Carga (cabeza) de agua final, pg;  
 t: Tiempo transcurrido, años.

**9.3** *Datos del ensayo de contracción* – Se calcula la contracción volumétrica como un porcentaje del volumen inicial, como sigue:

$$\Delta_s, \% = \frac{v_i - v_d}{v_i} \times 100 \quad [607.4]$$

Donde:  $\Delta_s$ : Contracción volumétrica, como porcentaje del volumen inicial;

$v_i$ : Volumen inicial del espécimen (altura del espécimen por el área del recipiente anular);

$v_d$ : Volumen del espécimen secado al aire, resultante del método del desplazamiento con parafina.

**9.3.1** Se calcula la contracción lineal por altura, como sigue:

$$\Delta h_s, \% = \frac{h_i - h_d}{h_i} \times 100 \quad [607.5]$$

Donde:  $\Delta h_s$ : Altura contraída como porcentaje de la altura inicial;

$h_i$ : Altura inicial del espécimen;

$h_d$ : Altura del espécimen secado al aire.

**9.3.2** Para calcular el porcentaje total del cambio volumétrico desde la condición seca al aire hasta la condición saturada, se añade el porcentaje de contracción volumétrica por secado al aire  $\Delta_s$ , al porcentaje de expansión volumétrica por saturación,  $\Delta$ , calculado en el numeral 9.1. Este valor se usa como un indicador del potencial total de expansión, basado en las condiciones iniciales de densidad y de contenido de agua. Puesto que los datos de expansión volumétrica se determinan para varias condiciones de carga, el cambio volumétrico total también se puede determinar para varias condiciones de carga.

**9.3.3** Para calcular el porcentaje total de cambio en altura al pasar de la condición saturada a la condición seca al aire, se añade el porcentaje de contracción lineal en altura,  $\Delta h_s$ , al porcentaje de expansión,  $\Delta$ , cuando el espécimen es saturado bajo condiciones de carga cero u otros valores de carga, según se desee.

## 10 GRÁFICOS DE LOS DATOS DE ENSAYO

---

**10.1** Con los datos obtenidos de los ensayos de expansión, se hacen gráficos como el de la Figura 607 - 2.

## 11 INFORME

---

**11.1** *Ensayo de expansión* – En el informe se debe incluir la siguiente información:

**11.1.1** Identificación de la muestra (número de perforación, profundidad, localización, etc.).

**11.1.2** Descripción del suelo ensayado y tamaño de la fracción ensayada.

**11.1.3** Porcentaje de cal mezclado con el suelo.

**11.1.4** Condiciones iniciales de masa unitaria y humedad y grado de saturación. Dar el porcentaje de densidad máxima y la humedad óptima para las mezclas compactadas de suelo-cal, con base en los métodos de ensayo INV E-141 o INV E-142, indicando cuál de ellos se usó para la comparación.

**11.1.5** Tipo de consolidómetro (de anillo fijo o flotante, tamaño del espécimen) y tipo de aparato de carga.

**11.1.6** Un gráfico con curvas de carga versus cambio volumétrico, como se muestra en la Figura 607 - 2 (si se desea, se puede incluir una curva de relación de vacíos-logaritmo de presión).

**11.1.7** Una curva de logaritmo de tiempo versus deformación, si se desea.

**11.1.8** Suministro de los datos de carga y tiempo versus cambios volumétricos en otras formas, si se requiere específicamente.

**11.1.9** Valores finales de contenido de agua, densidad bulk seca, y grado de saturación.

**11.2** *Ensayo de permeabilidad* – Se informan los datos de permeabilidad y cualquier otro dato solicitado específicamente.

**11.3 Ensayo de contracción:**

- 11.3.1** Se deben incluir datos sobre la disminución de volumen desde la condición inicial seca al aire y, si se desea, otros datos como el cambio volumétrico total y el cambio total de altura.
- 11.3.2** Se deben reportar las condiciones de carga bajo las cuales se obtuvieron las medidas del cambio volumétrico.
- 11.3.3** Se debe incluir la misma información mencionada en los numerales 11.1.1 a 11.1.4 y 11.1.9.

**12 PRECISIÓN Y SESGO**

---

- 12.1** *Precisión* – La precisión de este método de ensayo aun no se ha establecido.
- 12.2** *Sesgo* – El procedimiento descrito en este método para medir la expansión unidimensional, la contracción y la presión de expansión de las mezclas de suelo-cal no presenta sesgo, debido a que los valores del límite de contracción y de expansión sólo se pueden definir en términos de este método de ensayo.

**13 NORMAS DE REFERENCIA**

---

ASTM D 3877 – 08