

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA DE MUESTRAS DE SUELO ESTABILIZADAS CON PRODUCTOS QUÍMICOS NO TRADICIONALES

INV E 632 - 22

1 OBJETO

- 1.1** Esta norma se refiere a la preparación, curado y determinación de la resistencia a la compresión inconfiada de muestras de suelo estabilizado con productos químicos no tradicionales.
- 1.2** Se proporcionan tres procedimientos alternativos.
- 1.2.1** *Método A* - Determinación de la resistencia a la compresión inconfiada de probetas en estado seco posterior a la etapa de curado.
- 1.2.2** *Método B* - Determinación de la resistencia a la compresión inconfiada de probetas sometidas a inmersión en agua durante una hora posterior a la etapa de curado.
- 1.2.3** *Método C* - Determinación de la resistencia a la compresión inconfiada de probetas sometidas al ensayo de saturación por ascensión capilar.

2 RESUMEN DEL MÉTODO

- 2.1** Probetas de suelo estabilizado con productos químicos no tradicionales, con peso unitario y humedad de compactación previamente definidos a partir del ensayo descrito en la norma INV E-631, se someten a compresión inconfiada luego de un periodo de curado. La resistencia a la compresión de las probetas se calcula a partir de la carga máxima o de la carga correspondiente a una deformación unitaria axial de 5%.

3 IMPORTANCIA Y USO

- 3.1** La resistencia a la compresión inconfiada de muestras curadas de suelo estabilizado con productos químicos no tradicionales permite establecer su idoneidad para la estabilización de subrasantes o de las capas de la estructura de un pavimento.

4 EQUIPO

- 4.1** *Moldes*– Deberán ser cilíndricos, metálicos y con las dimensiones y capacidades indicadas en la norma INV E-631. Deberán tener collares ajustables, que permitan la preparación de muestras compactadas de suelo con estabilizante químico no tradicional y agua, con la altura y volumen deseados. El molde y el collar deberán estar contruidos de manera que se puedan ajustar firmemente a una placa del mismo material.
- 4.2** *Martillo*– Un martillo metálico, que cumpla con las dimensiones y las capacidades indicadas en la norma INV E-631. El martillo deberá estar provisto de una guía apropiada que controle la altura de la caída del golpe desde una altura libre por encima de la mezcla de suelo-estabilizante, deberá tener suficiente luz libre, para que ni la caída del martillo ni la cabeza tengan restricciones.
- 4.3** *Extractor de muestras* – Un gato, extractor, u otro dispositivo adecuado para sacar del molde las muestras compactadas.
- 4.4** *Balanzas* – Una balanza de 11.5 kg (40 lb) de capacidad, legible a 0.005 kg (0.01 lb) y otra de 1 kg (2.2 lb) de capacidad, con sensibilidad de 1 kg.
- 4.5** *Horno* –Un horno termostáticamente controlado, preferiblemente de ventilación forzada, que pueda mantener una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$.
- 4.6** *Regla metálica* – Una regla recta de acero endurecido, al menos de 250 mm (10”) de longitud. Deberá tener un borde biselado y, al menos, una cara plana en sentido longitudinal.
- 4.7** *Tamices* – Con aberturas cuadradas de 2.0 mm (No.10).
- 4.8** *Mezcladora mecánica* – Que pueda producir mezclas uniformes y homogéneas de suelo, estabilizante químico no tradicional y agua.
- 4.9** *Dispositivos para medir las dimensiones de las probetas compactadas* – Para medir la altura y el diámetro, con una precisión de 0.1%.
- 4.10** *Recipientes plásticos* – Impermeables y de cierre hermético, para el almacenamiento de las muestras después de la compactación. El plástico deberá ser rígido, para proteger las muestras durante el manejo.
- 4.11** *Bandejas y recipientes metálicos*- Bandejas anchas y poco profundas, para mezclar y secar materiales. Recipiente para determinar la humedad de las muestras.

- 4.12** *Cabina termostática* – Donde se pueda mantener la temperatura a 40.0 ± 1.0 °C (104.0 ± 1.8 ° F), para el curado de las muestras compactadas. Se puede usar un cuarto húmedo, pero no es indispensable.
- 4.13** *Cronómetro* – Con marcas cada segundo, para controlar el tiempo, con el fin de establecer la rata de aplicación de carga.
- 4.14** *Piedras porosas circulares* – Con diámetros ligeramente menos a 101.6 mm (4") y de 152.4 mm (6"), con altura de 50.8 mm (2").
- 4.15** *Papeles de filtro* – Papel de filtro Tipo II, libre de cenizas; por ejemplo, Whatman No. 42, Fisherbrand 9-790A Y Schleicher & Schuell No. 589 White Ribbon. Los papeles de filtro se presentan comercialmente en forma circular; un diámetro conveniente es de 5.5 cm (2.2").
- 4.16** *Aparato de compresión* – El aparato de compresión puede ser una báscula de plataforma equipada con un marco de carga activado con un gato de tornillo; un mecanismo de carga hidráulica, o cualquier otro instrumento de compresión con suficiente capacidad de control para proporcionar la velocidad de carga. En lugar de la báscula de plataforma, la carga puede ser medida con un anillo o una celda de carga fijada al marco. Para suelos estabilizados con una resistencia a la compresión inconfiada igual o mayor de 100 kPa (15 lbf/ pg^2), el aparato de compresión debe ser capaz de medir los esfuerzos compresivos con una precisión de 5 kPa (0.72 lbf/ pg^2).
- 4.17** *Indicador de deformación* – Graduado a 0.02 mm (0.001") o menos, que tenga un rango de medida suficiente para medir el 5% de la longitud de la muestra de ensayo. Se puede usar un dispositivo de medición electrónica que cumpla estos requisitos.
- 4.18** *Equipo misceláneo* – Pequeñas herramientas y accesorios, como un mortero metálico, pisón metálico forrado con caucho, espátulas, cucharas, palustres, papeles filtro, etc.

5 MATERIALES

- 5.1** *Suelo estabilizado con producto químico no tradicional* – El suelo estabilizado deberá ser mezclado de manera rigurosa, además, el proveedor del producto químico estabilizante no tradicional deberá definir rangos de aceptación de materia orgánica u otra sustancia que pueda perjudicar la correcta interacción química de los estabilizantes con el suelo.

5.2 *Agua* – Potable, libre de ácidos, álcalis y aceites.

5.3 *Bolsas plásticas.*

6 PROCEDIMIENTO

6.1 Muestras de ensayo:

6.1.1 Estimación de la cantidad de estabilizante para la elaboración de las muestras de ensayo:

La dosificación del producto estabilizante químico depende del diseño de la mezcla del sistema de estabilización dado en los documentos del proyecto.

6.1.2 Determinación de la humedad óptima de la mezcla suelo-estabilizante:

6.1.2.1 Los valores de densidad máxima y humedad óptima se deberán determinar de acuerdo con la norma INV E-631. Se calculan las cantidades de suelo, estabilizante químico y agua, necesarias para elaborar una muestra de ensayo, así como la cantidad total para preparar el número de muestras que requiere un ensayo completo de compactación. Se preparará 10% más del material calculado, para tener en cuenta posibles desperdicios.

6.1.2.2 Las mezclas de suelo-estabilizante-agua se deben elaborar de acuerdo con el diseño de la mezcla del sistema de estabilización dados en los documentos del proyecto. Se almacenarán a temperatura ambiente en recipientes plásticos e impermeables antes de ser compactadas. A menos de que la especificación del proveedor del producto estabilizante diga lo contrario.

6.1.2.3 Se compactan las mezclas de suelo-estabilizante-agua, según lo establecido en la norma INV E-631. La superficie de cada capa compactada se deberá escarificar antes de adicionar el material para la siguiente capa.

6.1.2.4 Terminada la compactación y el enrase de cada probeta, se debe remover cuidadosamente del molde determinando su masa, longitud y diámetro promedio a la mitad de su altura.

6.1.2.5 Siguiendo el procedimiento descrito en la norma INV E-631, se calculan las densidades de las probetas y las humedades con las cuales fueron compactadas, se elabora la curva de compactación y se determinan la densidad seca máxima y la humedad óptima de la mezcla.

6.2 *Fabricación de probetas para el ensayo de compresión inconfiada:*

6.2.1 Se elabora la mezcla suelo-estabilizante-agua de acuerdo con la dosificación $\pm 1\%$ estimada en el numeral 6.1.1 y con la humedad óptima $\pm 1\%$ definida en el numeral 6.1.2.5 en la cantidad necesaria para fabricar cinco probetas compactadas. La mezcla se deberá mantener a temperatura ambiente en un recipiente plástico e impermeable, antes de fabricar los especímenes de prueba, a menos de que el proveedor del producto estabilizante diga lo contrario.

6.2.2 Se deben compactar las probetas con la energía de compactación que describe la norma INV E-631, para que se produzca la densidad seca mínima exigida por la especificación de construcción. Así, por ejemplo, si el nivel de compactación exigido por la especificación es 100% al elaborar las probetas se aplicará a cada capa el número de golpes indicado en la INV E-631, pero si la exigencia es de 98%, se deberá ajustar el número de golpes por capa, con el fin de que la densidad de la probeta se acomode a este requisito.

6.3 *Curado de las probetas*

Previo a la fabricación de las probetas de ensayo se podrá elegir cualquiera de las opciones de curado descritas a continuación conforme a la naturaleza del estabilizante químico no tradicional, a menos de que el proveedor del producto estabilizante determine un método particular para el curado, durante un tiempo de 3, 7, 14 o 28 días de acuerdo a lo que estipulen los documentos del proyecto.

6.3.1 *Opción de curado 1:* Inmediatamente después de su fabricación, las probetas se extraen de los moldes, y son puestas al aire libre en condiciones de temperatura ambiente entre 20° y 30 °C (68° a 86° F) hasta que se vaya a determinar la resistencia a la compresión inconfiada.

6.3.2 *Opción de curado 2:* Inmediatamente después de su fabricación, las probetas se extraen de los moldes, se colocan en bolsas plásticas herméticas para conservar el 100% de la humedad de la muestra hasta que se vaya a determinar la resistencia a la compresión inconfiada.

- 6.3.3** *Opción de curado 3:* Inmediatamente después de su fabricación, las probetas se extraen de los moldes, y se envuelven en una película plástica (tipo vinipel, stretch o similar), hasta que se vaya a determinar la resistencia a la compresión inconfiada.
- 6.3.4** *Opción de curado 4:* Inmediatamente después de su fabricación, las probetas se extraen de los moldes y se almacenan en un cuarto húmedo que cumpla con los requisitos de la especificación C 511 de la ASTM, hasta que se vaya a determinar la resistencia a la compresión inconfiada.

6.4 *Determinación de la resistencia a la compresión inconfiada*

- 6.4.1** *Método A - Determinación de la resistencia a la compresión inconfiada de probetas en estado seco posterior a la etapa de curado.*

- 6.4.1.1** El espécimen, previamente medido y pesado, se coloca en la prensa de ensayo, de manera que quede centrada sobre la platina de base. Se ajusta el dispositivo de carga hasta que la platina superior haga contacto con la probeta y se coloca en cero el indicador de deformación.

Nota 1: La cara de la probeta que tendrá contacto con la platina superior será la cara inversa a la que recibió los golpes de compactación.

- 6.4.1.2** Se aplica carga de manera continua y sin aceleración brusca, de manera que produzca una velocidad de deformación axial de, aproximadamente 0.5 a 2.0 % por minuto. Se debe elegir la rata de deformación de manera que el tiempo para alcanzar la falla no exceda de 15 min. La velocidad con la que se aplicará la carga podrá variar en función del comportamiento que exhiban los especímenes ante la carga.

Nota 2: muestras blandas que exhiban una deformación muy elevada a la falla, se deberán ensayar con una velocidad de deformación mayor. Por el contrario, especímenes muy rígidos o frágiles cuya deformación a la falla sea reducida, se deben ensayar con una velocidad menor.

- 6.4.1.3** Se anotan la carga, la deformación y el tiempo, a intervalos suficientes para definir la curva esfuerzo-deformación (al menos de 10 a 15 puntos). Se registra la carga máxima aplicada a la probeta (Figura 632-1).

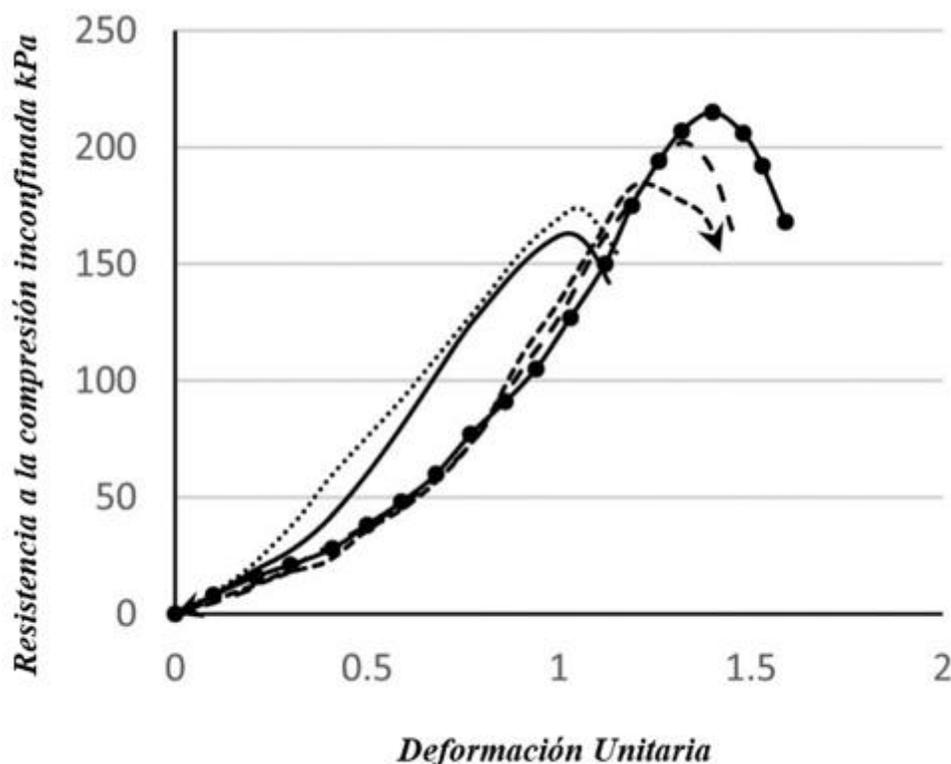


Figura 632-1. Gráfico esfuerzo-deformación ensayo de resistencia a la compresión inconfiada

- 6.4.1.4** Se continúa cargando la probeta hasta que los valores de carga comienzan a disminuir al aumentar la deformación, o hasta que se alcance una deformación unitaria axial de 5%.
- 6.4.1.5** Se dibuja un esquema o se toma una fotografía de la probeta luego de finalizado el ensayo, donde se aprecie el modo de falla.
- 6.4.1.6** Se mide y se anota el diámetro de la probeta fallada en tres direcciones en la mitad de su altura, aproximado a 0.2 mm (0.01”).
- 6.4.1.7** Terminado el ensayo, se determina el contenido de humedad de la muestra de ensayo.
- 6.4.2** *Método B* - Determinación de la resistencia a la compresión inconfiada de probetas sometidas a inmersión en agua durante una hora posterior a la etapa de curado.
 - 6.4.2.1** Al final del periodo de curado, los especímenes se sumergen en agua por 1 hora.

6.4.2.2 Se remueven los especímenes del agua, se deja secar superficialmente la probeta e inmediatamente se efectúan los ensayos de compresión. Se efectúa el procedimiento descrito desde el numeral 6.4.1.1 hasta el 6.4.1.7 de la presente norma de ensayo.

6.4.3 Método C – Determinación de la resistencia a la compresión inconfiada de probetas sometidas al ensayo de saturación por ascensión capilar.

6.4.3.1 Al final del periodo de curado se coloca el papel filtro sobre la piedra porosa y se verifica que el papel filtro esté contenido en el área de la cara de contacto con el material poroso.

6.4.3.2 Se ubica la piedra porosa dentro de la bandeja llena de agua, asegurando que el nivel del agua alcance la totalidad de la altura del material poroso, se espera hasta que la piedra porosa se sature.

6.4.3.3 Se coloca el espécimen sobre el papel filtro y la piedra porosa. Registrar el tiempo de inicio 0, como inicio del ensayo.

6.4.3.4 Se registra la altura que ha ascendido el agua en la probeta durante 15 minutos de la siguiente manera:

- Durante los primeros 5 minutos, medir la altura cada 10 segundos.
- Durante los siguientes 10 minutos medir la altura cada minuto.

6.4.3.5 Se observa la probeta hasta que alcance la saturación completa, en ese momento se empieza a medir y registrar los pesos de la probeta hasta alcanzar una masa constante o una variación no mayor a 0.1 g.

Nota 3: si el espécimen se desmorona parcial o totalmente durante el ensayo de ascensión capilar, se descarta la muestra.

6.4.3.6 Se remueven los especímenes de las piedras porosas e inmediatamente se efectúan los ensayos de compresión. Se efectúa el procedimiento descrito desde el numeral 6.4.1.1 hasta el 6.4.1.7 de la presente norma de ensayo.

7 CÁLCULOS

- 7.1** Para cada carga aplicada, se calcula la deformación unitaria axial al 0.1% más cercano, con la expresión:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad [632.1]$$

Donde ε : Deformación unitaria axial para una carga dada, %;
 ΔL : Cambio de longitud de la probeta según las lecturas del indicador de deformación, mm (*pg*);
 L_0 : Longitud inicial de la probeta, mm (*pg*).

- 7.2** Se calcula la sección transversal promedio para cada carga registrada, como se indica a continuación:

7.2.1 Si la mayor medida del diámetro de la probeta durante el ensayo indica que éste no cambia durante la prueba, se usará la sección transversal original.

7.2.2 Si se produce deformación radial durante el ensayo, pero la probeta mantiene su forma cilíndrica (asumiendo que el volumen de la probeta no cambie), su sección transversal promedio corregida se deberá calcular con la expresión:

$$A = \frac{A_0}{\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)} \quad [632.2]$$

Donde A : Sección transversal corregida de la probeta, mm^2 (*pg*²);
 A_0 : Sección transversal inicial de la probeta, mm^2 (*pg*²);
 ε : Deformación unitaria axial para una carga dada, %.

7.2.3 Si la deformación radial se incrementa durante el ensayo y la probeta adquiere forma de barril, la sección transversal promedio corregida se deberá calcular con la expresión:

$$A = \frac{A_0}{\left(1 - \frac{0.6\varepsilon}{100}\right)} \quad [632.3]$$

Donde A : Sección transversal corregida de la probeta, mm^2 (*pg*²);
 A_0 : Sección transversal inicial de la probeta, mm^2 (*pg*²);
 ε : Deformación unitaria axial para una carga dada, %.

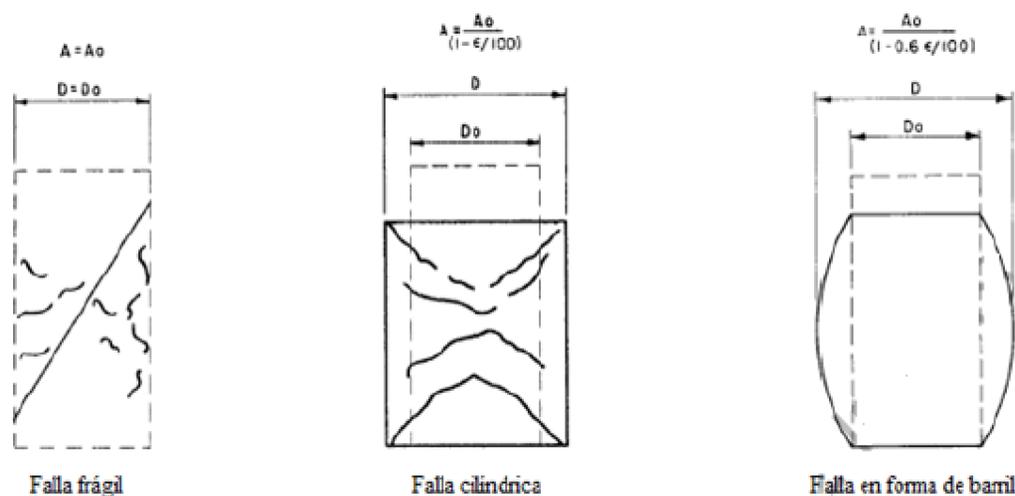


Figura 632-2 Determinación del área corregida

- 7.3** Se calcula el esfuerzo de compresión para una determinada carga aplicada, con la fórmula.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [632.4]$$

Donde σ : Esfuerzo de compresión, kPa (lb/peg²);
 P: Carga axial aplicada a la probeta, kN (lbf);
 A: Sección transversal promedio correspondiente, mm² x 10⁻⁶ (peg²).

- 7.4** Se elige el máximo valor de esfuerzo de compresión o el esfuerzo de compresión al 5% de deformación, el que ocurra primero, valor que se registra como resistencia a la compresión inconfiada de la probeta (q_u). Si se considera necesario para una mejor interpretación, se elabora un gráfico de esfuerzo-deformación.
- 7.5** Se promedian las resistencias a la compresión inconfiada de las cinco probetas, promedio que constituye el resultado del ensayo.
- 7.6** Si el valor de q_u obtenido es inferior al mínimo exigido por los documentos del proyecto, las probetas se deben descartar y se volverá a replantear la fórmula de trabajo estimada en el numeral 6.1.1 de la presente norma y se deberán elaborar probetas adicionales, repitiendo el procedimiento.

- 7.7 Se calcula la velocidad de ascenso capilar, con la formula.

$$Velocidad_{ascenso\ capilar} = \frac{\Delta\ altura\ de\ la\ probeta}{\Delta\ Tiempo\ de\ ascenso} \quad [632.5]$$

Donde:

$$\begin{aligned} Velocidad_{ascenso\ capilar} &= \text{mm/min} \\ altura\ de\ la\ probeta &= \text{mm} \\ Tiempo\ de\ ascenso &= \text{min} \end{aligned}$$

- 7.8 Se calcula el índice de resistencia al agua (IRA), que consiste en la relación porcentual entre las resistencias a la compresión posterior al proceso de inmersión o ascensión capilar y la correspondiente en estado seco.

$$IRA\ (\%) = \frac{Resistencia\ a\ la\ compresión\ posterior\ a\ la\ inmersión\ o\ capilaridad}{Resistencia\ a\ la\ compresión\ en\ estado\ seco} * 100 \quad [632.6]$$

8 INFORME

- 8.1 El informe debe incluir lo siguiente:
- 8.1.1 Identificación de la mezcla (características del suelo, tipo de estabilizante usado, dosificación suelo-estabilizante).
 - 8.1.2 Altura y diámetro promedio de las probetas al comienzo del ensayo.
 - 8.1.3 Relación altura/diámetro de las probetas.
 - 8.1.4 Sección transversal promedio de las probetas, mm^2 (pg^2).
 - 8.1.5 Velocidad de deformación usada en el ensayo, % por minuto.
 - 8.1.6 Masa de la probeta antes del ensayo de resistencia a la compresión confinada.
 - 8.1.7 Carga máxima para cada probeta, kN (lbf).
 - 8.1.8 Deformación a la falla de cada probeta,
 - 8.1.9 Periodo y detalles de curado de las probetas.

- 8.1.10** Gráficos de esfuerzo-deformación.
- 8.1.11** Esquemas o fotografías de las fallas.
- 8.1.12** Resistencia a la compresión inconfiada de cada probeta y promedio, kPa (lbf/pg²).
- 8.1.13** Registrar el índice de resistencia al agua IRA %.

9 DOCUMENTOS DE REFERENCIA

INV E-605-13

Universidad de Antioquia, "PROTOCOLO VELOCIDAD DE ASCENSO CAPILAR Y TIEMPO DE SATURACIÓN", PR-ST-042 Versión 2, 15/01/2018.