

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA DE MEZCLAS COMPACTADAS DE SUELO-CAL

INV E – 605 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Este método se refiere a la preparación, curado y determinación de la resistencia a la compresión inconfiada de mezclas de suelo estabilizado o tratado con cal.
- 1.2** Esta norma reemplaza la norma INV E-801-07.

2 RESUMEN DEL MÉTODO

- 2.1** Probetas de suelo-cal, elaboradas con el contenido de cal determinado a partir del ensayo descrito en la norma INV E-601, a un peso unitario y una humedad de compactación previamente definidos, se someten a compresión inconfiada luego de un período de curado. La resistencia a compresión de las probetas se calcula a partir de la carga máxima o de la carga correspondiente a una deformación axial de 5 %.

3 IMPORTANCIA Y USO

- 3.1** La resistencia a la compresión inconfiada de mezclas curadas de suelo-cal-agua permite establecer su idoneidad para el mejoramiento de subrasantes o la estabilización de las capas inferiores de un pavimento.

4 EQUIPO

- 4.1** *Moldes de compactación con collar removible y placa de base* – Deberán ser cilíndricos, metálicos, y con las dimensiones y capacidades indicadas en la norma INV E-141. Deberán tener collares ajustables de, aproximadamente, 60 mm (2-3/8") de altura, que permitan la preparación de muestras compactadas de suelo con cal 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.

Nota 1: La norma INV E-141 prevé tres procedimientos alternativos para la ejecución del ensayo de compactación. En las especificaciones se deberá indicar el método por usar para el material a ensayar. Si no se especifica ninguno, regirá el método A.

- 4.2 Martillo de compactación** – Un martillo metálico, con una masa de 2.495 ± 0.009 kg (5.5 ± 0.02 lb), que tenga una cara plana circular de diámetro 50.80 ± 0.25 mm (2.00 ± 0.01 "). El martillo deberá estar provisto de una guía apropiada que controle la altura de la caída del golpe desde una altura libre de 305.2 ± 2 mm (12.00 ± 0.06 ") por encima de la mezcla suelo-cal. La guía debe tener al menos 4 agujeros de ventilación, de diámetro no menor de 9.5 mm ($3/8$ "), espaciados aproximadamente a 90° (1.57 rad.) y a 19 mm ($3/4$ ") de cada extremo, y deberá tener suficiente luz libre, para que ni la caída del martillo ni la cabeza tengan restricciones.

Nota 2: Se permite el uso de un martillo de operación mecánica que aplique la misma energía que el de operación manual.

- 4.3 Extractor de muestras** – Prensa para extraer las probetas compactadas de los moldes.
- 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 posibilidad de lectura de 1 g.
- 4.5 Horno** – Termostáticamente controlado, capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^\circ$ C ($230 \pm 9^\circ$ F).
- 4.6 Regla metálica** – De acero endurecido, de borde recto, 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 19.0 mm, 4.75 mm, 425 μ m y 75 μ m ($3/4$ ", No. 4, No. 40 y No. 200).
- 4.8 Mezcladora mecánica** – Que pueda producir mezclas uniformes y homogéneas de suelo, cal y agua.
- 4.9 Dispositivo 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 su manejo.

- 4.11** *Bandejas y recipientes metálicos* – Bandejas anchas y poco profundas, para mezclar y secar materiales. Recipientes rectangulares de acero inoxidable, de aproximadamente 230 × 405 × 57 mm (9 × 16 × 2 ¼"), para la saturación de las probetas por capilaridad. Recipientes para determinar la humedad de las muestras.

Nota 3: La cal puede reaccionar con metales como el aluminio y el zinc. Por lo tanto, no se podrán utilizar recipientes que contengan dichos metales para el almacenamiento de la cal, ni para el curado de las probetas compactadas.

- 4.12** *Cabina termostática* – Donde se pueda mantener la temperatura a $40.0 \pm 1.0^{\circ}$ C ($104.0 \pm 1.8^{\circ}$ 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 menores de 101.6 mm (4") y de 152.4 mm (6"), con una altura de 50.8 mm (2").

- 4.15** *Prensa y dispositivo indicador de carga* – Prensa con suficiente capacidad y control para suministrar una rata de deformación axial de 0.5 a 2.0 % por minuto. El dispositivo debe estar equipado de manera que se aplique la carga a la muestra sin excentricidad. Para especímenes de suelo-cal cuya resistencia a la compresión sea menor de 100 kPa (15 lbf/pg²), el indicador de carga deberá tener una sensibilidad tal, que el esfuerzo aplicado se pueda calcular con una exactitud de ± 0.7 kPa (0.1 lbf/pg²). Para especímenes cuya resistencia a la compresión sea de 100 kPa (15 lbf/pg²) o mayor, el indicador de carga deberá tener una sensibilidad tal, que el esfuerzo aplicado pueda ser calculado con una exactitud de ± 5 kPa (0.7 lbf/pg²).

- 4.16** *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.

- 4.17** *Equipo misceláneo* – Una provisión de pequeñas herramientas y accesorios, como un mortero metálico, pisón metálico forrado con caucho, espátulas, cucharas, palustres, papeles de filtro, etc.

5 MATERIALES

- 5.1** *Cal* – Se empleará la cal prevista para la ejecución de las obras. Sólo se podrá emplear cal fresca, y las condiciones de su almacenamiento deberán impedir su combinación con el CO₂ del aire.

Nota 4: La cal reacciona químicamente con el agua, despidiendo calor. Por lo tanto, siempre que se vaya a manejar, se deberán utilizar elementos adecuados para la seguridad personal, tales como guantes, lentes de protección, respirador y delantal plástico.

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

- 5.3** *Bolsas plásticas.*

- 5.4** *Geotextil absorbente.*

6 PROCEDIMIENTO

- 6.1** *Evaluación inicial del suelo:*

- 6.1.1** Se determina la cantidad de suelo que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200), mediante la norma INV E-123.
- 6.1.2** Se determina la plasticidad del suelo, empleando las normas INV E-125 e INV E-126.
- 6.1.3** Generalmente, un suelo con un pasante mayor de 25 % por el tamiz de 75 µm (No. 200) y con un índice de plasticidad de 10 o mayor, es un buen candidato para la estabilización con cal. Suelos con plasticidad menor se pueden estabilizar con éxito, si cumplen el requisito indicado en el numeral 6.2.1 y, además, permiten alcanzar la resistencia a compresión exigida por las especificaciones.

- 6.2** *Muestras de ensayo:*

- 6.2.1** *Estimación de la cantidad de cal para la elaboración de las muestras de ensayo:*
- 6.2.1.1** Mediante la medición del pH se estima el porcentaje de cal requerido para estabilizar el suelo, empleando el procedimiento descrito en la norma INV E-601. Con este

porcentaje se deben preparar las mezclas mencionadas en el numeral 6.2.2.

6.2.2 *Determinación de la humedad óptima de la mezcla suelo-cal:*

6.2.2.1 Los valores de densidad máxima y humedad óptima se deberán determinar de acuerdo con la norma INV E-141. Por lo tanto, se debe elegir el molde apropiado de acuerdo con el procedimiento de compactación por utilizar (ver nota 1). Se calculan las cantidades de suelo, cal y agua, necesarias para elaborar una muestra de ensayo, así como las totales para preparar el número de muestras que requiere un ensayo completo de compactación. Se deberá preparar 10 % más del material calculado, para tener en cuenta posibles pérdidas y desperdicios.

6.2.2.2 Las mezclas suelo-cal-agua se deben elaborar de acuerdo con la norma INV E-603, con contenidos crecientes de agua y, en seguida, se almacenan a temperatura ambiente en recipientes plásticos cerrados herméticamente e impermeables, durante 1 hora. Si la mezcla se ha elaborado con cal viva, se almacenará durante 24 horas para asegurar la hidratación de la cal.

6.2.2.3 Se compactan las mezclas en los moldes apropiados, según lo establecido en la norma INV E-141. La superficie de cada capa compactada se deberá escarificar antes de adicionar el material para la siguiente.

Nota 5: Cada mezcla se deberá extraer del recipiente cerrado solamente en el instante en que se va a proceder a su compactación.

6.2.2.4 Terminada la compactación y el enrase de cada probeta, se la remueve cuidadosamente del molde y se determinan su masa, su longitud y su diámetro promedio a la mitad de su altura.

6.2.2.5 Siguiendo el procedimiento descrito en la norma INV E-141, 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.

6.3 *Fabricación de probetas para el ensayo de compresión inconfina:*

6.3.1 Se elabora una mezcla suelo-cal-agua con el porcentaje de cal indicado en el numeral 6.2.1.1 y con la humedad óptima definida en el numeral 6.2.2.5 ± 1 %, en la cantidad necesaria para fabricar dos probetas compactadas, en el molde previamente escogido. La mezcla se deberá mantener durante 24 horas a temperatura ambiente en un recipiente plástico cerrado herméticamente e impermeable, antes de fabricar los especímenes de prueba.

6.3.2 Cumplido el plazo de almacenamiento, se compactan las dos probetas con una energía tal, que dé lugar a 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 norma INV E-141, 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.

6.4 *Curado de las probetas:*

6.4.1 Inmediatamente después de su fabricación, las probetas de prueba se extraen de los moldes, se envuelven en bolsas de plástico y se colocan en un recipiente cerrado, sellado e impermeable, a una temperatura de $40.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ ($104.0 \pm 1.8^{\circ}\text{F}$), durante 7 días.

6.4.2 Cumplido este plazo, las probetas se retiran del recipiente, se les remueven las bolsas plásticas, se envuelven con un geotextil húmedo absorbente, se colocan sobre sendas piedras porosas y se someten a temperatura ambiente a un proceso de saturación por capilaridad por 24 horas, durante las cuales el nivel de agua debe alcanzar la superficie superior de cada piedra porosa y estar en contacto con el geotextil, pero no entrar en contacto directo con la probeta (Figura 605 - 1).



Figura 605 - 1. Saturación de las probetas por capilaridad

6.5 Determinación de la resistencia a la compresión inconfina:

6.5.1 Terminado el período de curado, se coloca cada probeta 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 hace contacto con la probeta y se coloca en cero el indicador de deformación.

6.5.2 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.

Nota 6: 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 de deformación menor.

6.5.3 Se anotan la carga, la deformación y el tiempo, a intervalos suficientes para definir la curva esfuerzo-deformación (generalmente son suficientes de 10 a 15 puntos). Se registra la carga máxima aplicada a la probeta.

6.5.4 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 de 5 %.

6.5.5 Se dibuja un esquema o se toma una fotografía de la probeta luego de finalizado el ensayo, donde se aprecie el modo de falla.

6.5.6 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").

7 CÁLCULOS

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

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad [605.1]$$

Donde: ϵ : Deformación 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 (Figura 605 - 2), 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:

$$A = \frac{A_0}{\left(1 - \frac{\epsilon}{100}\right)} \quad [605.2]$$

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:

$$A = \frac{A_0}{(1 - 0.6\epsilon/100)} \quad [605.3]$$

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, %.

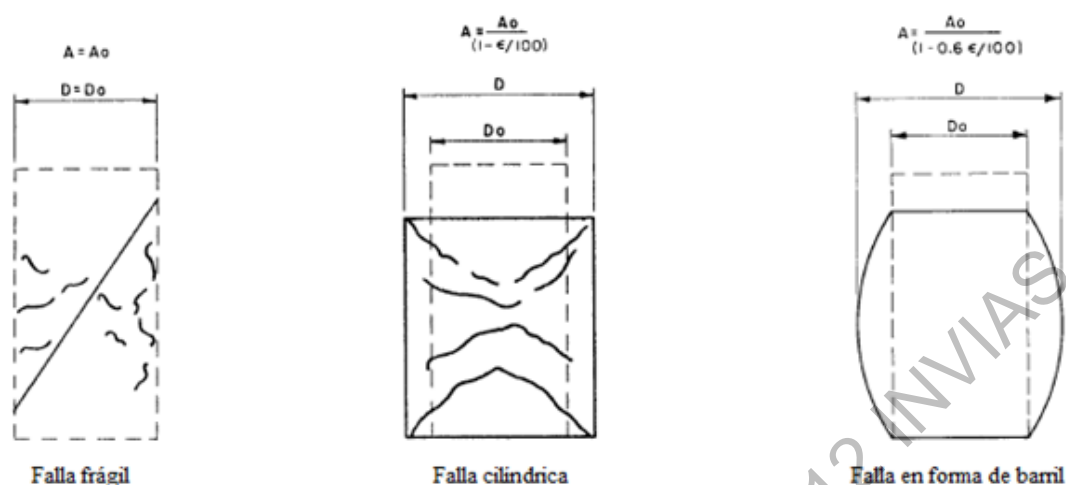


Figura 605 - 2. Determinación del área corregida

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

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [605.4]$$

Donde: σ : Esfuerzo de compresión, kPa (lbf/pg²);

P: Carga axial aplicada a la probeta, kN (lbf);

A: Sección transversal promedio correspondiente, mm²×10⁻⁶ (pg²).

- 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 esfuerzo-deformación.

- 7.5** Se promedian las resistencias a la compresión inconfiada de las dos probetas, promedio que constituye el resultado del ensayo.

Nota 7: Si el valor de q_u obtenido es inferior al mínimo exigido por las especificaciones, se deberán elaborar probetas adicionales con mayores contenidos de cal, repitiendo el procedimiento.

8 INFORME

8.1 El informe del ensayo debe contener, como mínimo, la siguiente información:

- 8.1.1** Identificación de la mezcla (características del suelo, tipo de cal usada, % de cal).
- 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** Carga máxima para cada probeta, kN (lbf).
- 8.1.7** Deformación a la falla de cada probeta, %.
- 8.1.8** Período y detalles del curado de las probetas.
- 8.1.9** Gráficos esfuerzo–deformación (si se considera necesario).
- 8.1.10** Esquemas o fotografías de las fallas.
- 8.1.11** Resistencia a la compresión inconfiada de cada probeta y promedio, kPa (lbf/pg^2).

9 DOCUMENTOS DE REFERENCIA

NATIONAL LIME ASSOCIATION, "Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil", Lime Technical Brief, October 2006

ASTM D 5102 – 09