

RELACIONES HUMEDAD–DENSIDAD DE MEZCLAS DE SUELO CEMENTO

INV E – 611 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Estos métodos se refieren a la determinación de la relación entre la humedad y la densidad de mezclas de suelo–cemento cuando se compactan del modo que se prescribe en esta norma y antes de que ocurra la hidratación del cemento.
- 1.2** Para la compactación se emplean un molde de 944 cm^3 (1/30 pie³) y un martillo de 2.49 kg (5.5 lb) que cae desde una altura de 305 mm (12"), y se utilizan dos métodos de acuerdo con la granulometría del material:
- 1.2.1** *Método A*, para muestras de suelo que pasan el tamiz de 4.75 mm (No. 4). Se deberá emplear cuando el 100 % de la muestra del suelo pasa este tamiz (Ver Sección 5).
- 1.2.2** *Método B*, para muestras de suelo que pasan el tamiz de 19.0 mm (¾"). Se deberá emplear cuando parte del suelo quede retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) (Ver Sección 6), pero no más de 30 % quede retenido en el tamiz de 19.0 mm (¾").
- 1.3** Esta norma reemplaza la norma INV E–806–07.

2 IMPORTANCIA Y USO

- 2.1** Mediante estos ensayos se determinan la humedad óptima y la densidad máxima (o el peso unitario máximo) que se deben emplear para moldear especímenes de suelo–cemento para el ensayo descrito en la norma INV E–612.

Nota 1: Puesto que estos ensayos se emplean en conjunto con el ensayo descrito en la norma INV E–612, la prueba difiere en tres aspectos de la descrita en la norma INV E–141. En primer lugar, esta norma permite el empleo de partículas con tamaño máximo de 19 mm (¾") en el molde de 944 cm^3 (1/30 pie³), mientras la norma INV E–141 solo permite usar partículas con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8") en este molde. En segundo lugar, en esta norma se permite que el material sobrante luego de obtener el contenido de agua de un espécimen sea mezclado con el resto de la muestra y sea reusado en la siguiente determinación. Por último, esta norma permite que el material pasante por el tamiz de 75 mm (3") y retenido en el tamiz de 19.0 mm (¾") sea descartado y reemplazado por una masa igual de material que

pase el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") y quede retenido en el de 4.75 mm (No.4), procedimiento que no está permitido en la norma INV E-141.

3 EQUIPO

- 3.1** *Molde* – Deberá ser cilíndrico de paredes sólidas, fabricado con metal y con las dimensiones y capacidad mostradas en la Figura 611 - 1. Deberá tener un collar ajustable de aproximadamente 63.5 mm (2 $\frac{1}{2}$) de altura, que permita la preparación de especímenes compactados de mezclas de suelo cemento de la altura y el volumen deseados. El conjunto del molde y del collar deberá estar construido de manera que se pueda ajustar firmemente a una placa desmontable hecha del mismo material. El molde deberá tener una capacidad de $944 \pm 11 \text{ cm}^3$ ($1/30 \pm 0.0004 \text{ pie}^3$) con un diámetro interno de $101.60 \pm 0.41 \text{ mm}$ ($4.000 \pm 0.016"$) y una altura de $116.43 \pm 0.13 \text{ mm}$ ($4.584 \pm 0.005"$). El molde puede ser, también, de tipo dividido, consistente en dos secciones semicirculares que se puedan ajustar con seguridad para formar un cilindro con las dimensiones recién descritas.
- 3.2** *Martillo* – Puede ser de operación manual o mecánica. Debe tener una caída libre de $305 \pm 1 \text{ mm}$ ($12.00 \pm 0.05"$) por encima de la elevación del suelo. Su masa debe ser $2.495 \pm 0.009 \text{ kg}$ ($5.5 \pm 0.02 \text{ lb}$) y la cara que golpea el suelo debe ser plana y circular con un diámetro de $50.80 \pm 0.13 \text{ mm}$ ($2.000 \pm 0.005"$) cuando el martillo es nuevo. El martillo deberá ser reemplazado si la cara de impacto se desgasta o se amplía al punto de que el diámetro excede de $50.80 \pm 0.25 \text{ mm}$ ($2.000 \pm 0.01"$).
- 3.2.1** *Martillo de operación manual* – El martillo deberá estar equipado con una manga guía con espacio para que la caída libre del eje y de la cabeza de martillo no se vea restringida. La manga guía deberá tener al menos cuatro agujeros para ventilación en cada extremo (ocho en total), con diámetro no menor de 9.5 mm ($3/8"$) espaciados aproximadamente 90 grados (1.57 radianes) y cuyos centros se encuentren localizados a $19 \pm 2 \text{ mm}$ ($\frac{3}{4} \pm 1/16"$) de cada extremo de la manga.
- 3.2.2** *Martillo con cara circular, de operación mecánica* – Debe operar de manera que proporcione a la muestra un cubrimiento uniforme y completo. Deberá quedar una luz libre de $2.5 \pm 0.8 \text{ mm}$ ($0.10 \pm 0.03"$) entre el martillo y la superficie interior del molde. El martillo deberá disponer de algún medio mecánico que lo soporte mientras no está en operación.

Nota 2: El martillo de operación mecánica con cara de sector circular no se debe usar para compactar los especímenes de ensayo de la norma INV E-611, a menos que se demuestre que los resultados de la prueba de humedecimiento y secado obtenidos sobre muestras compactadas con este martillo son similares a los obtenidos con los especímenes compactados con martillos de cara circular.

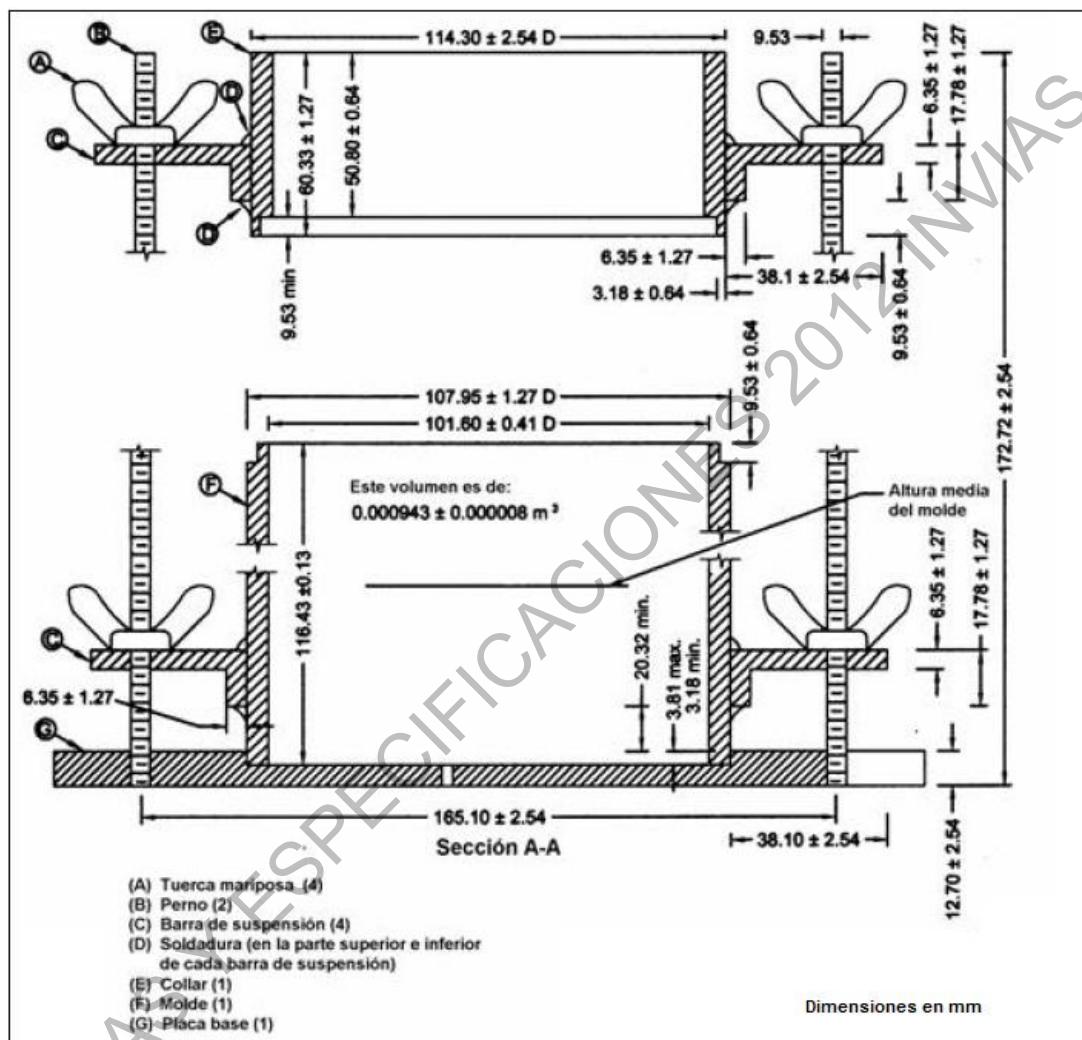


Figura 611 - 1. Molde cilíndrico

3.3 Extractor de muestras – Un gato, extractor, u otro dispositivo adecuado para sacar del molde las muestras compactadas. No se necesita si se utilizan moldes de tipo partido.

3.4 *Balanzas y básculas* – Una balanza de capacidad no menor de 11.3 kg (25 lb), con lectura a 5 g (0.01 lb); y una balanza de al menos 1000 g de capacidad, con legibilidad de 0.1 g.

- 3.5** *Horno* – Un horno termostáticamente controlado, preferiblemente de ventilación forzada, que pueda mantener una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$).
- 3.6** *Regla metálica* – Una regla de acero endurecido, al menos de 254 mm (10") de largo. La longitud total deberá ser recta, con una tolerancia de $\pm 0.1 \text{ mm}$ ($\pm 0.005"$). El borde utilizado para enrasar deberá ser biselado si su espesor es mayor de 3 mm (1/8").
- 3.7** *Tamices* – De 75, 19.0 y 4.75 mm (3", $\frac{3}{4}$ ", y No. 4).
- 3.8** *Herramientas para mezcla* – Herramientas varias como bandejas, cucharas, palustres y espátulas, o un dispositivo mecánico para mezclar las muestras de suelo con diferentes cantidades de agua.
- 3.9** *Recipiente* – Un recipiente plano y redondo para la absorción de agua por las mezclas de suelo–cemento, de alrededor de 300 mm (12") de diámetro y 50 mm (2") de profundidad.
- 3.10** *Recipientes para humedad* – Recipientes de un material resistente a la corrosión y al cambio de masa debido al calentamiento repetido, al enfriamiento, a la limpieza y a la exposición a materiales de pH variado. Si no se emplea un desecador, se deberán usar recipientes con tapa para ensayar especímenes con una masa hasta de unos 200 g; mientras que si la masa de los especímenes es mayor, se puede obviar el uso de la tapa.
- 3.11** *Cuchillo de carnicero* – De aproximadamente 250 mm (10") de longitud, para recortar la parte superior de los especímenes.

4 CALIBRACIÓN

- 4.1** Se deben realizar calibraciones antes del uso inicial, luego de reparaciones u otros eventos que puedan afectar los resultados de los ensayos, a intervalos no mayores de 1000 especímenes de ensayo, o anualmente, lo que ocurra primero, para los siguientes aparatos:
- 4.1.1** *Balanza* – Se deberá evaluar de acuerdo con la especificación ASTM D 3740.
- 4.1.2** *Moldes* – El volumen se debe determinar de conformidad con el Anexo A de la norma INV E-141.

- 4.1.3** *Martillo manual* – La distancia de caída libre y la masa del martillo se deben verificar de acuerdo con el numeral 3.2. Se deberán verificar los requisitos de la manga guía, indicados en el numeral 3.2.1.
- 4.1.4** *Martillo mecánico* – Se deberá calibrar y ajustar de acuerdo con la norma ASTM D 2168.

5 MÉTODO A: EMPLEANDO MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ DE 4.75 mm (No. 4)

5.1 *Muestra:*

- 5.1.1** La muestra para ensayo se prepara disgregando los terrones del suelo para que pase el tamiz de 4.75 mm (No. 4), pero de manera que se evite la reducción del tamaño natural de las partículas individuales. Cuando sea necesario, la muestra se seca primero hasta que sea friable bajo la acción de un palustre. El secado se puede hacer al aire o mediante el empleo de algún aparato secador, siempre y cuando la temperatura de la muestra no exceda de 60° C (140° F).
- 5.1.2** Se escoge una muestra representativa del suelo preparado como se describe en el numeral 5.1.1, con una masa mínima de 2.7 kg (6 lb).

5.2 *Procedimiento:*

- 5.2.1** Se agrega al suelo la cantidad requerida de cemento. Se mezcla completamente hasta lograr un color uniforme.
- 5.2.2** Cuando sea necesario, se agrega suficiente agua potable para humedecer la mezcla hasta aproximadamente cuatro o seis puntos porcentuales por debajo de la humedad óptima y se mezcla completamente. Con este contenido de agua, un suelo plástico, exprimido en la palma de la mano, formará una pasta que se fracturará con una ligera presión aplicada por el pulgar y las yemas de los demás dedos; mientras un suelo no plástico se hinchará sensiblemente.
- 5.2.3** Si el suelo es arcilloso, la mezcla de suelo, cemento y agua se deberá compactar dentro del recipiente plano (numeral 3.9) hasta tener un espesor más o menos de 50 mm (2"), empleando el martillo manual descrito en el numeral 3.2 o uno similar. La mezcla se cubre y se deja reposar por un período de 5 a 10 minutos para que haya dispersión de

la humedad y permitir una absorción más completa por parte del suelo–cemento.

- 5.2.4** Cumplido el período de absorción, se disgrega completamente la mezcla, sin reducir el tamaño natural de las partículas, hasta que pase totalmente por el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y se vuelve a mezclar.
- 5.2.5** Se forma un espécimen compactando en el molde, con el collar ajustado, la mezcla preparada de suelo–cemento, en tres capas iguales, de manera de obtener un espesor total compacto de alrededor de 130 mm (5"). Cada capa se compacta mediante 25 golpes del martillo, uniformemente distribuidos con una caída libre de 305 mm (12") por encima de la elevación del suelo–cemento si se usa un martillo con manga guía, o de 305 mm (12") por encima de la elevación aproximada de cada capa finalmente compactada si se emplea un martillo del tipo de instalación fija. Los golpes se deberán distribuir uniformemente sobre la superficie de la capa que se está compactando. Durante la compactación, el molde se deberá apoyar firmemente sobre un soporte uniforme, rígido y estable, como el que puede proporcionar un cilindro o un cubo de concreto con una masa no menor de 90 kg (200 lb).
- 5.2.6** Despues de la compactación, se remueve el collar de extensión, se enrasa cuidadosamente la parte superior de la probeta con ayuda del cuchillo y la regla metálica, y se determina la masa del molde con la muestra de suelo–cemento compactada, con cuatro cifras significativas.
- 5.2.7** Se extrae la probeta del molde y se corta verticalmente a lo largo de su eje. Se toma una muestra representativa de la altura completa de una de las caras cortadas, cuya masa no sea menor de 100 g (0.2 lb). Inmediatamente se determina y anota la masa del material húmedo más el recipiente que lo contiene, con cuatro cifras significativas. Se seca en el horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$) por un mínimo de 12 horas o hasta masa constante. Se determina y anota la masa del material seco más el recipiente, con cuatro cifras significativas. Se calcula la humedad y se anota el resultado como la humedad de la probeta de suelo–cemento.
- 5.2.8** Se disgrega completamente la parte remanente del espécimen moldeado hasta que, a simple vista, se considere que el material pasa en su totalidad por el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y se integra con el

material sobrante luego de obtener la muestra para determinar la humedad.

- 5.2.9** Se agrega agua en cantidad suficiente para aumentar la humedad de la mezcla de suelo–cemento en uno o dos puntos porcentuales, se mezcla y se repite el procedimiento mencionado en los numerales 5.2.5 a 5.2.8 para cada incremento de agua.
- 5.2.10** Se continua esta serie de determinaciones hasta que se produzca una disminución o no haya cambio en la masa del suelo–cemento compactado más el molde.

Nota 3: En la mayoría de los casos, este procedimiento ha resultado satisfactorio. Sin embargo, en casos en los cuales el material es de carácter frágil y el tamaño de las partículas se reduce significativamente debido a la compactación repetida, se deberán emplear muestras nuevas para cada determinación de humedad y densidad (peso unitario).

Nota 4: Para minimizar el efecto de la hidratación del cemento, el ensayo se debe realizar de manera rápida y continua hasta su finalización.

6 MÉTODO B: EMPLEANDO MATERIAL QUE PASA TAMIZ DE 19.0 mm (¾")

6.1 Muestra:

- 6.1.1** La muestra para el ensayo se prepara separando el agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y disgregando los terrones del suelo para que pase el tamiz de 4.75 mm (No. 4), pero de manera que se evite la reducción del tamaño natural de las partículas individuales. Cuando sea necesario, la muestra se seca primero hasta que sea friable bajo la acción de un palustre. El secado se puede hacer al aire o mediante el empleo de algún aparato secador, siempre y cuando la temperatura de la muestra no exceda de 60° C (140° F).
- 6.1.2** Se pasa el suelo preparado por los tamices de 75 mm (3"), 19.0 mm (¾"), y 4.75 mm (No. 4) y se descarta el material retenido en el tamiz de 75 mm (3"). Se determina el porcentaje de material, por masa seca al horno, retenido en los tamices de 19.0 mm (¾") y de 4.75 mm (No. 4).
- 6.1.3** Se satura el agregado que pasa por el tamiz de 19.0 mm (¾") y que queda retenido en el de 4.75 mm (No. 4), empapándolo en agua potable; luego se seca superficialmente para el ensayo posterior.

Nota 5: La mayoría de especificaciones de construcción de suelo-cemento que incluyen la granulometría del suelo, limitan el tamaño máximo del material a 75 mm (3"), o menos.

- 6.1.4** Se escogen y se mantienen separadamente, muestras representativas del suelo que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y del agregado saturado con superficie seca que pasa el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") y que queda retenido en el de 4.75 mm (No. 4), de manera que la muestra total tenga una masa aproximada de 5 kg (11 lb) o más. El porcentaje, en masa secada al horno, del agregado que pasa tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") y que queda retenido en el de 4.75 mm (No. 4), deberá ser igual al porcentaje que pasa tamiz de 75 mm (3") y que queda retenido en el de 4.75 mm (No. 4) de la muestra original.

6.2 Procedimiento:

- 6.2.1** Se agrega a la porción de la muestra de suelo que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4), la cantidad requerida de cemento para la mezcla total especificada en el numeral 6.1.4. Se mezcla completamente hasta obtener un color uniforme.
- 6.2.2** Cuando sea necesario, se agrega agua a esta mezcla de suelo-cemento y se facilita la dispersión de la humedad como se describe para el Método A en los numerales 5.2.2 a 5.2.4. Después de esta preparación, se adiciona el agregado saturado con superficie seca a la mezcla de suelo-cemento que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y se mezcla completamente.
- 6.2.3** Se forma un espécimen, compactando la mezcla preparada de suelo-cemento dentro del molde con el collar colocado; se enrasa y se determina la masa del espécimen compactado como se describe en los numerales 5.2.5 y 5.2.6 para el Método A. Durante la operación de recorte y enrarse se deben remover todas las partículas que sobresalgan por encima del nivel superior del molde. Se corrigen todas las irregularidades en la superficie, apisonando a mano material fino dentro de dichas irregularidades y nivelando nuevamente el espécimen con la regla metálica. Se determina la masa del molde con la muestra, con cuatro cifras significativas.
- 6.2.4** Se remueve el material del molde y se toma una muestra para determinar la humedad, como se describe en el numeral 5.2.7 para el Método A, excepto que la muestra no deberá tener una masa menor de 500 g (1.1 lb). Se anota el resultado como la humedad, w , de la mezcla de suelo-cemento compactado.

- 6.2.5** Se desmenuza completamente el resto del material como antes, hasta que a simple vista se considere que pasa el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") y que por lo menos el 90% de las partículas menores de 4.75 mm (No. 4) pasan el tamiz de 4.75 mm (No. 4), y se agrega todo el material sobrante después de obtener la humedad de la muestra.
- 6.2.6** Se adiciona el agua necesaria para aumentar la humedad de la mezcla de suelo–cemento en uno o dos puntos porcentuales, se mezcla y se repite el procedimiento descrito en los numerales 6.2.3 a 6.2.5 para cada incremento de agua. Se continúa esta serie de determinaciones hasta que se produzca una disminución o no haya cambio en la masa del suelo–cemento compactado más el molde (notas 4 y 5).

7 CÁLCULOS

- 7.1** Se calcula el volumen de cada molde usado para compactar la mezcla de suelo–cemento, con cuatro cifras significativas, de acuerdo con el procedimiento descrito en el Anexo A de la norma INV E-141.
- 7.2** Se calcula la humedad de las mezclas de suelo–cemento empleadas en todos los tanteos, w , redondeada a 0.1 %, empleando el procedimiento de la norma INV E-122.
- 7.3** Se calcula la densidad húmeda, redondeada a 1 kg/m³ (0.1 lb/pie³), de cada uno de los espécímenes compactados de suelo–cemento, de la siguiente forma:

$$\rho_m = \frac{M_m - M_{md}}{V} \quad [611.1]$$

Donde: ρ_m : Densidad húmeda del espécimen de suelo–cemento compactado, kg/m³ (lb/pie³);

M_m : Masa del molde con el espécimen húmedo compactado, kg (lb);

M_{md} : Masa del molde de compactación, kg (lb);

V : Volumen del molde de compactación, m³ (pie³);

- 7.4** Se calcula la densidad seca, redondeada a 1 kg/m³ (0.1 lb/pie³), de cada uno de los especímenes compactados de suelo–cemento, de la siguiente forma:

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{\left[1 + \frac{w}{100} \right]} \quad [611.2]$$

Donde: ρ_d : Densidad seca del espécimen de suelo–cemento compactado, kg/m³ (lb/pie³);

ρ_m : Densidad húmeda del espécimen de suelo–cemento compactado, kg/m³ (lb/pie³);

w: Humedad del espécimen de suelo–cemento compactado, %.

- 7.5** Se calcula el peso unitario seco, redondeado a 1 kgf/m³ (0.1 lbf/pie³), de cada uno de los especímenes compactados de suelo–cemento, de la siguiente forma:

$$\gamma_d = \frac{\rho_d \times g}{g_c} \quad (\text{Sistema Inglés}) \quad [611.3]$$

O

$$\gamma_d = \rho_d \times g \quad (\text{Sistema Internacional}) \quad [611.4]$$

Donde: γ_d : Peso unitario seco del espécimen de suelo–cemento compactado, kgf/m³ (lbf/pie³);

g: Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s² (32.2 pie/s²);

g_c : Constante gravitacional, 32.2 pie-lb/lbf-s².

8 RELACIONES DE HUMEDAD- DENSIDAD (PESO UNITARIO)

- 8.1** Los valores de humedad y de peso unitario seco calculados en la Sección 7 para cada uno de los especímenes compactados de suelo–cemento se representan gráficamente en un gráfico aritmético. El peso unitario se representa con aproximación a 1 kgf/m³ (0.1 lbf/pie³) en las ordenadas, y las

humedades correspondientes en las abscisas, aproximadas a 0.1 %. Se dibuja una curva de compactación suave a través de los puntos.

Nota 6: La experiencia demuestra que es muy importante usar escalas consistentes para dibujar estas curvas. Una aproximación satisfactoria consiste en usar en las ordenadas una escala de 1" = 5 lbf/pie³ de peso unitario y en las abscisas 1" = 2 % de humedad

- 8.2 *Humedad óptima, w_o* – La humedad correspondiente al pico de la curva dibujada como se indica en el numeral 8.1 se denomina "humedad óptima" de la mezcla de suelo-cemento, bajo la compactación prescrita en estos métodos.
- 8.3 *Peso unitario seco máximo, $\gamma_{dmáx}$* – El peso unitario seco, en kgf/m³ (lbf/pie³) de la mezcla de suelo-cemento, correspondiente al contenido óptimo de humedad, se llamará peso unitario seco máximo, bajo la compactación prescrita en este método.

9 INFORME

- 9.1 El informe debe incluir lo siguiente:
 - 9.1.1 Identificación de la muestra.
 - 9.1.2 Procedimiento usado (Método A o B).
 - 9.1.3 La curva de compactación.
 - 9.1.4 El contenido óptimo de humedad.
 - 9.1.5 El máximo peso unitario seco.

10 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 558 – 11