

RELACIONES HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO NORMAL DE COMPACTACIÓN)

INV E – 141 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Los siguientes métodos de ensayo se emplean para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos (curva de compactación) compactados en un molde de 101.6 o 152.4 mm (4 o 6") de diámetro, con un martillo de 24.5 N (5.5 lbf) que cae libremente desde una altura de 305 mm (12"), produciendo una energía de compactación aproximada de 600 kN–m/m³ (12 400 lbf–pie/pie³).
- 1.2** Estos métodos aplican solamente a suelos con 30 % o menos de su masa con tamaño mayor a 19.0 mm y que no hayan sido compactados previamente; es decir, no se acepta la reutilización de un suelo compactado.
- 1.2.1** Para establecer relaciones entre pesos unitarios y humedades de moldeo de suelos con 30% o menos de su masa con tamaño mayor a 19.0 mm y pesos unitarios y humedades de la fracción que pasa el tamiz de 19.0 mm (3/4"), se deberá aplicar la corrección a la cual hace referencia la norma INV E–143.
- 1.3** Esta norma presenta tres alternativas para la ejecución del ensayo (Tabla 141 - 1). El método por utilizar deberá ser el indicado en la especificación para el material por ensayar. Si la especificación no indica un método, la elección se deberá realizar en función de la granulometría del material.

Tabla 141 - 1. Métodos para realizar el ensayo normal de compactación

MÉTODO	A	B	C
DIÁMETRO DEL MOLDE	101.6 mm (4")	101.6 mm (4")	152.4 mm (6")
MATERIAL	Pasa tamiz de 4.75 mm (No. 4)	Pasa tamiz de 9.5 mm (3/8")	Pasa tamiz de 19.0 mm (3/4")
CAPAS	3	3	3
GOLPES/CAPA	25	25	56
USO	Si 25% o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) (Ver numeral 1.4)	Si 25% o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 9.5 mm (3/8") (Ver numeral 1.4)	Si 30% o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 19.0 mm (3/4") (Ver numeral 1.4)
OTRO USO	Si este requisito de	Si este requisito de	

	granulometría no se puede cumplir, se debe usar el Método C	granulometría no se puede cumplir, se debe usar el Método C	
--	---	---	--

1.3.1 El molde de 152.4 mm (6") de diámetro no se debe usar con los métodos A o B.

Nota 1: Se ha encontrado que los resultados varían ligeramente cuando el material se compacta con la misma energía en moldes de diferente tamaño, obteniéndose los mayores valores cuando se emplea el molde pequeño.

- 1.4** Si la muestra de ensayo contiene más de 5 %, en masa, de sobretamaños (fracción gruesa) y este material no se va a incluir en el ensayo, se deberán corregir el peso unitario y el contenido de agua de moldeo de la muestra de laboratorio o el peso unitario del espécimen del ensayo de densidad en el terreno, empleando la norma INV E-143.
- 1.5** Este método produce una curva de compactación con un peso unitario seco máximo bien definido, cuando se ensayan suelos que no presentan drenaje libre. Si el suelo presenta drenaje libre, el peso unitario seco máximo no se puede definir con precisión.
- 1.6** Esta norma reemplaza la norma INV E-141-07.

2 DEFINICIONES

- 2.1** *Humedad de moldeo* – Contenido de agua con el cual se prepara una muestra para someterla a compactación.
- 2.2** *Energía del ensayo normal de compactación* – 600 kN-m/m³ (12 400 lbf-pie/pie³), aplicada con el equipo y procedimiento descritos en esta norma.
- 2.3** *Peso unitario seco máximo del ensayo normal de compactación ($\gamma_{d, \text{máx}}$)* – El máximo valor definido en la curva de compactación obtenida como resultado del ensayo realizado con la energía indicada en el numeral 2.2.
- 2.4** *Humedad óptima del ensayo normal de compactación (w_{opt})* – La humedad de moldeo con la cual el suelo alcanza el peso unitario seco máximo usando la energía normalizada.
- 2.5** *Sobretamaños (fracción gruesa) (P_{FG})* – Porción de la muestra total que no se utiliza en la prueba de compactación. Es la retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) cuando se utiliza el Método A; la retenida en el tamiz de 9.5 mm (3/8")

cuando se emplea el Método B, o la retenida en el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") cuando se emplea el Método C.

- 2.6** *Fracción de ensayo (fracción fina) (P_{FE})* – Es la porción de la muestra total que se emplea en el ensayo de compactación. Corresponde al material que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) cuando se utiliza el Método A; al pasante por el tamiz de 9.5 mm ($3/8$ ") cuando se emplea el Método B, o al pasante por el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") cuando se emplea el Método C.

3 RESUMEN DEL MÉTODO

- 3.1** Se coloca en tres capas una muestra de suelo, con una humedad de moldeo seleccionada, dentro de un molde, sometiendo cada capa a 25 o 56 golpes de un martillo de 24.5 N (5.5 lbf) que cae desde una altura de 305 mm (12"), produciendo una energía de compactación aproximada de 600 kN-m/m³ (12 400 lbf-pie/pie³). Se determina el peso unitario seco resultante. El procedimiento se repite con un número suficiente de humedades de moldeo, para establecer una curva que relacione las humedades con los respectivos pesos unitarios secos obtenidos. Esta curva se llama curva de compactación y su vértice determina la humedad óptima y el peso unitario seco máximo, para el ensayo normal de compactación.

4 IMPORTANCIA Y USO

- 4.1** Los suelos y mezclas de suelo-agregado usados como relleno en obras de ingeniería se compactan a cierto nivel, con el fin de lograr un comportamiento satisfactorio en términos de su resistencia al corte, su compresibilidad o su permeabilidad. Así mismo, los suelos de fundación se compactan a menudo para mejorar sus propiedades de ingeniería. Los ensayos de compactación en el laboratorio suministran la base para determinar el porcentaje de compactación y la humedad de moldeo necesaria para que el suelo alcance el comportamiento requerido.
- 4.2** Durante el diseño de una obra de ingeniería, algunos ensayos requieren la preparación de muestras de prueba con determinada humedad y con un peso unitario establecido. Constituye una práctica común determinar primero la humedad óptima y el peso unitario seco máximo a través de un ensayo de compactación. Posteriormente, se elaboran los especímenes de ensayo para el diseño específico, empleando humedades por encima o por debajo de la

óptima y pesos unitarios secos expresados como un porcentaje del máximo. La selección de estas humedades y de estos pesos unitarios se debe basar en la experiencia del profesional o, de lo contrario, conviene hacer una investigación dentro de unos rangos de valores, para establecer el porcentaje de compactación apropiado.

- 4.3** La experiencia indica que los procedimientos descritos en el numeral 4.2 o los controles de construcción mencionados en el numeral 4.1 son muy difíciles de implementar o producen resultados erróneos, cuando se trata con determinados suelos. Los numerales 4.3.1 a 4.3.3 describen algunos casos problemáticos típicos.

4.3.1 *Presencia de partículas mayores de $\frac{3}{4}$ "* – Los suelos que contienen más de 30 % de partículas superiores a 19 mm ($\frac{3}{4}$ ") constituyen un problema. Para tales suelos no existe norma de ensayo INV para determinar sus condiciones de compactación en el laboratorio. La antigua práctica de reemplazar la fracción de tamaño mayor por otra más fina, ha demostrado ser inapropiada para determinar el peso unitario seco máximo y la humedad óptima de suelos que contengan estas partículas de mayor tamaño.

4.3.1.1 Un método para diseñar y controlar la compactación de estos suelos consiste en el uso de un relleno de prueba para determinar el grado requerido de compactación y el método para obtenerla, seguido por el establecimiento de una especificación de método para controlar la compactación. Una especificación de método contiene, típicamente, el tipo y tamaño del equipo de compactación por usar, el espesor de la capa, el rango aceptable en el contenido de agua y el número de pasadas. El éxito en la aplicación de una especificación de este tipo depende, en gran medida, de la calificación y la experiencia del constructor y del interventor.

4.3.1.2 Otro método consiste en aplicar los factores de corrección desarrollados por el USDI Bureau of Reclamation (notas 2 y 3) y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de USA (nota 4). Estos factores de corrección se pueden aplicar a suelos con una proporción de sobretamaños hasta de 50 y 70 %. Cada agencia aplica un término diferente para estos factores de corrección de densidad. El USDI Bureau of Reclamation usa un valor D, mientras el Cuerpo de Ingenieros usa un coeficiente de interferencia de densidad (I_c).

Nota 2: UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION, Earth Manual, Part 1, Third Edition, 1998, pp. 255-260.

Nota 3: UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION, Earth Manual, Part 2, Third Edition, 1990.

Nota 4: VICTOR H TORREY III, "Compaction control of earth-rock mixtures: how to develop and use density interference coefficients and optimum water content factors", Geotechnical Laboratory, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, Mississippi 39180-6199, 1992

4.3.2 *Degradación* – Los suelos que contiene partículas que se degradan durante la compactación constituyen un problema, en especial en el caso frecuente de que la degradación sea mayor en el laboratorio que en el terreno. Es típica la ocurrencia de la degradación cuando se compacta un material granular residual. La degradación hace que el peso unitario seco máximo de laboratorio se incremente, lo que hace que el valor obtenido en el laboratorio no sea representativo de las condiciones de campo. En estos casos, es muy frecuente que resulte imposible alcanzar en el terreno el máximo peso unitario seco.

4.3.3 *Gradación discontinua* – Los suelos que contienen bastantes partículas grandes y pocas pequeñas son un problema, por cuanto el suelo compactado contendrá más vacíos de lo usual. Para manejar estos elevados volúmenes de vacíos, los métodos tradicionales de laboratorio y de campo han venido siendo modificados aplicando el juicio ingenieril.

5 EQUIPO

5.1 *Moldes* – Los moldes deberán ser cilíndricos, de paredes sólidas, fabricados con metal, y con las dimensiones y capacidades mostradas más adelante. Deberán tener collares ajustables de aproximadamente 60 mm (2.373") de altura, que permitan la preparación de muestras compactadas de mezclas de suelo con agua, con la altura y el volumen deseados. El conjunto de molde y collar deberá estar construido de tal manera que pueda encajar firmemente en una placa de base hecha del mismo material.

5.1.1 *Molde de 101.6 mm (4")* - Con una capacidad de $943 \pm 14 \text{ cm}^3$ ($1/30 \pm 0.0005 \text{ pie}^3$), con un diámetro interior de $101.6 \pm 0.4 \text{ mm}$ (4.000 ± 0.016 ") y una altura de $116.4 \pm 0.5 \text{ mm}$ (4.584 ± 0.018 ") (ver Figura 141 - 1).

5.1.2 *Molde de 152.4 mm (6")* – Con una capacidad de $2124 \pm 25 \text{ cm}^3$ (equivalente a $1/13.33 \pm 0.0009 \text{ pie}^3$), con un diámetro interior de $152.4 \pm 0.7 \text{ mm}$ ($6 \pm 0.026"$) y una altura de $116.4 \pm 0.5 \text{ mm}$ ($4.584 \pm 0.018"$) (ver Figura 141 - 2).

5.2 *Martillo metálico* – Puede ser de operación manual (numeral 5.2.1) o mecánica (numeral 5.2.2), con una masa de $2.495 \pm 0.023 \text{ kg}$ ($5.5 \pm 0.02 \text{ lb}$), que tenga una cara plana circular (excepto lo anotado en el numeral 5.2.2.1), de diámetro de $50.80 \pm 0.13 \text{ mm}$ ($2.000 \pm 0.005"$). El diámetro real de servicio no podrá ser menor de 50.42 mm ($1.985"$). El martillo deberá estar provisto de una camisa guía apropiada que controle la altura de la caída del golpe desde una altura libre de $304.8 \pm 1 \text{ mm}$ ($12.00 \pm 0.05"$) por encima de la altura del suelo. El martillo se deberá reemplazar si la cara de golpeo se desgasta o se acampana de manera que su diámetro se salga del rango $50.80 \pm 0.25 \text{ mm}$ ($2.000 \pm 0.01"$).

5.2.1 *Martillo de operación manual* – Deberá estar provisto de una camisa guía apropiada, que brinde una luz suficiente para que la caída del martillo y la cabeza no tengan restricciones. La camisa guía deberá tener, al menos, 4 agujeros de ventilación en cada extremo (8 en total), ubicados a $19 \pm 2 \text{ mm}$ ($3/4 \pm 3/16"$) del extremo, espaciados aproximadamente a 90° (1.57 rad). El diámetro mínimo de los orificios de ventilación debe ser de 9.5 mm ($3/8"$). De ser necesario, se pueden incorporar agujeros adicionales o ranuras en la camisa del martillo.

5.2.2 *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 de ensayo de menor dimensión. El martillo deberá disponer de algún medio mecánico que lo soporte mientras no está en operación.

5.2.2.1 *Martillo de cara de sector circular, de operación mecánica* – Se puede usar con el molde de 152.4 mm ($6"$) de diámetro, en lugar del martillo de cara circular. Su cara de compactación debe tener la forma de un sector de círculo de radio igual a $73.7 \pm 0.5 \text{ mm}$ ($2.90 \pm 0.02"$) y un área aproximadamente igual a la de cara circular (Ver numeral 5.2). El martillo debe operar de manera que el vértice del sector circular quede posicionado en el centro de la muestra de ensayo.

- 5.3** *Extractor de muestras (opcional)* – Un gato con marco u otro dispositivo adecuado para extraer las muestras compactadas de los moldes.
- 5.4** *Balanzas* – Una de 11.5 kg de capacidad y aproximación de lectura de 1 g, cuando se use para pesar moldes de 152.4 mm (6") con suelos húmedos compactados; cuando se emplee el molde de 101.6 mm (4") se puede usar una balanza de menor capacidad, si su aproximación de lectura es de 1 g. También, se requiere otra balanza de 1 kg de capacidad con legibilidad de 0.1 g para las determinaciones de humedad.
- 5.5** *Horno* – Termostáticamente controlado, preferiblemente de tiro forzado, capaz de mantener una temperatura de 110 ± 5 °C ($230 + 9$ °F), para el secado de las muestras.
- 5.6** *Regla metálica* – De acero endurecido, de borde recto, al menos de 250 mm (10") de largo. El borde de corte y enrasado deberá ser biselado, si tiene más de 3 mm (1/8") de espesor. La regla no deberá ser tan flexible que cuando se enrase el suelo con el borde cortante, proporcione una superficie cóncava en la superficie de la muestra.
- 5.7** *Tamices* – De 19.0, 9.5 y 4.75 mm ($\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ " y No. 4).
- 5.8** *Herramientas misceláneas* – Tales como cazuelas para mezclado, espátulas, etc., o un dispositivo mecánico adecuado para mezclar las muestras de suelo con diversas cantidades de agua.
- 5.9** *Recipientes* – Para determinar la humedad de las muestras, elaborados en metal u otro material adecuado, con cierres que ajusten herméticamente para evitar la pérdida de humedad durante el pesaje.

6 MUESTRA DE ENSAYO

- 6.1** La cantidad mínima de muestra para un ensayo completo empleando los Métodos A o B es de unos 16 kg, y para el Método C de 29 kg. Por lo tanto, la muestra de campo debería tener una masa húmeda de, al menos, 23 kg y 45 kg, respectivamente. Se pueden requerir masas mayores si la muestra contiene sobretamaños o si es necesario elaborar puntos de compactación adicionales.
- 6.2** Si no se dispone de los datos de granulometría de la muestra, se estiman las proporciones de material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) cuando se

utiliza el Método A; en el tamiz de 9.5 mm (3/8") cuando se emplea el Método B, o en el tamiz de 19.0 mm (3/4") cuando se emplea el Método C. Si se considera que el porcentaje retenido está muy cerca del límite admitido por el método de compactación que se va a utilizar, entonces se escoge alguna de las siguientes tres opciones:

- 6.2.1** Se elige un método que permita un mayor porcentaje retenido (por ejemplo, el B o el C, si inicialmente se pretende utilizar el A).
- 6.2.2** Usando el método de interés, se procesa la muestra como se indica en los numerales 7.2 o 7.3, con lo que se determina el porcentaje retenido para dicho método. Si resulta aceptable, se procede; en caso contrario, se va al método siguiente (B o C).
- 6.2.3** Se determinan los valores de los porcentajes retenidos usando una porción representativa de la muestra y empleando la norma de ensayo INV E-213. Solamente se necesita determinar los porcentajes retenidos en el tamiz o los tamices deseados.

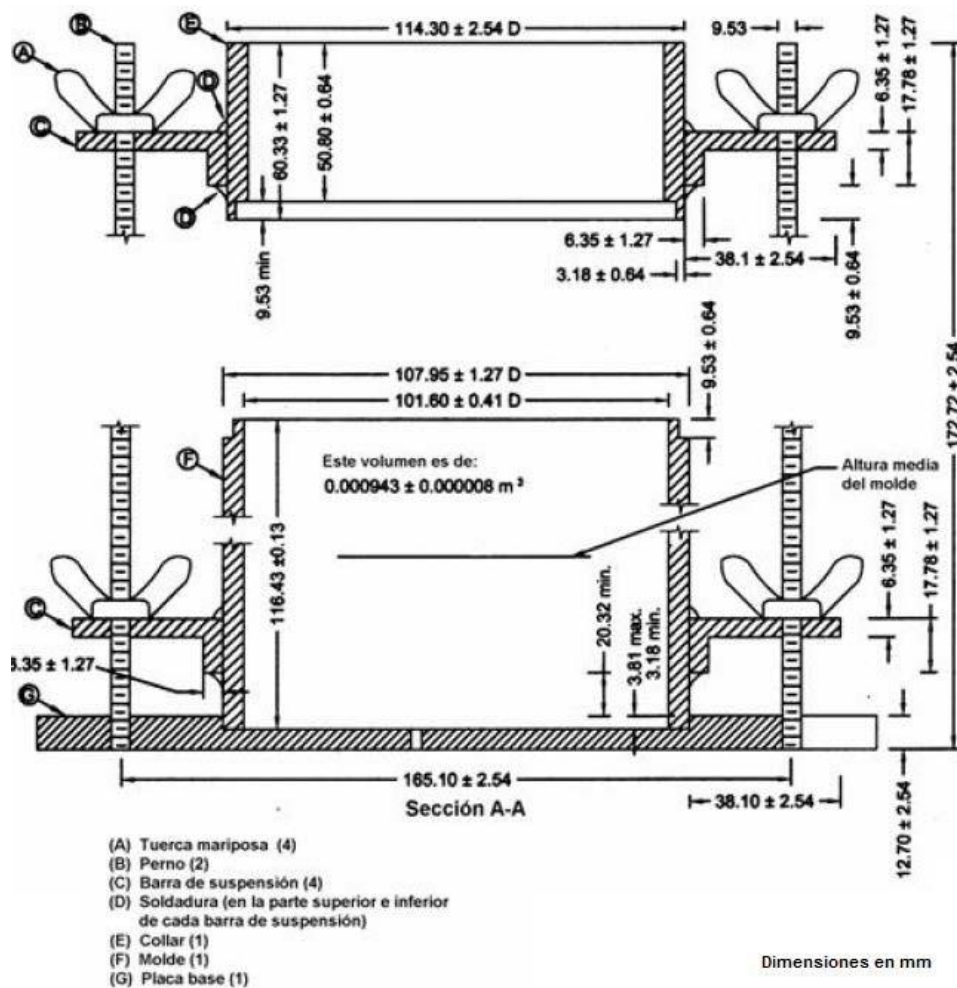


Figura 141 - 1. Molde cilíndrico de 101.6 mm (4.0") para ensayos de suelos

7 PROCEDIMIENTO

7.1 Suelos:

- 7.1.1** No se pueden utilizar muestras de suelo previamente compactadas en el laboratorio. Ello daría como resultado valores mayores de peso unitario seco máximo.
- 7.1.2** Cuando se use este método con suelos que contengan haloisita hidratada, o en los cuales la experiencia indica que los resultados se pueden ver afectados por el secado al aire de las muestras, se deberá emplear el método de preparación por vía húmeda (Ver numeral 8.2). En ensayos de comparación, cada laboratorio debe utilizar el mismo método de preparación, sea por vía húmeda (el preferido), sea por vía seca.

7.1.3 Se preparan las muestras para ensayo de acuerdo con el numeral 7.2 (preferido) o con el numeral 7.3.

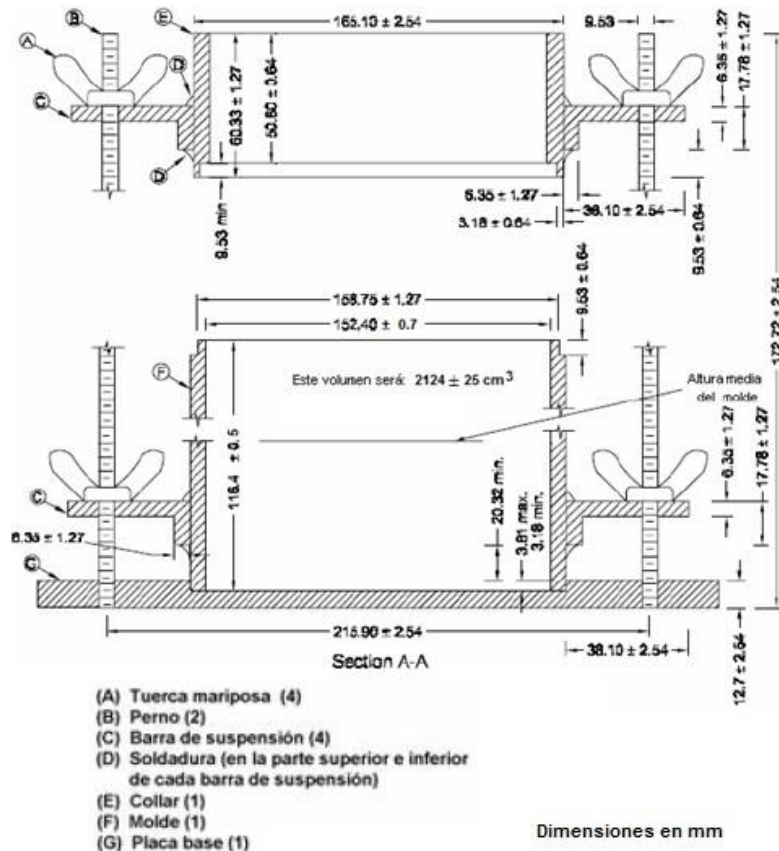


Figura 141 - 2. Molde cilíndrico de 152.4 mm (6.0") para ensayos de suelos

7.2 Preparación por vía húmeda (preferida) – Sin secado previo de la muestra, se procesa ésta sobre un tamiz de 4.75 mm (No. 4), de 9.5 mm (3/8") o de 19.0 mm (¾"), dependiendo del Método (A, B o C) a ser usado o requerido, de acuerdo con lo citado en el numeral 6.2 Se determinan y registran las masas de los materiales pasante y retenido en ese tamiz (fracción de ensayo y fracción gruesa, respectivamente). Se seca en el horno la fracción gruesa y se determina y registra su masa, con aproximación a 1 g. Si resulta que más del 0.5 % de la masa seca total de la muestra está adherida a la fracción gruesa, se deberá lavar esta fracción. Luego, se determina y registra su masa seca, con aproximación a 1 g. Se determina y registra la humedad de la fracción de ensayo (fracción fina). Usando esta humedad, se determina y anota la masa seca al horno de esta fracción, con aproximación a 1 g. Con base en estas masas secas, se determina el porcentaje de la fracción con sobretamaños, P_{FG} , y el porcentaje de la fracción de ensayo, P_{FE} , a menos que se haya realizado

previamente el ensayo de granulometría completo (Ver Sección 8 para los cálculos).

- 7.2.1** Se seleccionan y preparan al menos cuatro (preferiblemente cinco) sub-muestras de la fracción de ensayo, con humedades que abarquen la humedad óptima estimada. En primer lugar, se prepara una sub-muestra con una humedad cercana a la que se cree que es la óptima (nota 5). Luego se eligen las humedades para las otras sub-muestras con variaciones de 2 % y buscando que dos de ellas sean superiores a la óptima y dos inferiores a ella. Se requieren, al menos, dos humedades a cada lado de la óptima, para definir correctamente la curva de compactación (Ver numeral 7.5). Algunos suelos cuya humedad óptima es muy elevada o cuya curva de compactación es muy plana, requieren incrementos mayores en el contenido de agua para preparar las sub-muestras. En todo caso, ellos no deben exceder de 4 %.

Nota 5: Con práctica, es posible juzgar visualmente un punto de humedad cercano al óptimo. Típicamente, cuando los suelos cohesivos tienen la humedad óptima se pueden apretar formando un terrón que no se separa cuando se libera la presión de la mano, pero que se rompe limpiamente en dos secciones cuando se dobla. Estos suelos tienden a desmenuzarse cuando su humedad está por debajo de la óptima, mientras que tienden a mantenerse en una masa pegajosa cuando su humedad es mayor que la óptima. Su contenido óptimo de agua es, típicamente, algo menor que el límite plástico. Por el contrario, el contenido óptimo de los suelos sin cohesión es cercano a cero o al punto donde aflora el agua a la superficie del terrón.

- 7.2.2** Se mezcla completamente la fracción de ensayo (fracción fina), y luego se selecciona con una cuchara una porción representativa para constituir cada sub-muestra (punto de compactación). Se deben seleccionar por sub-muestra más o menos 2.3 kg cuando se usen los Métodos A o B, o unos 5.9 kg para el Método C. Para obtener las humedades de moldeo mencionadas en el numeral 7.2.1 se debe añadir o remover agua de la siguiente manera: (1) para añadir agua, se la atomiza durante la operación de mezclado y (2) para remover, se permite que el suelo se seque a la temperatura ambiente o en un aparato que no lleve la temperatura más allá de 60° C (140° F). Mezclar frecuentemente el suelo durante el secado, facilita que el agua se distribuya de manera uniforme. Una vez que cada sub-muestra tenga la humedad apropiada, se coloca dentro de un recipiente con tapa, para someterla a un período de curado previo a la compactación, de acuerdo con la Tabla 141 - 2.

Tabla 141 - 2. Tiempo requerido de curado para las sub-muestras húmedas

CLASIFICACIÓN DEL SUELO	TIEMPO DE CURADO (h)
GW, GP, SW, SP	No requiere
SW, SP	3
Todos los demás suelos	16

7.3 Preparación por vía seca – Si la muestra se encuentra muy húmeda para ser desmenuzada, se reduce su contenido de agua secándola al aire hasta volverla friable. El secado también se puede realizar en un aparato que no lleve la temperatura más allá de 60° C (140° F). Se desintegran totalmente las agregaciones, sin romper partículas individuales. Se procesa el material sobre el tamiz apropiado, de acuerdo con el método de ensayo elegido. Cuando se prepare material pasante por el tamiz de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") para compactarlo en el molde de 15.4 mm (6"), las agregaciones se deben romper lo suficiente para que pasen el tamiz de 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ "), con el fin de facilitar la distribución completa del agua durante el mezclado posterior. Se determina y anota el contenido de agua de la fracción de ensayo, así como todas las masas citadas en el numeral 8.2, para determinar el porcentaje de la fracción consobretamaños, P_{FG} , y el porcentaje de la fracción de ensayo, P_{FE} .

7.3.1 Se seleccionan y preparan al menos cuatro (preferiblemente cinco) sub-muestras de la fracción de ensayo, de la manera descrita en los numerales 7.2.1 y 7.2.2, con la diferencia de que se debe usar un cuarteador mecánico o se cuartea manualmente para obtener las sub-muestras. Típicamente, siempre se requerirá añadir agua para preparar las sub-muestras para la compactación.

7.4 Compactación – Luego del período de curado, si éste se requiere, cada sub-muestra (punto de compactación) se debe compactar como se indica en seguida.

7.4.1 Se determina y registra la masa del molde o del molde más la placa de base (Ver numeral 7.4.7).

7.4.2 Se ensambla y asegura el collar de extensión al molde y el conjunto a la placa de base. Se verifican las alineaciones de las paredes interiores del molde y del collar y se hacen los ajustes que sean necesarios. El molde se deberá apoyar, sin bamboleo alguno, sobre una fundación firme y rígida, como la que puede brindar un cubo de concreto con una masa

no menor de 91 kg (200 lb). Se asegura la placa de base del molde a la fundación rígida. El método de aseguramiento deberá permitir que, luego de la compactación, el molde (con el collar y la base) se pueda retirar con facilidad.

- 7.4.2.1** Durante la compactación es ventajoso, aunque no indispensable, determinar la humedad de cada sub-muestra. Esto brinda una verificación sobre la humedad de moldeo determinada previamente para cada punto de compactación y sobre la magnitud del afloramiento de agua (Ver numeral 7.4.9). Si se decide hacer esto, será necesario que la sub-muestra tenga una masa mayor que la citada con anterioridad.
- 7.4.3** El suelo se debe compactar en tres capas más o menos iguales. Antes de la compactación, se coloca aproximadamente un tercio de la sub-muestra en estado suelto dentro del molde y se reparte para que dé lugar a una capa uniforme. En seguida, se oprime suavemente su superficie hasta que el suelo no presente un estado esponjoso o suelto, usando el martillo de operación manual o un cilindro de unos 50 mm (2") de diámetro. Tras la compactación de las dos primeras capas, cualquier porción de suelo que no haya quedado compactada debe ser escarificada con un cuchillo u otro elemento adecuado. El suelo escarificado se deberá descartar. La cantidad total de suelo usada deberá ser tal, que la tercera capa compactada sobrepase el borde del molde, quedando dentro del collar de extensión, pero en una longitud que no exceda de 6 mm ($\frac{1}{4}$ "). Si se excede este límite, se deberá descartar el punto de compactación. Adicionalmente, el punto de compactación se deberá descartar cuando el último golpe del martillo para la tercera capa tiene como resultado que el fondo del martillo llega más abajo del borde superior del molde de compactación; a menos que el suelo sea suficientemente manejable, de manera que esta superficie pueda ser forzada más arriba del borde del molde de compactación durante el enrasado (nota 6).
- 7.4.4** Cada capa se compacta con 25 golpes cuando está en el molde de 101.6 mm (4") y con 56 golpes cuando está en el molde de 152.4 mm (6"). Siempre que se realicen pruebas de referencia, se usará el martillo de operación manual.
- 7.4.5** Al operar el martillo manual, se debe tener cuidado para evitar levantar la camisa guía durante la carrera ascendente del martillo. La

camisa se debe mantener verticalmente con firmeza, con una tolerancia de 5°. Los golpes se deben aplicar con una velocidad uniforme de 25 por minuto y cubriendo toda la superficie de la capa. Cuando se use el molde de 101.6 mm (4") con el martillo manual, se debe seguir el patrón de impactos mostrado en las Figuras 141 - 3a y 141 - 3b; mientras que si se usa el martillo de operación mecánica solo se seguirá el patrón de la Figura 141 - 3b, empleando el martillo decara circular. Cuando se use el molde de 152.4 mm (6") con el martillo manual, se deberá seguir el patrón de la Figura 141 - 4 hasta aplicar el noveno golpe y luego sistemáticamente alrededor del molde (Figura 141 - 3b) y en el medio. Si se va a usar el martillo mecánico con este molde, se deberá usar el martillo con cara de sector circular, empleando el patrón de la Figura 141 - 3b; si la superficie del suelo compactado es muy irregular (Ver nota 6), el patrón se deberá cambiar por el de la Figura 141 - 3a o el de la Figura 141 - 4. Probablemente, esto invalide el uso del martillo mecánico en esos puntos de compactación.

Nota 6: Cuando se compactan muestras con humedad por encima de la óptima, se pueden presentar superficies compactadas desniveladas y se requiere el juicio del operador para definir la altura de la muestra y patrón de impactos con el martillo.

- 7.4.6** Terminada la compactación de la última capa, se remueven el collar y la placa de base del molde (excepto en el caso mencionado en el numeral 7.4.7). Se puede usar un cuchillo para desbastar el suelo adyacente al collar y ayudar a aflojarlo antes de removerlo, con el finde evitar que la probeta compactada se rompa por debajo del borde superior del molde. Adicionalmente, para prevenir o reducir la adherencia del suelo al collar o a la placa de base, éstos se deben rotar cuidadosamente durante su remoción.

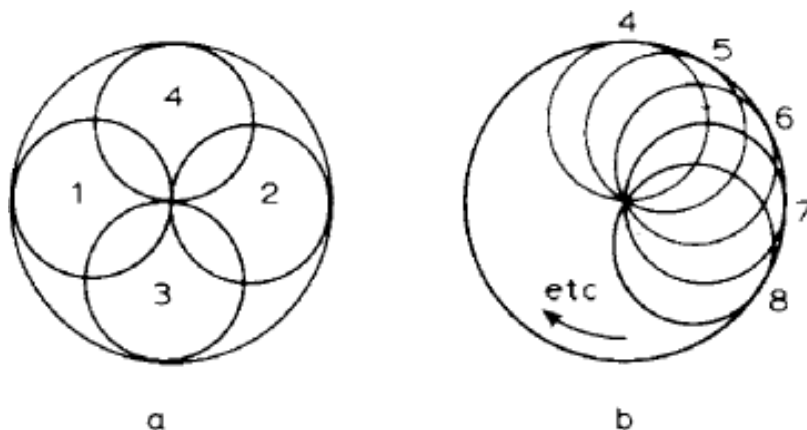


Figura 141 - 3. Patrón de impactos para la compactación en el molde de 101.6 mm (4")

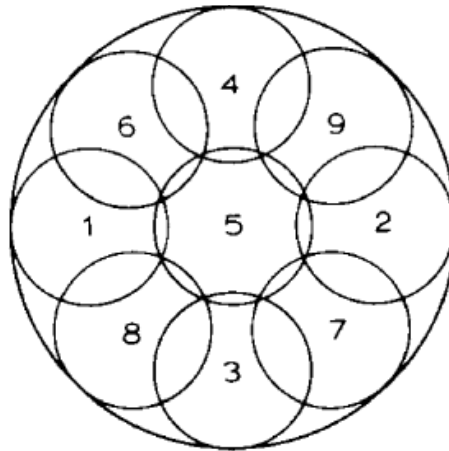


Figura 141 - 4. Patrón de impactos para la compactación en el molde de 152.4 mm (6")

7.4.7 La probeta compactada se enrasa cuidadosamente con el borde superior del molde, empleando la regla metálica dispuesta para tal fin (Figura 141 - 5). Al comienzo, se puede emplear el cuchillo para remover el exceso de suelo en parte superior de la probeta, para evitar que la regla la desgarré por debajo del borde superior del molde. Los pequeños orificios que queden en la superficie de la probeta se deberán rellenar con suelo no usado o desbastado de la muestra, presionándolo con los dedos (Figura 141 - 6) y pasando nuevamente la regla a ras con el borde del molde. Si se encuentran partículas del tamaño de la grava, se debe escarificar alrededor de ellas o removerlas directamente, lo que resulte más cómodo y reduzca la alteración del suelo compactado, rellenando los vacíos como se acaba de indicar. De las operaciones recién descritas se repiten las que sean necesarias en la parte inferior de la probeta, cuando el volumen del molde se haya determinado sin que la placa de base estuviera colocada. Para suelos muy secos o muy húmedos, se puede perder suelo o agua, respectivamente, al remover la placa de base. Para estas situaciones, se debe dejar la placa de base atornillada al molde. Cuando la placa de base se deja adjunta al molde, el volumen de éste se debe calibrar con ella puesta, en lugar de emplear una placa de vidrio o plástico, como se describe en el numeral A.1.4 del Anexo A.



Figura 141 - 5. Enrase de la probeta



Figura 141 - 6. Relleno de pequeños vacíos superficiales

- 7.4.8** Se determina y anota la masa del molde con la probeta compactada, con aproximación de 1 g. Cuando la placa de base se deja puesta con el molde, se debe determinar su masa junto con la del molde y la de la probeta compactada.
- 7.4.9** Se extrae del molde la probeta compactada. Se obtiene una muestra de ella para determinar la humedad, sea tomando el total de la muestra (método preferido) o una porción de ella. Cuando se utilice el total de la muestra, ésta se deberá desmenuzar para facilitar el secado. En el otro caso, se obtiene una porción representativa de las tres capas, removiendo suficiente material de la probeta para reportar el contenido de agua al 0.1 %. La masa de la porción representativa de suelo deberá estar de acuerdo con los requisitos indicados en la Tabla

141 - 1, método B de la norma INV E-122. El contenido de agua de moldeo de la probeta se deberá determinar con la misma norma.

- 7.5** Luego de la compactación de la última probeta, se comparan los pesos unitarios húmedos de todas, para asegurar que hay datos a ambos lados de la humedad óptima, que permitan la elaboración de la curva de compactación. Dibujando los puntos que representan el peso unitario húmedo de cada probeta con su respectiva humedad de moldeo, se puede realizar esta evaluación. Si no se encuentra la tendencia esperada, será necesario compactar una o más probetas adicionales con otros contenidos de agua. Para personas con experiencia en el dibujo de curvas de compactación, un punto de compactación del lado húmedo (humedad mayor que la óptima) es suficiente para definir el máximo peso unitario húmedo (ver numeral 8.2).

8 CÁLCULOS

- 8.1** *Porcentajes de las fracciones* – Si no se dispone de los datos de granulometría de la muestra, la masa seca de la fracción de ensayo, y las fracciones gruesa y de ensayo se determinan como se muestra a continuación, a partir de los datos de los numerales 7.2 o 7.3:

8.1.1 *Masa seca de la fracción de ensayo (M_{SFE}):*

$$M_{SFE} = \frac{M_{HFE}}{1 + \frac{w_{FE}}{100}} \quad [141.1]$$

Donde: M_{HFE} : Masa húmeda de la fracción de ensayo, aproximada a 1 g;

w_{FE} : Humedad de la fracción de ensayo, aproximada a 0.1 %.

8.1.2 *Porcentaje de la fracción gruesa (P_{FG}):*

$$P_{FG} = \frac{M_{SFC}}{M_{SFC} + M_{SFE}} \times 100 \quad [141.2]$$

Donde: M_{SFC} : Masa seca de la fracción gruesa, aproximada a 1 g.

8.1.3 *Porcentaje de la fracción de ensayo (P_{FE}):*

$$P_{FE} = 100 - P_{FG} \quad [141.3]$$

8.2 Humedades, densidades y pesos unitarios de las probetas compactadas (sub-muestras):

8.2.1 Humedad de moldeo de cada probeta – Se calcula cada humedad (w), aproximada a 0.1 %, de acuerdo con la norma INV E–122.

8.2.2 Densidad húmeda de cada sub-muestra (ρ_H):

$$\rho_H = K \times \frac{M_T - M_{MD}}{V} \quad [141.4]$$

Donde: ρ_H : Densidad húmeda de la sub-muestra compactada (punto de compactación), con 4 dígitos significativos, g/cm³ o kg/m³;

M_T : Masa del suelo húmedo dentro del molde, aproximada a 1 g;

M_{MD} : Masa del molde compactación, aproximada a 1 g;

V : Volumen del molde, cm³ o m³ (Ver Anexo A);

K : Constante de conversión que depende de las unidades de densidad y de volumen:

Usar 1, para g/cm³ y volumen en cm³

Usar 1000 para g/cm³ y volumen en m³

Usar 0.001 para kg/cm³ y volumen en m³

Usar 1000 para kg/m³ y volumen en cm³

8.2.3 Densidad seca de cada sub-muestra (ρ_d):

$$\rho_d = \frac{\rho_H}{1 + \frac{w}{100}} \quad [141.5]$$

8.2.4 Peso unitario seco de cada sub-muestra (γ_d):

$$\gamma_d = K_1 \times \rho_d \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad [141.6]$$

$$\gamma_d = K_2 \times \rho_d \quad \frac{\text{lbf}}{\text{pie}^3} \quad [141.7]$$

- γ_d : Peso unitario seco, aproximado a 0.01 kN/m³ (0.1 lbf/pie³);
- K_1 : Constante de conversión (9.8066 para densidad en g/cm³; 0.0098066 para densidad en kg/m³);
- K_2 : Constante de conversión (62.428 para densidad en g/cm³; 0.062428 para densidad en kg/m³).

8.3 Curva de compactación:

- 8.3.1** Con los valores de la humedad de moldeo (numeral 8.2.1) y de peso unitario seco (numeral 8.2.4) de cada sub-muestra, se dibuja la curva de compactación (curva inferior de la Figura 141 - 7). El contenido de humedad que corresponda al punto más alto de la curva, se llamará “humedad óptima” (aproximada a 0.1 %), mientras que el peso unitario seco correspondiente al contenido óptimo de humedad, se denomina “peso unitario seco máximo” (aproximado a 0.02 kN/m³ o 0.1 lbf/pie³).

Nota 7: Con fines únicamente de comparación, en la parte superior de la Figura 141 - 7 se incluye la relación entre las humedades de moldeo (numeral 8.2.1) y los pesos unitarios húmedos. Estos últimos se obtienen multiplicando cada densidad húmeda (numeral 8.2.2) por las constantes K_1 o K_2 , dependiendo del sistema de unidades que se esté utilizando.

- 8.3.2** Si se removi6 más de 5% de la muestra de ensayo a causa de la existencia de sobretamaños (fracción gruesa), los valores de humedad óptima y de peso unitario seco máximo se deberán corregir de acuerdo con la norma INV E-143.

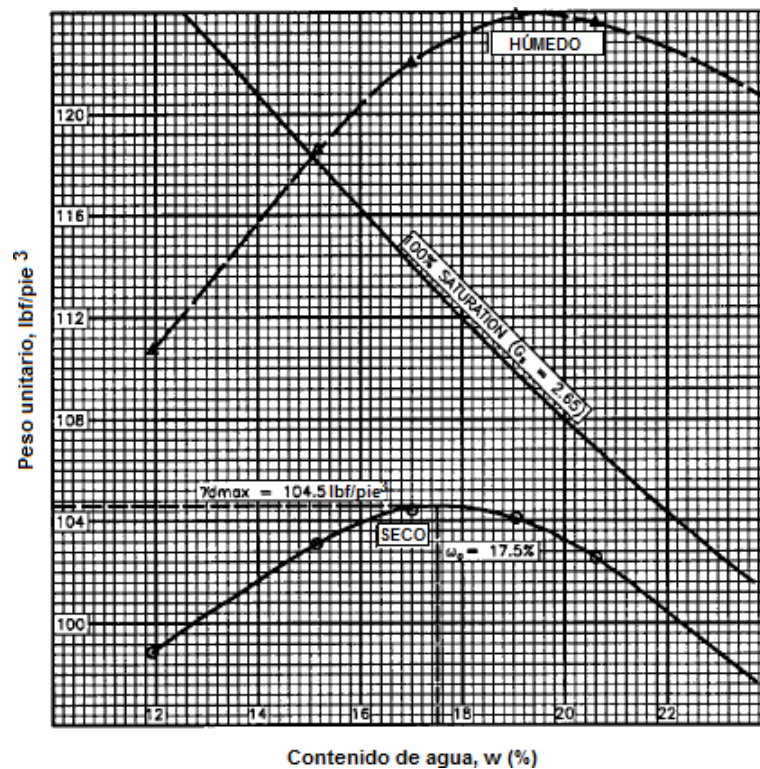


Figura 141 - 7. Ejemplo de dibujo de curva de compactación

8.3.3 Al dibujar la curva de compactación, las escalas se deben escoger de manera que su sensibilidad permanezca constante; es decir, que el cambio en humedad de moldeo o en peso unitario seco por división sea constante entre dibujos. Típicamente, el cambio de peso unitario seco por división es el doble que el de humedad de moldeo (2 lbf/pie^3 por 1 % de agua, por cada división mayor). De esta manera, cualquier cambio en la forma de la curva de compactación es el resultado del ensayo de un material diferente y no de la escala escogida para el dibujo. Sin embargo, se debe usar una escala 1:1 cuando la curva de compactación es relativamente plana (Ver numeral 7.2.1), tal el caso de los suelos muy plásticos o muy permeables.

8.3.3.1 En su rama húmeda (humedad de moldeo mayor que la humedad óptima), la curva de compactación sigue la forma de la curva de saturación (Ver numeral 8.4).

8.4 *Curva de saturación* – Se dibuja la curva de saturación (0 % de vacíos con aire), a partir de la gravedad específica medida (normas INV E-128, INV E-222 o INV E-223; o todas ellas de ser necesario) o estimada. Los puntos para dibujar esta

curva se obtienen eligiendo valores del peso unitario seco y calculando la respectiva humedad de saturación, con la expresión:

$$w_{\text{sat}} = \frac{\gamma_w(G_s) - \gamma_d}{\gamma_d(G_s)} \times 100 \quad [141.8]$$

Donde: γ_w : Peso unitario del agua a 20° C (9.789 kN/m³ o 62.32 lbf/pie³);

γ_d : Peso unitario seco del suelo con tres dígitos significativos, kN/m³ o lbf/pie³;

G_s : Gravedad específica del suelo, aproximada a 0.01.

Nota 8: La curva de saturación ayuda al dibujo de la curva de compactación. Para suelos que contienen más de 10% de finos y que se moldean con una humedad por encima de la óptima, la curva de compactación es más o menos paralela a la de saturación entre el 92 y el 95 % de saturación. Teóricamente, la curva de compactación no puede cortar la de saturación. Si lo hace, existe un error en la gravedad específica, en las medidas, en los cálculos, en el dibujo o en el ensayo mismo.

9 INFORME

9.1 El informe debe incluir:

9.1.1 El método empleado para la compactación (A, B o C).

9.1.2 El método de preparación de la muestra (vía seca o vía húmeda).

9.1.3 El valor de la gravedad específica, aproximado a 0.01.

9.1.4 El dibujo de las curvas de compactación y de saturación.

9.1.5 La humedad óptima, como porcentaje, aproximada a 0.1 %.

9.1.6 El peso unitario seco máximo, con aproximación a 0.01 kN/m³ o 0.1 lbf/pie³.

9.1.7 Los porcentajes de la fracción gruesa (P_{FG}) y de la fracción de ensayo (P_{FE}), con aproximación a 1 %.

9.1.8 El tipo de martillo utilizado para la compactación.

10 PRECISIÓN Y SESGO

10.1 Precisión – Los criterios para juzgar la aceptabilidad de los resultados obtenidos con estos métodos de ensayo sobre los tres tipos de suelos, se presentan en las Tablas 141 - 3 y 141 - 4. Estos estimativos se basan en los resultados de un programa conducido por la ASTM, empleando el Método A y la preparación de muestras por vía seca. Los suelos empleados presentaron las siguientes características: (1) CH con 99 % de finos, LL = 60, IP = 39; (2) CL con 89 % de finos, LL = 33, IP = 13; (3) ML con 99 % de finos, LL = 27; IP = 4.

10.2 Sesgo – No hay valores de referencia aceptados para este método de ensayo y, por lo tanto, no se puede determinar el sesgo.

Tabla 141 - 3. Resumen de los resultados de ensayos sobre ensayos de laboratorio realizados por triplicado (Energía del ensayo normal de compactación)

NÚMERO DE LABORATORIOS QUE HICIERON ENSAYOS POR TRIPLICADO			PARÁMETRO MEDIDO	VALOR PROMEDIO			DESVIACIÓN ESTÁNDAR (1s)			RANGO ACEPTABLE ENTRE 2 RESULTADOS (d2s)		
Tipo de suelo												
CH	CL	ML		CH	CL	ML	CH	CL	ML	CH	CL	ML
Resultados de un solo operador (Repetibilidad en un laboratorio)												
11	12	11	$\gamma_{d\acute{m}\acute{a}x}$ (lb/pie3)	97.2	109.2	106.3	0.5	0.4	0.5	1.3	1.2	1.3
11	12	11	w_o (%)	22.8	16.6	17.1	0.2	0.3	0.3	0.7	0.9	0.9
Resultados de varios laboratorios (Reproducibilidad entre laboratorios)												
11	12	11	$\gamma_{d\acute{m}\acute{a}x}$ (lb/pie3)	97.2	109.2	106.3	1.4	0.8	0.6	3.9	2.3	1.6
11	12	11	w_o (%)	22.8	16.6	17.1	0.7	0.5	0.5	1.8	1.5	1.3

Tabla 141 - 4. Resumen de los resultados de los ensayos simples de cada laboratorio (Energía del ensayo normal de compactación)

NÚMERO DE LABORATORIOS			PARÁMETRO MEDIDO	VALOR PROMEDIO			DESVIACIÓN ESTÁNDAR (1s)			RANGO ACEPTABLE ENTRE 2 RESULTADOS (d2s)		
Tipo de suelo												
CH	CL	ML		CH	CL	ML	CH	CL	ML	CH	CL	ML
Resultados de varios laboratorios (Reproducibilidad entre laboratorios)												
26	26	25	γ _{dmáx} (lb/pie ³)	97.3	109.2	106.2	1.6	1.1	1.0	4.5	3.0	2.9
26	26	25	w _o (%)	22.6	16.4	16.7	0.9	0.7	2.4	1.8	1.8	1.9

11 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 698 – 07

ANEXO A (Aplicación obligatoria)

DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DEL MOLDE DE COMPACTACIÓN

A.1 Objeto:

- A.1.1** Este anexo describe el procedimiento para determinar el volumen del molde compactación.
- A.1.2** El volumen se puede determinar de dos maneras: llenándolo con agua o mediante un método de medida lineal.
- A.1.3** El método que emplea el agua para el molde de 101.6 mm (4"), cuando se usa una balanza que da lecturas con aproximación a 1 g, no suministra cuatro dígitos significativos para su volumen, sino solamente tres. Esto limita las determinaciones de densidad y peso unitario a solo tres dígitos significativos. Para prevenir esa limitación, se ha ajustado el método de llenado con agua, respecto del presentado en versiones anteriores de la norma.

A.2 Equipo:

- A.2.1** Además del mencionado en la Sección 6 de esta norma, se requieren los siguientes elementos:
 - A.2.1.1** *Calibrador* – De dial o vernier, cuyo rango de lectura se encuentre al menos entre 0 y 150 mm (0 – 6") y con posibilidad de lectura de 0.02 mm (0.001").
 - A.2.1.2** *Micrómetro para medidas interiores (opcional)* – Con rango de medida de 50 a 300 mm (2 a 12") y con lectura a 0.02 mm (0.01") o mejor.
 - A.2.1.3** *Micrómetro para medidas de profundidad (opcional)* – Con rango de medida de 0 a 150 mm (0 a 6") y con lectura a 0.02 mm (0.01") o mejor.

A.2.1.4 *Placas plásticas o de vidrio* – Dos placas cuadradas de unos 200 mm de lado y 6 mm de espesor (8×8×¼").

A.2.1.5 *Termómetro* – U otro dispositivo para medir temperaturas a intervalos de 0.1° C.

A.2.1.6 *Grasa de plomería* – O un sellante similar.

A.2.1.7 *Elementos misceláneos* – Jeringa de bulbo, toalla, etc.

A.3 *Precauciones:*

A.3.1 El procedimiento descrito en este Anexo se debe adelantar en un área aislada de corrientes de aire o de fluctuaciones extremas de temperatura.

A.4 *Procedimiento:*

A.4.1 Método de llenado con agua:

A.4.1.1 Se engrasa levemente el fondo del molde de compactación y se coloca éste sobre una de las placas de plástico o vidrio. Se engrasa también su borde superior. Se debe tener cuidado para no engrasar la parte interior del molde. Si es necesario el uso de la placa metálica del molde, se coloca el molde engrasado sobre placa y se asegura a ésta con los tornillos de mariposa.

A.4.1.2 Se determina la masa del molde engrasado y las dos placas de vidrio o plástico, con aproximación a 1 g y se anota el valor (M_{MP}). Si se está usando la placa metálica de base atornillada al molde, se determina el peso del molde con la base metálica y una de las placas de vidrio o plástico y se determina la masa del conjunto, con aproximación a 1 g.

A.4.1.3 Se coloca el molde sobre una de las placas de vidrio o plástico (excepto si el molde tiene la base metálica) sobre un soporte firme y nivelada. A continuación, se llena con agua hasta su borde superior.

A.4.1.4 Se desliza la otra placa de vidrio o plástico sobre la superficie del molde, de manera que éste permanezca completamente

lleno de agua y no haya burbujas de aire atrapadas. Se añade o remueve agua según sea necesario, empleando la jeringa de bulbo.

A.4.1.5 Se seca cualquier resto de agua que haya en el exterior del molde o en las placas.

A.4.1.6 Se determina la masa del molde más placas y agua, con aproximación a 1 g, y se anota el valor obtenido ($M_{MP,W}$).

A.4.1.7 Se determina la temperatura del agua que está dentro del molde, con aproximación a 0.1° C. A continuación, se determina la densidad del agua a esa temperatura, con ayuda de la tabla incluida en la norma INV E-128.

A.4.1.8 Se calcula la masa de agua dentro del molde, sustrayendo el valor M_{MP} del valor $M_{MP,W}$.

A.4.1.9 Se calcula y anota el volumen de agua, (con aproximación a 0.1 cm³ si se ha usado el molde de 101.6 mm (4") o con aproximación a 1 cm³ para el molde de 152.4 mm (6")), dividiendo la masa de agua (numeral A.4.1.8) por la densidad del agua (numeral A.4.1.7). Si se desea obtener el volumen en m³, el valor obtenido en cm³ se debe multiplicar por 10⁻⁶.

A.4.2 Método de medida lineal:

A.4.2.1 Usando el calibrador vernier o el micrómetro para medidas interiores, se mide el diámetro interno del molde (DI) 6 veces en la parte superior y 6 veces en la parte inferior, tomando las medidas de manera equidistante alrededor de la circunferencia. Cada lectura se debe tomar con aproximación a 0.02 mm (0.001"). Se determina el diámetro promedio, (d_p), con la misma aproximación. Se verifica que este valor se encuentre dentro de las tolerancias de diámetro y si no se encuentra, se deberá descartar el molde.

A.4.2.2 Usando el calibrador vernier o el micrómetro para medidas de profundidad (preferible), se mide la altura del molde con la placa de base atornillada a su parte inferior. Se deben realizar tres medidas distribuidas de manera equidistante alrededor de la circunferencia del molde. Cada lectura se debe tomar

con aproximación a 0.02 mm (0.001"). Se determina la altura promedio del molde con la misma aproximación (h_p). Se verifica que este valor se encuentre dentro de las tolerancias de altura y si no se encuentra, se deberá descartar el molde.

- A.4.2.3** Se calcula el volumen del molde por el método de medida lineal (V_L), en cm^3 , con cuatro dígitos significativos, con la expresión:

$$V_L = K_3 \frac{\pi \times h_p \times (d_p)^2}{4} \quad [141.9]$$

Donde: K_3 : Constante para convertir medidas hechas en mm o en pulgadas:

Usar 10^{-6} , si las medidas se tomaron en mm;

Usar 16.387, si las medidas se tomaron en pulgadas.

- A.4.2.4** Si se desea obtener el volumen en m^3 , el valor obtenido en cm^3 se debe multiplicar por 10^{-6} .

A.5 *Comparación de resultados y volumen normalizado del molde:*

- A.5.1** El volumen, calculado por cualquiera de los dos métodos, debe cumplir las tolerancias mencionadas en los numerales 6.1 y 6.2. Para convertir cm^3 a pies^3 , los primeros se deben dividir por 28 317 y el valor obtenido se debe aproximar al 0.0001 pie^3 más próximo.
- A.5.2** La diferencia entre los volúmenes determinados por los dos métodos no debe ser mayor de 0.5 % del valor nominal del molde.
- A.5.3** Si el valor de alguno de los valores calculados resulta sospechoso (o ambos), se deberán repetir las determinaciones.
- A.5.4** Si no se logra la concordancia aun después de realizar varios intentos, se puede concluir que el molde está deformado y se debe descartar.
- A.5.5** El volumen determinado por el método de llenado con agua o el promedio de los volúmenes hallados por los dos métodos, es el que se debe utilizar para calcular la densidad húmeda. Este valor debe tener cuatro dígitos significativos.