

# DETERMINACIÓN RÁPIDA DEL PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN

INV E – 163 – 13

## 1 OBJETO

- 1.1** Esta norma describe el procedimiento para determinar rápidamente el porcentaje de compactación y la variación del contenido de humedad con respecto al óptimo de un suelo in-situ, para uso en el control de la compactación de suelos. Estos valores se obtienen desarrollando una curva de compactación de tres puntos con el mismo contenido de agua que tiene el suelo in-situ, sin que se conozca el valor del contenido de humedad. El suelo usado para la curva de compactación es, normalmente, el mismo suelo retirado de la prueba de densidad en el terreno. En el desarrollo de este documento, se aludirá a este método de ensayo como el *método rápido*.
- 1.2** Este método de ensayo se ejecuta, normalmente, sobre suelos que contienen más de 15 % de finos (que pasen el tamiz No. 200).
- 1.3** Cuando se encuentran partículas de tamaño de grava en el suelo que va a ser ensayado, este método se limita a una comparación de la densidad del material in-situ de la fracción que pasa el tamiz No. 4 con una prueba de compactación de laboratorio de material que pasa el tamiz No. 4 (método A de la norma INV E-141). Sujeto a las limitaciones de la norma INV E-143, este método es también aplicable para comparaciones de fracciones de otros tamaños de tamiz (por ejemplo, el método C de la norma INV E-141) u otras energías de compactación (por ejemplo, los métodos de la norma INV E-142), si se han determinado nuevos valores corregidos de la humedad.
- 1.4** Esta norma reemplaza la norma INV E-163-07.

## 2 TERMINOLOGÍA

### **2.1** Definiciones de términos específicos de esta norma:

- 2.1.1** *Agua añadida, z* – Cantidad de agua, expresada como porcentaje, la cual se añade al suelo húmedo antes de compactar un espécimen con el método rápido. Si el contenido de agua del suelo húmedo se

disminuye, la cantidad de agua añadida es un número negativo (por ejemplo, - 2.0 %).

- 2.1.2** *Valor C* – Relación, expresada como porcentaje, entre la densidad húmeda in-situ al contenido de humedad de campo y la densidad húmeda de un espécimen compactado en laboratorio, preparado con esa humedad. El valor C es una comparación entre el esfuerzo de compactación de los equipos de compactación en terreno y el esfuerzo normal de compactación en el laboratorio.
- 2.1.3** *Curva de compactación al contenido de agua del terreno* – Dibujo que muestra la relación entre la densidad húmeda al contenido de agua del terreno (densidad húmeda convertida) y el porcentaje de “agua añadida”.
- 2.1.4** *Densidad húmeda convertida,  $\rho_{húmeda, c}$*  – Densidad húmeda de un espécimen compactado, después de haber sido convertida (ajustada por cantidad de “agua añadida”) a la densidad húmeda al contenido de agua del terreno.
- 2.1.5** *Valor D* – Relación, expresada como porcentaje, entre la densidad húmeda in-situ al contenido de agua del terreno, y la densidad húmeda máxima de laboratorio según una curva de compactación desarrollada a ese mismo contenido de agua, tal como lo establece el método rápido. El valor D es, en el método rápido, el equivalente al porcentaje de compactación.
- 2.1.6** *Contenido de agua del terreno,  $w_f$*  – Contenido de agua de la fracción del suelo in-situ que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4).
- 2.1.7** *Densidad húmeda del terreno,  $\rho_{húmeda, f}$*  – Densidad húmeda, tal como se determina por la prueba de densidad en el terreno.
- 2.1.8** *Densidad húmeda máxima al contenido de agua del terreno,  $\rho_m$*  – Densidad húmeda definida por el punto máximo de curva de compactación en el laboratorio, al contenido de agua del terreno.
- 2.1.9**  $(w_f - w_o)$  – Expresión que indica la diferencia entre la humedad in-situ y la humedad óptima determinada por el método rápido.

### 3 RESUMEN DEL MÉTODO

---

**3.1** Se obtiene una muestra representativa del suelo en conjunto con la ejecución del ensayo de densidad en el terreno, según las normas INV E-161, INV E-162 ó INV E-164. Se compactan especímenes de suelo de acuerdo con el método de la norma INV E-141. Se compactan por lo menos tres especímenes, el primero con la humedad del terreno (in-situ), y cada uno de los restantes con diferentes contenidos de humedad. Se asume que los tres puntos de compactación definen una curva parabólica, y el punto máximo de la curva se determina matemáticamente. Se determina la relación entre la densidad húmeda in-situ al contenido de humedad de campo y la densidad húmeda máxima de laboratorio. Se determina una aproximación de la diferencia entre el contenido de humedad óptimo y el contenido de humedad en campo. Después de que se determina la humedad real del suelo por secado en el horno (usualmente al día siguiente), se calculan las densidades secas, los pesosunitarios y la humedad óptima.

### 4 IMPORTANCIA Y USO

---

- 4.1** El método rápido se ejecuta para evaluar, de manera rápida, el porcentaje de compactación y la variación de la humedad respecto de la óptima, de suelos empleados en construcción, sin conocer el valor del contenido de humedad del terreno en el momento de la prueba.
- 4.1.1** Los resultados de las pruebas se obtienen, generalmente, tras 1 o 2 horas de comenzadas.
- 4.1.2** El valor del porcentaje de compactación obtenido empleando el método rápido será igual al porcentaje de compactación calculado usando valores de densidad seca.
- 4.1.3** El valor de la diferencia entre el contenido de humedad del terreno y el contenido óptimo de humedad será aproximado, pero estará entre  $\pm 0.1$  a  $0.2$  puntos porcentuales de la diferencia calculada una vez conocido el contenido real de humedad del terreno.
- 4.2** Los resultados de las pruebas se pueden emplear para determinar si el material compactado satisface los valores de control de densidad y de humedad que se especifican como porcentaje de una densidad máxima normalizada y el contenido de humedad óptimo, tal como se determina en el

método A de la norma INV E-141. Se usa una curva de compactación de tres puntos, en lugar de la curva de cuatro o cinco puntos requeridos en los métodos de prueba de la norma INV E-141.

- 4.3 Este método de ensayo se basa en el supuesto de que una curva de compactación de tres puntos es una parábola en la sección de la curva cercana al contenido de humedad óptimo, de manera que el punto máximo de la curva se puede determinar matemáticamente. Esta suposición constituye la mayor diferencia entre éste método de ensayo y la obtención de la densidad máxima y el contenido óptimo de humedad mediante una curva completa de compactación de cinco puntos.
- 4.4 Una vez determinada la humedad del terreno por secado al horno, se podrán calcular los valores de densidad seca, peso unitario seco, y contenido óptimo de humedad (nota 1).
- 4.5 Este método de prueba también se puede emplear para cimientos o para materiales de préstamo, para comparar la densidad seca in-situ, el peso unitario y el contenido de agua, con la densidad seca y el peso unitario máximos de laboratorio y el contenido óptimo de humedad.
- 4.6 Este método de ensayo tiene la ventaja de que el valor de la densidad máxima se puede obtener sobre el mismo suelo excavado durante la ejecución del ensayo de densidad en el terreno.

*Nota 1: Puesto que no hay necesidad de determinar inmediatamente los contenidos de agua del material de la prueba de densidad in-situ o los puntos de compactación de laboratorio, no es necesario el uso de determinaciones rápidas de humedad, tales como microondas, calor directo, nuclear, etc. Sin embargo, si se desea, se pueden determinar el porcentaje de compactación y la variación del contenido de agua respecto del óptimo, usando valores de densidad seca basados en métodos rápidos de prueba para la determinación de la humedad. El uso de tres puntos de compactación y la determinación matemática de la densidad máxima, continúan siendo aplicables. Sin embargo, los métodos rápidos de determinación de la humedad pueden arrojar resultados diferentes de los valores aceptados para el contenido de humedad seca al horno, lo que alargaría el tiempo de ejecución de esta prueba.*

## 5 INTERFERENCIAS

- 5.1 Los valores de ajuste de la humedad se obtuvieron a partir de valores promedio de la densidad y de la humedad óptima sobre un gran número de muestras que solo contenían partículas menores de 4.75 mm. El suelo que se ensaye se deberá comparar con la información que presenta el Anexo B. Para suelos que posean unas propiedades significativamente diferentes, los valores

de ajuste de la humedad pueden resultar inaplicables. En este caso, se deben establecer nuevos valores de ajuste para ese suelo (Ver Anexo B).

- 5.2** Para muestras cuya humedad se encuentre muy alejada de la óptima (+ 6.0%, – 4.0%), los valores ( $w_f - w_o$ ) son menos exactos.

## 6 EQUIPO

---

- 6.1** *Equipo para determinar la densidad in-situ, como lo requiere este método de prueba.*
- 6.2** *Equipo para la preparación de especímenes compactados en laboratorio de acuerdo con el método A de la norma INV E-141.*
- 6.3** *Probeta graduada* – De 100 ml de capacidad, graduada al ml.
- 6.4** *Mezcladora* – Eléctrica, de mesa, 3 velocidades, 1/3–hp, 60 ciclos, motor de 115 v, o cualquier otro aparato apropiado para mezclar el suelo con agua.
- 6.5** *Ventilador eléctrico* – O cualquier aparato secador.
- 6.6** *Tamiz* – De 4.75 mm (No. 4).
- 6.7** *Elementos misceláneos* – Brochas, cuchillo, recipientes para mezclar, cuchara, etc., para mezclar o desbastar especímenes de suelo; balde o cubo con tapa, o cualquier otro recipiente apropiado para guardar la muestra de ensayo.

## 7 REACTIVOS Y MATERIALES

---

- 7.1** Para humedecer el suelo antes de su compactación, se debe usar agua potable libre de ácidos, álcalis y aceites.

## 8 RIESGOS

---

- 8.1** *Riesgos de seguridad* – Aunque no hay riesgos de seguridad relacionados con este método, hay precauciones de seguridad en los ensayos de referencia que le son aplicables.

- 8.2 Riesgos técnicos** – Los especímenes de prueba se deben preparar y compactar tan pronto como sea posible, para minimizar pérdidas de humedad. Si la prueba no se lleva a cabo inmediatamente, la muestra se debe guardar en un recipiente hermético para prevenir la pérdida de humedad. Se recomienda determinar la humedad antes y después del almacenamiento de la muestra.

## 9 CALIBRACIÓN Y NORMALIZACIÓN

---

- 9.1** Se debe verificar que el equipo usado en conjunto con este procedimiento se encuentre calibrado de acuerdo con el procedimiento aplicable. Si la calibración no está actualizada, se deberá realizar antes de usar el equipo para este ensayo.

## 10 PROCEDIMIENTO

---

- 10.1** El procedimiento para la ejecución de este método de ensayo está dividido en cuatro secciones, como sigue:

**10.1.1** Se obtiene la densidad *in situ*.

**10.1.2** Se compactan los especímenes y se obtiene la curva de compactación.

**10.1.3** Se determina el punto máximo de la curva de compactación, el valor D y  $(w_f - w_o)$ .

**10.1.4** Se completa la prueba para anotar en el registro.

*Nota 2: Puesto que los cálculos constituyen parte integral del procedimiento, ellos se incluyen en las secciones respectivas del procedimiento.*

### OBTENCIÓN DE LA DENSIDAD IN-SITU

- 10.2** Se hará la prueba para determinar la densidad húmeda in-situ, de acuerdo con las normas INV E-161, INV E-162 o INV E-164. Si el suelo que está siendo ensayado contiene grava, se debe determinar la densidad húmeda in-situ de la fracción de suelo que pasa el tamiz 4.75 mm (No. 4), de acuerdo con la norma INV E-143.

**10.3** El suelo usado para determinar la curva de compactación, es el material excavado durante la prueba de densidad in-situ. A pesar de que para la ejecución de esta prueba se requiere una muestra mínima de 7 kg de material que pasa el tamiz 4.75 mm (No. 4), se recomienda una muestra de, por lo menos, 12 kg. La cantidad de muestra real dependerá del porcentaje de partículas que queden retenidas en el tamiz No. 4, y si el suelo está muy húmedo o seco respecto del contenido óptimo de humedad.

**10.3.1** Si la densidad in-situ es obtenida usando la norma INV E-164 (Método nuclear), se debe obtener una muestra representativa del suelo que se está ensayando.

**10.3.2** Si no se obtiene suficiente material de la excavación que se hace para la prueba de densidad in-situ, se debe obtener suelo adicional de los alrededores de la excavación. El material adicional debe ser representativo del suelo ensayado para obtener la densidad in-situ.

**10.3.2.1** Si la prueba de densidad in-situ debe representar el espesor total de la capa compactada, el material adicional que se deba obtener se tomará solamente de esta misma capa.

**10.3.2.2** Si la excavación para la prueba de densidad in-situ se ha contaminado con arena o ha sido humedecida (como puede acontecer al efectuar los ensayos de cono y arena o de reemplazo de agua), el material adicional se debe obtener excavando suelo que no haya sido afectado, lo más cerca posible de la excavación original.

**10.4** El suelo obtenido de la prueba de densidad in-situ se deberá pasar a través del tamiz 4.75 mm (No. 4).

**10.5** Se mezcla completamente el material que pasa el tamiz 4.75 mm (No. 4), para asegurar una distribución uniforme de la humedad en todo el suelo. La mezcla se debe hacer tan pronto como sea posible, para evitar pérdida de humedad.

**10.6** Se determina el contenido de agua de un espécimen representativo, de acuerdo con la norma INV E-122.

**10.7** El material pasante por el tamiz No. 4 se debe mantener en un recipiente tapado herméticamente, para evitar la pérdida de humedad.

## COMPACTACIÓN DE ESPECÍMENES Y OBTENCIÓN DE LA CURVA DE COMPACTACIÓN

**10.8** Se compacta un espécimen del material que pasa el tamiz 4.75 mm (No. 4), con el contenido de humedad del terreno, de acuerdo con el método A de la norma INV E-141 y se calcula la densidad húmeda del espécimen.

**10.8.1** La densidad húmeda del primer espécimen compactado se identifica como “densidad húmeda del primer espécimen” o  $\rho_{\text{húmeda, primera}}$ .

**10.9** Al llegar a este punto, se calcula el valor C, el cual se determina antes de proseguir, porque si es menor que el valor D (porcentaje de compactación) requerido en las especificaciones, ello significa que la densidad in-situ ha fallado en el cumplimiento de las especificaciones. El valor D obtenido por el método rápido de prueba debe ser siempre igual o menor que el valor C.

**10.9.1** Se calcula y anota el valor C, en porcentaje, de la siguiente manera:

$$\text{Valor C} = \frac{\rho_{\text{húmeda, f}}}{\rho_{\text{húmeda, primera}}} \times 100 \quad [163.1]$$

Donde: Valor C: Comparación del esfuerzo de compactación de terreno con el esfuerzo de compactación normalizado en laboratorio, %;

$\rho_{\text{húmeda, f}}$ : Densidad húmeda de la prueba de densidad in-situ,  $\text{Mg/m}^3$  ( $\text{lb/pie}^3$ );

$\rho_{\text{húmeda, primera}}$ : Densidad húmeda del primer espécimen,  $\text{Mg/m}^3$  ( $\text{lb/pie}^3$ ).

**10.10** Se prepara un segundo espécimen para compactar, con un 2 % de agua añadida. Este espécimen de compactación se identifica como el “segundo espécimen”.

*Nota 3: Este método de ensayo especifica que el segundo espécimen debe tener siempre 2 % de agua añadida. Cuando la densidad in-situ es extremadamente húmeda teniendo en cuenta el contenido óptimo de humedad, el segundo espécimen puede ser un espécimen al que se le ha removido agua, y la prueba se completa siguiendo los principios discutidos en este método de ensayo.*

**10.10.1** Se colocan 2.50 kg de suelo de la muestra original en un recipiente para mezclar.

**10.10.2** Se miden exactamente 50 ml de agua. Esta cantidad de agua aumentará la humedad del suelo aproximadamente 2.0 %. Esto se identifica como “2 % de agua añadida (+ 2.0)”. A pesar de que se puede usar cualquier incremento de humedad de 1 % o más, el procedimiento está escrito considerando un incremento de 2.0 %.

**10.10.3** Se mezcla el suelo completamente mientras se le rocía el agua para asegurar una distribución homogénea de la humedad en todo el material. La mezcla se debe ejecutar tan rápido como sea posible, para evitar pérdida de humedad. Se cubre el recipiente con una bolsa de plástico, toallas húmedas o cualquier otra protección.

**10.10.4** Se compacta el espécimen y se calcula la densidad húmeda, de acuerdo con los métodos de la norma INV E-141.

**10.10.5** Se calcula y anota la densidad húmeda convertida (densidad al contenido de humedad del terreno) del espécimen, de la siguiente manera:

$$\rho_{\text{húmeda, c}} = \frac{\rho_{\text{húmeda}}}{1 + \frac{z}{100}} \quad [163.2]$$

Donde:  $\rho_{\text{húmeda, c}}$ : Densidad húmeda convertida del espécimen compactado,  $\text{Mg/m}^3$  ( $\text{lb/pie}^3$ );

$\rho_{\text{húmeda}}$ : Densidad húmeda de espécimen compactado,  $\text{Mg/m}^3$  ( $\text{lb/pie}^3$ );

z: Cantidad de agua añadida al suelo antes de compactar el espécimen, %.

**10.11** Se prepara el tercer espécimen, añadiendo o sustrayendo agua.

**10.11.1** Antes de compactar el tercer espécimen, se comparan las densidades húmedas de los espécimen uno y dos. Si la densidad húmeda convertida del segundo espécimen es mayor o igual que la densidad húmeda del primer espécimen se debe seguir con lo indicado en el numeral 10.11.2. Si la densidad húmeda convertida del segundo espécimen es menor que la densidad húmeda del primer espécimen, se debe seguir con lo indicado en el numeral 10.11.4.

**10.11.1.1** Si la densidad húmeda convertida del segundo espécimen es menor que la densidad húmeda del primer espécimen, y la diferencia no es mayor de 0.05 Mg/m<sup>3</sup> (3 lb/pie<sup>3</sup>); se puede eliminar el requerimiento de secar el suelo (numeral 10.11.4).

**10.11.2** Se prepara el tercer espécimen añadiendo agua.

**10.11.2.1** Se colocan 2.50 kg de suelo de la muestra original en un recipiente para mezclar.

**10.11.2.2** Se miden 100 ml de agua. Esta cantidad de agua aumentará la humedad del suelo en, aproximadamente, 4 %. Esto se identifica como “4% de agua añadida (+ 4.0)”.

**10.11.2.3** Se mezcla el suelo completamente mientras se le rocía el agua para asegurar una distribución homogénea de la humedad en todo el material. La mezcla se debe ejecutar tan rápido como sea posible para evitar pérdida de humedad. Se cubre el recipiente con una bolsa de plástico, toallas húmedas o cualquier otra protección.

**10.11.2.4** Se compacta el espécimen y se calcula su densidad húmeda de acuerdo con la norma INV E-141.

**10.11.2.5** Se calcula y anota la densidad húmeda convertida, de acuerdo con lo indicado en el numeral 10.10.5.

**10.11.2.6** Si la densidad húmeda convertida del tercer espécimen es menor o igual que la del segundo espécimen, se debe proceder como se indica en el numeral 10.12. Si la densidad húmeda convertida del tercer espécimen es mayor que la del segundo espécimen, se debe compactar un espécimen adicional de acuerdo con el numeral 10.11.3.

**10.11.3** Se prepara (n) el (los) espécimen(es) adicional(es) añadiendo agua.

**10.11.3.1** Se repiten los pasos 10.11.2.1 a 10.11.2.5, excepto que el incremento en las cantidades de agua añadida será

2v% mayor que el del espécimen anterior, (esto es, + 6 %, + 8 %, etc.). Antes de compactarlo con un porcentaje cualquiera de agua añadida mayor de 6 %, el material se deberá volver a tamizar a través del tamiz 4.75 mm (No. 4). El retamizado permite romper cualquier grumo de suelo y ayuda a homogeneizar la humedad.

- 10.11.3.2** Se repite el paso 10.11.3.1, hasta que la densidad húmeda convertida del espécimen actual sea menor o igual que la densidad húmeda corregida del espécimen previo. Luego, se continúa con el paso 10.12.

**10.11.4** Se prepara un tercer espécimen disminuyendo la humedad.

- 10.11.4.1** Se colocan 2.50 kg de suelo de la muestra original en un recipiente para mezclar.
- 10.11.4.2** Se seca el suelo hasta que alcance una pérdida de 50 g de masa. Esta pérdida de agua corresponde a un decremento en el contenido de humedad del suelo de, aproximadamente, 2 %. Esto se identifica como “menos 2 % de agua añadida (– 2.0)”. El suelo se mezcla completamente después del secado.

*Nota 4: El espécimen de suelo se puede secar bastante rápido (5 a 10 minutos), utilizando un ventilador, un secador de pelo u otro equipo de chorro de aire, haciendo circular el aire de un lado a otro en la bandeja que contiene el suelo, mientras se mezcla con suavidad. En climas húmedos se pueden requerir otros métodos de secado rápido. Si se aplica calor, el suelo debe alcanzar la temperatura ambiente antes de ser compactado. Se debe tener en cuenta la pérdida de humedad durante el enfriamiento.*

- 10.11.4.3** Se compacta el espécimen y se calcula su densidad húmeda, de acuerdo con la norma INV E-141.
- 10.11.4.4** Se calcula y anota la densidad húmeda convertida, de acuerdo con el numeral 10.10.5. Cuando al suelo se le ha disminuido la humedad, el valor de “agua añadida”, z, utilizado en el cálculo de densidad húmeda convertida, es un número negativo (esto es, z = – 2.0 %).

**10.11.4.5** Si la densidad húmeda convertida del tercer espécimen es menor o igual que la densidad húmeda del primer espécimen, se procede como se indica en el numeral 10.12. Si la densidad húmeda convertida del tercer espécimen es mayor que la densidad húmeda del primer espécimen, se debe compactar un espécimen adicional de acuerdo con el numeral 10.11.5.

**10.11.5** Se prepara(n) un(os) espécimen(es) adicional(es) disminuyendo la humedad.

**10.11.5.1** Se repiten los pasos 10.11.4.1 a 10.11.4.4, excepto que el decremento en las cantidades de agua añadida será 2 % mayor que el del espécimen anterior, (esto es, – 4 %). Antes de compactarlo con 4 % o más de agua sustraída, el material se deberá mezclar completamente y volver a pasar a través del tamiz 4.75mm (No. 4). El retamizado permite romper cualquier grumo de suelo y ayuda a homogeneizar la humedad.

**10.11.5.2** Se repite el paso 10.11.5.1, hasta que la densidad húmeda convertida del espécimen actual sea menor o igual que la del espécimen previo.

### DETERMINACIÓN DEL PUNTO MÁXIMO DE LA CURVA DE COMPACTACIÓN, DEL VALOR D Y DEL VALOR ( $w_f - w_0$ )

**10.12** Los puntos de los tres espécímenes de compactación se designan como Puntos A, B y C, en orden, iniciando con el espécimen de menor cantidad de agua añadida (el más seco). Si se compactan más de tres espécímenes, el espécimen con la densidad húmeda convertida más alta se designa como Punto B; se selecciona el espécimen que tenga 2 % menos de agua añadida que el Punto B y se designa como Punto A; se selecciona el espécimen que tenga 2 % más de agua añadida que el Punto B y se designa como punto C. (Ver Figura 163 - 1).

*Nota 5: Por facilidad, todos los espécímenes de compactación serán relacionados como convertidos (convertidos a densidad al contenido de humedad de campo), aunque el primer espécimen fue compactado al contenido de humedad de campo y, por lo tanto, no fue convertido.*

*Nota 6: En aquellos pocos casos donde la densidad del punto A y la del punto B sean iguales, los puntos deben ser designados A, C, B y no como A, B, C. La nota 7 no será válida para este caso.*

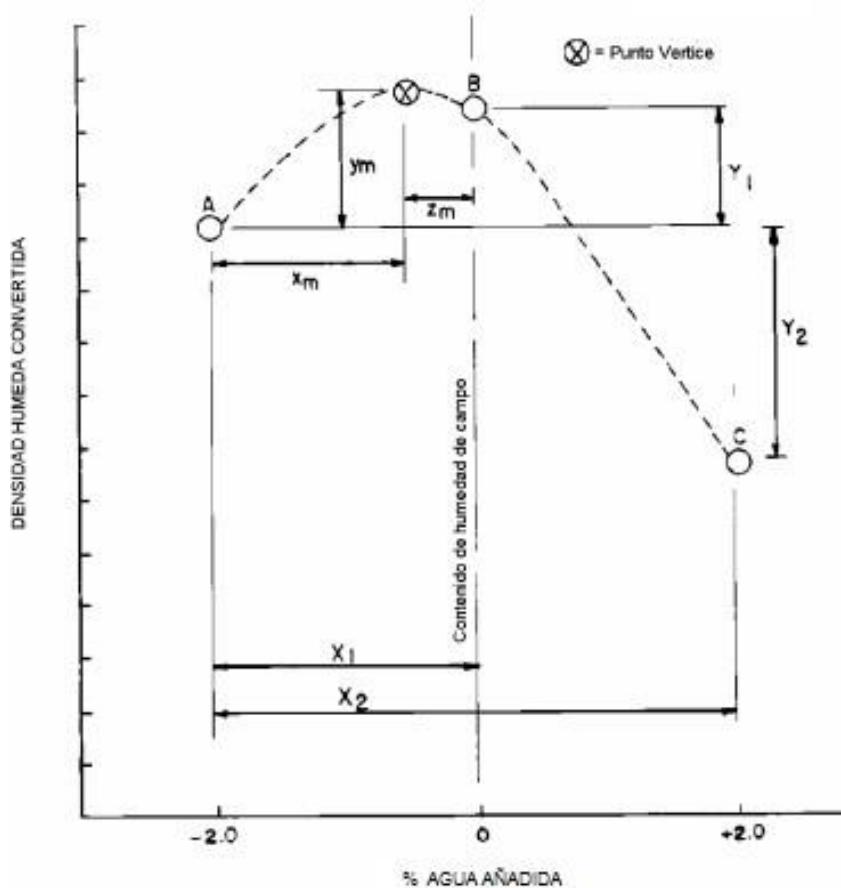


Figura 163 - 1. Determinación del punto vértice en la curva de compactación

**10.13** Se asigna la siguiente notación a los valores de los tres puntos de compactación:

$x_A$ : Agua añadida en el punto A, %.

$x_B$ : Agua añadida en el punto B, %.

$x_C$ : Agua añadida en el punto C, %.

Estos valores pueden ser negativos o positivos o cero; por ejemplo,  $-2.0, +2.0, 0.0$ .

$y_A$ : Densidad convertida del punto A,  $\text{Mg/m}^3$  ( $\text{lb/pie}^3$ ).

$y_B$ : Densidad convertida del punto B,  $\text{Mg/m}^3$  ( $\text{lb/pie}^3$ ).

$y_C$ : Densidad convertida del punto C,  $\text{Mg/m}^3$  ( $\text{lb/pie}^3$ ).

**10.14**Se calcula el valor  $x_1$  de la siguiente manera:

$$x_1 = x_B - x_A \quad [163.3]$$

**10.15**Se calcula el valor  $x_2$  de la siguiente manera:

$$x_2 = x_C - x_A \quad [163.4]$$

*Nota 7: Si se usan incrementos de 2%,  $x_1$  siempre será igual a 2.0 y  $x_2$  igual a 4.0.*

**10.16**Se calcula el valor  $y_1$  de la siguiente manera:

$$y_1 = y_B - y_A \quad [163.5]$$

**10.17**Se calcula el valor  $y_2$  de la siguiente manera:

$$y_2 = y_C - y_A \quad [163.6]$$

**10.18**Se calcula el valor de  $x_m$  de la siguiente manera:

$$x_m = \frac{1}{2} x_1 + \frac{(x_2 - x_1) \frac{y_1}{x_1}}{\frac{y_1}{x_1} - \frac{y_2}{x_2}} \quad [163.7]$$

**10.19**Se calcula el valor  $z_m$  de la siguiente manera:

$$z_m = x_A + x_m \quad [163.8]$$

**10.20**Se calcula el valor  $y_m$  de la siguiente manera:

$$y_m = \frac{-x_m^2 \times y_1}{x_1(x_1 - 2x_m)} \quad [163.9]$$

**10.21**Se calcula la densidad húmeda máxima al contenido de humedad de campo de la siguiente manera:

$$\rho_m = y_A + y_m$$

[163.10]

Donde:  $\rho_m$ : Densidad húmeda máxima al contenido de humedad de campo, Mg/m<sup>3</sup> (lb/pie<sup>3</sup>).

**10.22** Se calcula el valor  $(w_f - w_o)$ , de la siguiente manera:

$$(w_f - w_o) = - (z_m + MA)$$

[163.11]

Donde:  $w_f - w_o$ : Diferencia en el contenido de humedad entre la de campo y la óptima, %;

MA: Ajuste de humedad, %.

**10.22.1** El valor MA se obtiene de la Figura 163 - 2, marcando el punto correspondiente a  $\rho_m$  y  $z_m$  y seleccionando la línea curva más cercana al punto dibujado. El número correspondiente a esta línea es MA, por ejemplo, -2.0.

*Nota 8: Un valor negativo de  $(w_f - w_o)$  indica que el suelo in-situ está más seco que el contenido óptimo de humedad, un valor positivo indica que el suelo in-situ está más húmedo que el contenido óptimo de humedad.*

*Nota 9: El ajuste de humedad es necesario, porque cuando el agua es añadida al suelo antes de la compactación del espécimen, el porcentaje de "agua añadida" es calculado con base en la masa del suelo húmedo en lugar de la masa del suelo seco (el contenido de humedad real no se conoce en este momento). Por lo tanto, un 2 % de "agua añadida" es, solamente, una aproximación y se debe hacer un ajuste a  $z_m$  para obtener el valor de  $(w_f - w_o)$ . El valor de este ajuste ha sido calculado y luego dibujado en la Figura 163 - 2.*

**10.23** Se calcula y registra el valor D, en %, de la siguiente manera:

$$\text{Valor D} = \frac{\rho_{\text{húmeda, f}}}{\rho} \times 100$$

[163.12]

Donde: Valor D: Equivalente al porcentaje de compactación obtenido con el método rápido; comparación de la densidad in-situ con la densidad máxima de laboratorio, %;

$\rho_{\text{húmeda, f}}$ : Densidad húmeda de campo, Mg/m<sup>3</sup> (lb/pie<sup>3</sup>) (numerales 10.2 a 10.7);

$\rho_m$ :

Densidad húmeda máxima al contenido de humedad de campo,  $\text{Mg/m}^3$  ( $\text{lb/pie}^3$ ) (numerales 10.12 a 10.23).

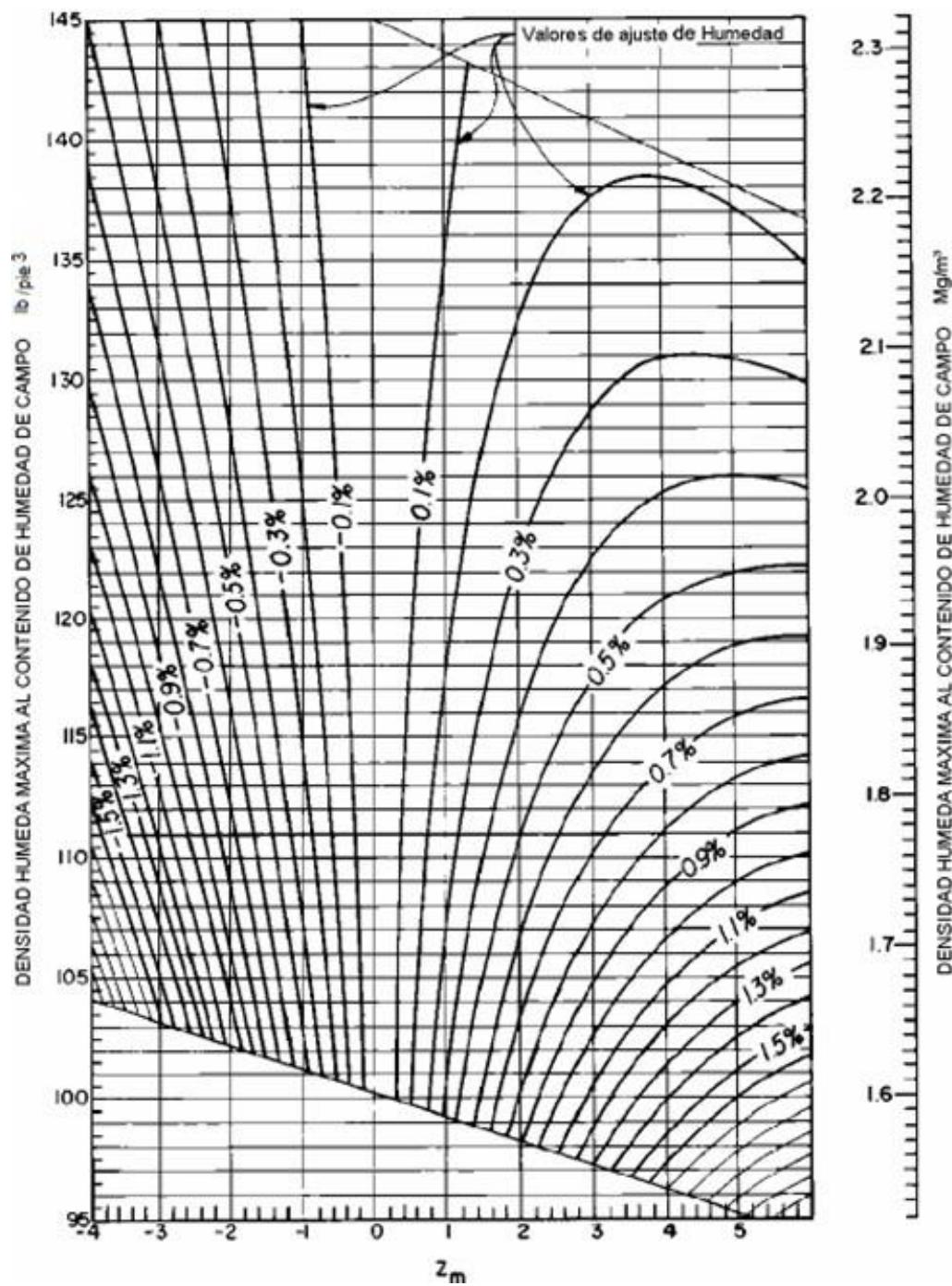


Figura 163 - 2. Valores de ajuste de humedad

## ENSAYO COMPLETO PARA ANOTAR EN EL REGISTRO

**10.24** Los siguientes cálculos se realizan después que se ha determinado el contenido de humedad de campo:

**10.24.1** Se calcula la densidad seca para el ensayo de densidad in-situ, para la densidad máxima de laboratorio y para el primer espécimen de compactación, de la siguiente manera:

$$\rho_d = \frac{\rho_{\text{húmeda}}}{1 + \frac{w_f}{100}} \quad [163.13]$$

Donde:  $\rho_d$ : Densidad seca, Mg/m<sup>3</sup> (lb/pie<sup>3</sup>);

$\rho_{\text{húmeda}}$ : Densidad húmeda, Mg/m<sup>3</sup> (lb/pie<sup>3</sup>);

$w_f$ : Contenido de humedad de campo, %.

*Nota 10: Los valores C y D basados en la densidad seca después de determinado el contenido de humedad de campo pueden diferir  $\pm 0.1\%$  de los valores C y D basados en la densidad húmeda en el día de la prueba. Esta diferencia se debe a la manera como son redondeados los números. Los valores C y D reportados en el día de la prueba son la base para la aceptación o el rechazo, aunque los valores generados posteriormente por hojas de cálculo electrónicas puedan ser un poco diferentes.*

**10.24.2** Se calculan el peso unitario seco de la prueba de densidad in-situ, el peso unitario máximo de laboratorio y el peso unitario seco del primer espécimen compactado de la siguiente manera:

$$\gamma_d = 9.807 \times \rho_d \quad [163.14]$$

Donde:  $\gamma_d$ : Peso unitario seco, kN/m<sup>3</sup>;

$\rho_d$ : Densidad seca, Mg/m<sup>3</sup>;

9.807: Factor de conversión, Mg/m<sup>3</sup> a kN/m<sup>3</sup>.

**10.24.3** Se calcula el contenido óptimo de humedad, de la siguiente manera:

$$w_o = w_f + 1 + \frac{w_f}{100} \times z_m \quad [163.15]$$

Donde:  $w_o$ : Contenido óptimo de humedad, %;

$w_f$ : Contenido de humedad de campo, %;

$z_m$ : Según el numeral 10.19, %.

## 11 INFORME

---

**11.1** Se debe registrar la siguiente información:

**11.1.1** Localización y cota del sitio del ensayo y número de identificación.

**11.1.2** Método de determinación de la densidad en el terreno.

**11.1.3** Volumen del orificio de prueba.

**11.1.4** Densidad húmeda in-situ de la fracción total o fracción pasante del tamiz No. 4, o ambas.

**11.1.5** Densidad seca in-situ de la fracción total o de la fracción pasante del tamiz No. 4, o ambas.

**11.1.6** Peso unitario seco in-situ de la fracción total o de la fracción pasante del tamiz número 4, o ambas.

**11.1.7** Contenido de humedad in-situ de la fracción total o de la fracción pasante del tamiz No. 4, o ambas y método(s) de prueba usado(s).

**11.1.8** Densidad seca máxima, peso unitario seco máximo y humedad óptima.

**11.1.9** Valor C, valor D y  $(w_f - w_o)$ .

**11.1.10** Descripción del equipo de prueba.

**11.1.11** Comentarios pertinentes sobre la prueba.

**11.1.12** Descripción visual del material ensayado.

## 12 PRECISIÓN Y SESGO

---

**12.1 Precisión** – No se presentan datos de ensayo sobre precisión, debido a la naturaleza de los materiales de suelo y roca ensayados por este método. No es factible producir múltiples sitios de ensayo con propiedades uniformes. Cualquier variación observada en los datos se debe, probablemente, a variaciones en los especímenes o a la manera como el operario realiza las pruebas.

**12.2 Sesgo** – No existe un valor de referencia aceptado para este método de prueba; por lo tanto, no se puede determinar el sesgo.

## 13 NORMAS DE REFERENCIA

---

ASTM D 5080 – 08

### ANEXO A (Aplicación obligatoria)

#### MÉTODO DEL 1 % PARA DETERMINAR EL PUNTO VÉRTICE DE LA CURVA DE COMPACTACIÓN

---

##### **A.1 Objeto:**

- A.1.1** Este anexo presenta un procedimiento alternativo para preparar el tercer espécimen de compactación y determinar el punto más elevado de la curva de compactación al contenido de humedad de campo.
- A.1.2** Este procedimiento elimina el requisito de secar los suelos cuando su contenido de agua se encuentra cerca del óptimo.
- A.1.3** Este procedimiento solo se puede usar cuando el segundo espécimen de compactación tiene una densidad húmeda convertida menor que la densidad húmeda del primer espécimen de compactación y la diferencia entre ellas es de  $0.05 \text{ Mg/m}^3$  o menos.

*Nota A.1: Este método supone que las dos densidades húmedas se encuentran cerca del vértice de la parábola.*

**A.2** *Procedimiento – Obtención de la curva de compactación:*

**A.2.1** Se prepara el tercer espécimen añadiendo 1 % de agua, de la siguiente manera:

**A.2.1.1** Se colocan 2.5 kg del suelo de la muestra original (Ver numeral 10.5) en una bandeja apropiada para mezclar.

**A.2.1.2** Se miden 25 ml de agua. Esta cantidad aumentará la humedad del suelo en, aproximadamente, 1 %. Esto se identifica como “1 % de agua añadida (+ 1.0)”.

**A.2.1.3** Se mezcla completamente el suelo mientras se le rocía el agua. La mezcla se deberá efectuar tan rápido como sea posible, para prevenir pérdida de humedad.

**A.2.1.4** Se compacta el espécimen y se calcula su densidad húmeda de acuerdo con el Método A de la norma INV E-141.

**A.2.1.5** Se calcula y anota la densidad húmeda convertida, de acuerdo con el numeral 10.10.5 de esta norma.

**A.3** *Determinación del vértice de la curva de compactación y de  $(w_f - w_o)$* 

**A.3.1** Se designan los tres espécímenes de compactación como A, B y C, en orden creciente de contenido de agua, empezando por el espécimen compactado con la humedad del terreno. Se siguen las instrucciones de los numerales 10.13 a 10.22 para calcular la densidad máxima de la curva de compactación y la diferencia  $(w_f - w_o)$ .

**ANEXO B  
(Informativo)****APLICABILIDAD DE LOS VALORES DE AJUSTE DE LA HUMEDAD**

**B.1** Durante el proceso de ensayo se añade agua al suelo. El porcentaje añadido se basa en la masa del suelo húmedo, por cuanto la humedad real se desconoce en ese momento. Se puede realizar un ajuste para obtener una mejor aproximación del valor  $(w_f - w_o)$  empleando la Figura 163 - 2, como se explica en el numeral 10.22.

- B.2** Los valores de ajuste de la humedad se basan en la curva de mejor ajuste obtenida sobre 1300 puntos que relacionan la humedad óptima versus la densidad húmeda a la humedad óptima, como se muestra en la Figura 163B - 1.
- B.3** Las propiedades del suelo que se está ensayando se deben verificar en la Figura 163B - 1, para ver si los valores de él encajan dentro de la banda que representa el promedio  $\pm$  2 veces la desviación estándar.
- B.4** Si el suelo cae por fuera de la banda, se deberán desarrollar ajustes especiales de la humedad para él. Sobre el particular, se pueden encontrar instrucciones en el Apéndice B del documento *"A Rapid Method of Construction Control for Embankments of Cohesive Soil"*, de autoría de Jack W. Hilf, publicado en Engineering Monograph No. 26 del *Bureau of Reclamation*, quinta edición, de agosto de 1981.
- B.5** Los datos usados para desarrollar las Figuras 163 - 2 y 163B - 1 provienen del ensayo del *Bureau of Reclamation*, que usa un molde de 1/20 pie<sup>3</sup>, donde la muestra se compacta en 3 capas, con 25 golpes por capa, con un martillo de 5.5 libras con caída libre de 18 pulgadas, empleando solo material que pasa el tamiz No. 4. La energía de compactación de este ensayo es de 12 375 lb-pie/pie<sup>3</sup>, la cual es comparable a la del ensayo normal de compactación (norma INV E-141). Posiblemente, sea necesario desarrollar valores de ajuste de la humedad separados para suelos con gravedades específicas muy bajas o muy altas, o compactados con una energía diferente.

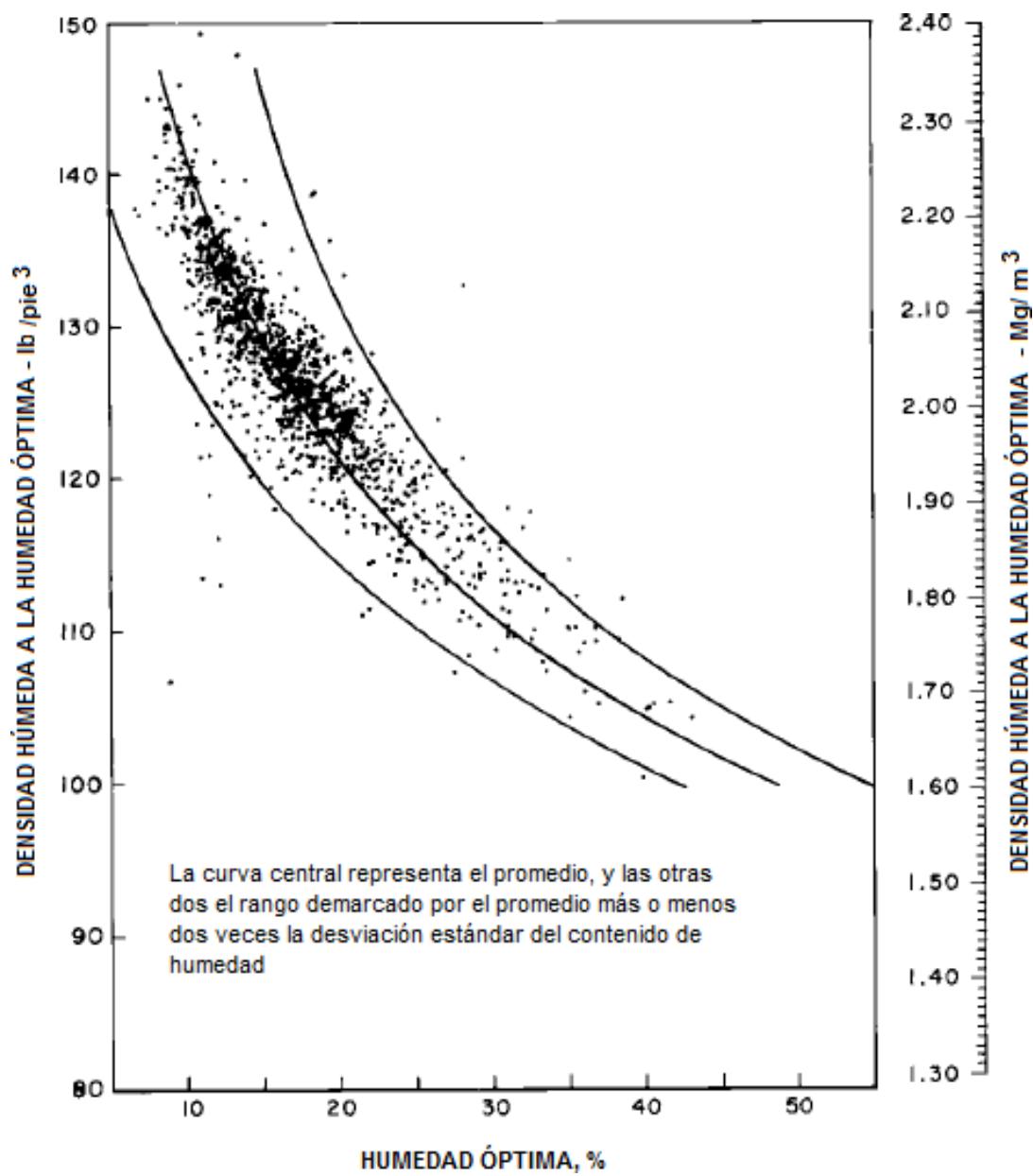


Figura 163B - 1. Humedad óptima contra densidad húmeda a la humedad óptima