

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD Y DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO Y DEL SUELO-AGREGADO EN EL TERRENO EMPLEANDO MEDIDORES NUCLEARES (Profundidad Reducida)

INV E – 164 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Esta norma describe los procedimientos para medir en el terreno la densidad y la humedad del suelo y del suelo-agregado, empleando un equipo nuclear. La densidad se puede medir por transmisión directa, retrodispersión o por una combinación de retrodispersión y un colchón de aire. Las medidas de humedad se toman en la superficie por retrodispersión, independientemente del método usado para determinar la densidad.
- 1.2** La densidad total o densidad húmeda del suelo y del suelo-agregado se mide mediante la atenuación de rayos gamma donde, en transmisión directa, la fuente está localizada a una profundidad conocida hasta de 300 mm (12") mientras el detector permanece en la superficie (algunos equipos pueden reversar esta orientación); mientras que en retrodispersión o en retrodispersión/colchón de aire, la fuente y los detectores permanecen en la superficie.
- 1.3** La densidad de la muestra de ensayo, en masa por unidad de volumen del material, se determina comparando la cantidad de radiación gamma con una información de calibración previamente establecida.
- 1.3.1** La densidad seca de la muestra se obtiene sustrayendo la masa de agua por unidad de volumen, de la densidad húmeda de la muestra. La mayoría de los equipos despliega directamente el valor de la densidad seca.
- 1.4** El medidor nuclear está calibrado para leer la masa de agua por unidad de volumen de suelo o suelo-agregado. Cuando se divide por la densidad del agua y se multiplica por 100, la masa de agua por unidad de volumen es equivalente al contenido de agua en volumen. El contenido de agua se determina por medio de la termalización o reducción de velocidad de neutrones rápidos, causada por el hidrógeno presente en el agua, cuando una fuente de

neutrones de alta velocidad y un detector de neutrones termales permanecen ambos en la superficie.

1.5 La norma presenta dos procedimientos (Figura 164 - 1):

1.5.1 *Procedimiento A* – Describe el método de transmisión directa, en el cual la varilla fuente de rayos gamma se introduce en el suelo hasta la profundidad elegida, en un orificio previamente elaborado. Este es el método preferido para determinar la densidad.

1.5.2 *Procedimiento B* – Involucra un aparato de retrodispersión, el cual tiene la fuente y el detector de rayos en el mismo plano.

1.6 Esta norma reemplaza las normas INV E-164-07 e INV E-166-07.

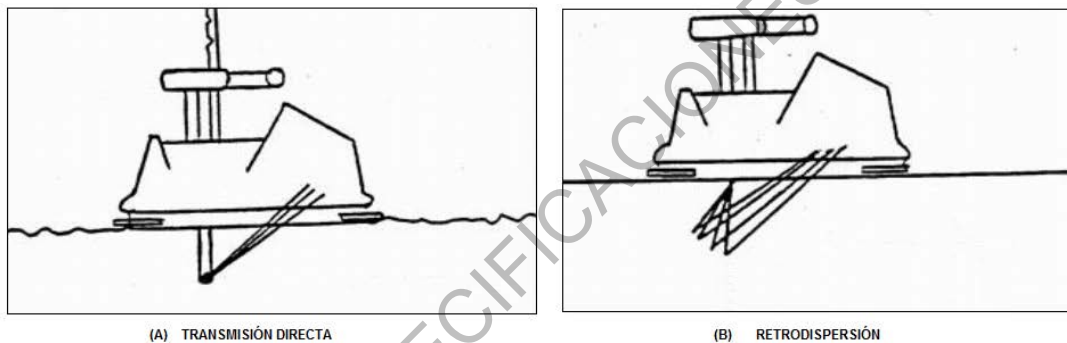


Figura 164 - 1. Procedimientos para medida de la densidad y la humedad con un equipo nuclear

2 DEFINICIONES

2.1 *Aparato nuclear (medidor nuclear)* – Dispositivo que contiene una o más fuentes de radiación usadas para medir ciertas propiedades del suelo y del suelo-agregado.

2.2 *Densidad húmeda* – Masa total (sólidos + agua) en el volumen total de un suelo o de un suelo-agregado.

2.3 *Densidad seca* – Masa de las partículas sólidas en el volumen total de un suelo o de un suelo-agregado.

2.4 *Fuente gamma* – Una fuente sellada de material radiactivo que emite radiación gamma.

- 2.5** *Fuente de neutrones* – Una fuente sellada de material radiactivo que emite radiación de neutrones
- 2.6** *Dispersión Compton* – Interacción entre un rayo gamma (fotón) y un electrón orbital, donde el rayo gamma pierde energía y rebota en una dirección diferente.
- 2.7** *Detector* – Dispositivo para detectar y medir radiación.
- 2.8** *Sonda* – Varilla de metal adjunta a un aparato nuclear, en la cual se encuentra alojada la fuente radiactiva o el detector. La varilla puede ser descendida a las profundidades especificadas de ensayo. Las sondas que contienen solamente la fuente radiactiva se llaman comúnmente “varillas fuente”.
- 2.9** *Termalización* – Proceso por medio del cual los neutrones rápidos pierden velocidad a causa de su colisión con átomos de bajo peso, como los de hidrógeno.
- 2.10** *Contenido de agua* – Relación entre la masa de agua contenida en los vacíos del suelo o suelo-agregado y la masa de las partículas sólidas, expresada en porcentaje.
- 2.11** *Contenido de agua volumétrica* – Volumen de agua, como porcentaje del volumen total de un material de suelo o roca.
- 2.12** *Conteo de ensayo* – Dato de salida de un detector, para un tipo específico de radiación en un ensayo dado.
- 2.13** *Bloques preparados* – Bloques de suelo, roca sólida, concreto y materiales de ingeniería, que poseen características de diversos grados de uniformidad reproducible.

3 IMPORTANCIA Y USO

- 3.1** El método de ensayo descrito es útil como una técnica rápida no destructiva para medir en el sitio la densidad húmeda y el contenido de agua de suelos y mezclas de suelo-agregado, así como para determinar la densidad seca.
- 3.2** El método tiene aplicación en pruebas de control de calidad y de aceptación de mezclas compactadas de suelo y de suelo-agregado en la construcción, así como en trabajos de investigación y desarrollo. La naturaleza no destructiva de

este tipo de ensayos permite hacer mediciones repetidas en un solo sitio y efectuar análisis estadístico de los resultados.

- 3.3** *Densidad* – Las suposiciones fundamentales inherentes en los métodos son: (1) que la dispersión Compton es la interacción dominante, y (2) que el material es homogéneo.
- 3.4** *Contenido de agua* – Las suposiciones fundamentales inherentes en el método de ensayo son: (1) que los iones hidrógeno presentes en el suelo o en el suelo-agregado lo están en forma de agua, de la manera que ella se obtiene mediante la norma INV E-122, y (2) que el material es homogéneo (Ver numeral 4.2).

4 INTERFERENCIAS

- 4.1** *Interferencias para la medida de la densidad in-situ:*
- 4.1.1** La composición química de la muestra puede afectar las mediciones.
- 4.1.2** Las mediciones se pueden ver afectadas por la falta de homogeneidad del suelo y por su textura superficial.
- 4.1.3** Las medidas en el método de retrodispersión están más influenciadas por la densidad y la humedad del material que se encuentra más cerca de la superficie.
- 4.1.4** Las medidas en el modo de transmisión directa son un promedio de la densidad del material existente entre la parte inferior de la sonda y la superficie del aparato.
- 4.1.5** Partículas de gran tamaño o vacíos grandes en la trayectoria de la fuente o detector, pueden causar determinaciones de densidad mayores o menores de las reales. Cuando se sospecha que no haya uniformidad en el suelo debido a la estratificación, presencia de agregados gruesos o vacíos, el sitio del sitio de ensayo se debe excavar y examinar visualmente para determinar si el material de ensayo es representativo de todo el material en general y si se necesita hacer la corrección por sobretamaños de acuerdo con la norma INV E-143.
- 4.1.6** El volumen de la muestra de ensayo es, aproximadamente, 0.0028 m³ (0.10 pies³) para el método de retrodispersión y 0.0057 m³ (0.20 pies³)

para el método de transmisión directa, cuando la profundidad de ensayo es 15 cm (6"). El volumen real de la muestra es indeterminado y varía con el tipo de aparato y la densidad del material.

4.1.7 No puede haber otras fuentes de radiación a menos de 9 m (30 pies) del equipo en operación.

4.2 *Interferencias para la medida de la humedad in-situ:*

4.2.1 La composición química de la muestra puede afectar dramáticamente las mediciones, siendo necesario realizar ajustes (Ver numeral 9.6). El hidrógeno en forma diferente al agua definida como se indica en la norma de ensayo INV E-122 y el carbono, dan lugar a resultados superiores a los valores reales. Algunos elementos químicos como el boro, el cloro y pequeñas cantidades de cadmio, producen medidas más bajas que las reales.

4.2.2 El contenido de agua determinado por este método de ensayo no es necesariamente el promedio del agua dentro del volumen de muestra involucrado en la medición. Puesto que esta medida se realiza siempre por retrodispersión, el valor es sesgado por el contenido de agua del material que se encuentra más cerca de la superficie. El volumen de suelo o suelo-agregado representado en la medida es indeterminado y variará con el contenido de agua del material. En general, entre mayor sea el contenido de agua del material, menor es el volumen involucrado en la medida. Aproximadamente, el 50 % de una medida típica proviene del contenido de agua existente en los 50 a 75 mm (2 a 3") superiores.

4.2.3 No puede haber otras fuentes de neutrones a menos de 9 m (30 pies) del equipo en operación.

5 EQUIPO

5.1 *Aparato nuclear para medir la densidad y la humedad* – Mientras que los detalles exactos de construcción del aparato pueden variar, el sistema debe consistir básicamente en:

5.1.1 *Fuente gamma* – Una fuente de radiación gama de alta energía, como cesio o radio.

- 5.1.2** *Detector gama* – Cualquier tipo de detector gama, como un (os) tubo (s) Geiger–Mueller.
- 5.1.3** *Fuente de neutrones rápidos* – Una mezcla sellada de material radioactivo, tal como americio o radio y un material objetivo como el berilio, o un emisor de neutrones como el californio 252.
- 5.1.4** *Detector de neutrones lentos* – Cualquier tipo de detector de neutrones lentos, como el contador de radiaciones de trifluoruro de boro o helio –3.
- 5.2** *Referencia estándar (bloque estándar)* – Se utiliza un bloque de material hidrogenado para comprobar la operación del equipo y la calibración, para corregir el debilitamiento de la emisión, y para establecer condiciones para una velocidad de conteo reproducible.
- 5.3** *Dispositivo de preparación del sitio* – Se pueden emplear una placa de acero, una regla u otras herramientas adecuadas para nivelación, para perfilar el sitio de prueba hasta lograr la lisura requerida.
- 5.4** *Punzón* – Un punzón de diámetro ligeramente mayor que la sonda del instrumento de transmisión directa, el cual se usa para preparar un orificio en el material que va a estar sometido al ensayo y dentro del cual se va a insertar la sonda.
- 5.4.1** *Guía para el punzón* – Accesorio que sostiene el punzón en dirección vertical.
- 5.4.2** *Extractor de punzón* – Dispositivo que se puede usar para remover el punzón en la dirección vertical de manera que éste, al salir, no distorsione el orificio.
- 5.5** *Martillo* - Con el peso suficiente para conducir el punzón a la profundidad requerida, sin una distorsión indebida del orificio.
- 5.6** *Martillo deslizante* – Con un punzón incorporado, se puede utilizar como alternativa para preparar el orificio en el material que va a ser ensayado y para extraer el punzón sin distorsionar el orificio.

6 PELIGROS

- 6.1** Este equipo utiliza material radioactivo que puede ser peligroso para la salud del usuario, a menos que se tomen todas las precauciones necesarias. El usuario del equipo se debe familiarizar con los procedimientos de seguridad y las regulaciones gubernamentales.
- 6.2** Instrucciones efectivas al usuario sobre algunos procedimientos rutinarios de seguridad, tales como pruebas para detectar fugas de radioactividad, el registro de los datos del dosímetro personal, el uso de contadores de radiación, etc., se recomiendan como parte del sistema de operación de los equipos de este tipo.

7 CALIBRACIÓN

- 7.1** La calibración del instrumento se debe realizar de acuerdo con los Anexos A y B.

8 NORMALIZACIÓN

- 8.1** Todos los instrumentos nucleares para medir la densidad y la humedad están sujetos al envejecimiento a largo plazo de la fuente radioactiva, de los detectores y del sistema electrónico, lo cual va cambiando la relación entre las velocidades de conteo y la densidad y el contenido de agua del material. Para compensar este envejecimiento, los instrumentos se deben calibrar mediante la relación entre el conteo medido y el conteo hecho sobre una referencia estándar o sobre un colchón de aire (este último, para el método retrodispersión/colchón de aire).
- 8.2** Se requiere la normalización del equipo sobre una referencia estándar (bloque estándar) al empezar cada día de trabajo, debiéndose llevar un registro permanente de la información que se ha obtenido, para asegurar el cumplimiento de los requisitos mencionados en los numerales 8.2.2 u 8.2.3. La normalización se debe efectuar con el equipo alejado, al menos, 9 m (30 pies) de otros medidores y lejos de grandes masas de agua u otros materiales que puedan afectar las velocidades de conteo en la referencia estándar.
- 8.2.1** Se enciende el instrumento y se permite que se establezca de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

8.2.2 Usando la referencia estándar (bloque estándar), se toma una lectura que dure, al menos, 4 veces lo que dura una medida normal (el período de una medida normal es, típicamente, un minuto), para constituir un chequeo de normalización. Se debe usar el procedimiento recomendado por el fabricante para establecer la conformidad de la medida sobre la referencia estándar con el rango aceptado. Si no hay recomendaciones específicas del fabricante, se empleará el procedimiento indicado en el numeral 8.2.3.

8.2.3 Si los valores del conteo de la normalización actual están por fuera de los límites establecidos en las ecuaciones 164.1 y 164.2, se deberá repetir la prueba de normalización. Si el segundo chequeo las satisface, se considera que el aparato está en condiciones satisfactorias para operar.

$$0.99 (N_{dc})e^{\frac{-(\ln(2))t}{T_{d(1/2)}}} \leq N_{d0} \leq 1.01 (N_{dc})e^{\frac{-(\ln(2))t}{T_{d(1/2)}}} \quad [164.1]$$

$$0.98 (N_{mc})e^{\frac{-(\ln(2))t}{T_{m(1/2)}}} \leq N_{m0} \leq 1.02 (N_{mc})e^{\frac{-(\ln(2))t}{T_{m(1/2)}}} \quad [164.2]$$

Donde: $T_{d(1/2)}$: Vida media del isótopo usado por el aparato para determinar la densidad. Por ejemplo, para el isótopo radiactivo más comúnmente usado para la determinación de la densidad en estos aparatos, el ^{137}Cs , el valor $T_{d(1/2)}$ es 11 023 días;

$T_{m(1/2)}$: Vida media del isótopo usado por el aparato para determinar el contenido de agua. Por ejemplo, para el isótopo en Am:Be más comúnmente usado para la determinación del contenido de agua en estos aparatos, el ^{241}Am , el valor $T_{m(1/2)}$ es 157 788 días;

N_{dc} : Conteo de normalización del sistema de densidad, obtenido en el momento de la última calibración o verificación;

N_{mc} : Conteo de normalización del sistema de humedad, obtenido en el momento de la última calibración o verificación;

- N_{d0} : Conteo actual del sistema de densidad;
- N_{m0} : Conteo actual del sistema de humedad;
- t : Tiempo transcurrido entre el ensayo de normalización actual y la fecha de la última calibración o verificación. Las unidades seleccionadas para t , $T_{d(1/2)}$ y $T_{m(1/2)}$ deben ser consistentes; es decir, si $T_{d(1/2)}$ se expresa en días, los otros dos valores también se deben expresar en días;
- $\ln(2)$: Logaritmo natural de 2 (aproximadamente 0.69315);
- e : 2.71828

8.2.4 Si, por alguna razón, la densidad o el contenido de agua medidos durante el día parecen sospechosos, se debe realizar otra prueba de normalización.

8.3 *Ejemplo* – Un aparato nuclear que contiene una fuente de ^{137}Cs para la determinación de la densidad (vida media = 11 023 días) y una de ^{241}Am para la determinación de la humedad (vida media = 157 788 días) se calibra el día 1 de marzo de un año determinado. En el momento de la calibración, el conteo estándar de densidad fue 2800 cuentas por minuto (pre-escalado) y el conteo estándar de humedad fue 720 cuentas por minuto (pre-escalado). ¿De acuerdo con las ecuaciones 164.1 y 164.2 del numeral 8.2.3, cuál será el rango permitido de cuentas estándar el día 1 de noviembre del mismo año?

8.3.1 *Solución* – Entre el día de calibración (marzo 1) y el de verificación (noviembre 1) han transcurrido 245 días; por lo tanto: $t = 245$ días, $T_{d(1/2)} = 11\,023$ días, $T_{m(1/2)} = 157\,788$ días, $N_{dc} = 2800$ cuentas y $N_{mc} = 720$ cuentas.

8.3.2 De acuerdo con la ecuación 164.1, el límite inferior del conteo estándar para la densidad, tomado el 1 de noviembre (N_{d0}), es:

$$0.99(N_{dc})e^{\frac{-(\ln(2))t}{T_{d(1/2)}}} = 0.99(2800)e^{\frac{-(\ln(2))245}{11\,023}} = 2730 \text{ cuentas}$$

8.3.3 Del mismo modo, el límite superior del conteo estándar para la densidad, tomado el 1 de noviembre (N_{d0}), es:

$$1.01(N_{dc})e^{\frac{-(\ln(2))t}{T_{d(1/2)}}} = 1.01(2800)e^{\frac{-(\ln(2))245}{11\ 023}} = 2785 \text{ cuentas}$$

8.3.4 Por lo tanto, el conteo estándar para densidad obtenido el 1 de noviembre se debe encontrar entre 2730 y 2785 cuentas.

8.3.5 De acuerdo con la ecuación 164.2, el límite inferior del conteo estándar para la humedad, tomado el 1 de noviembre (N_{m0}), es:

$$0.98(N_{mc})e^{\frac{-(\ln(2))t}{T_{m(1/2)}}} = 0.98(720)e^{\frac{-(\ln(2))245}{157\ 788}} = 705 \text{ cuentas}$$

8.3.6 Del mismo modo, el límite superior del conteo estándar para la humedad, tomado el 1 de noviembre (N_{m0}), es:

$$1.02(N_{mc})e^{\frac{-(\ln(2))t}{T_{m(1/2)}}} = 1.02(720)e^{\frac{-(\ln(2))245}{157\ 788}} = 733 \text{ cuentas}$$

8.3.7 Por lo tanto, el conteo estándar para humedad obtenido el 1 de noviembre se debe encontrar entre 705 y 733 cuentas.

9 PROCEDIMIENTO

9.1 Siempre que resulte posible, se selecciona un sitio para la prueba donde el instrumento, en la posición de ensayo, esté alejado al menos 600 mm (24"), en sentido vertical u horizontal, de algún objeto cuya presencia tenga la posibilidad de modificar la respuesta del aparato.

9.2 Se prepara el sitio de prueba de la siguiente manera:

9.2.1 Se remueve todo el material que se encuentre suelto y alterado y se retira el material adicional que sea necesario, para alcanzar la superficie del material que se va a ensayar.

9.2.2 Se prepara un área horizontal de tamaño suficiente para acomodar el equipo; se obtiene una condición lisa mediante nivelación o raspado, de tal manera que se logre el máximo contacto entre el equipo y el material que se va a ensayar.

9.2.3 La colocación del instrumento sobre la superficie del material que se va a ensayar es crítica para la determinación exitosa de la densidad y del contenido de agua. La condición óptima es el contacto total entre la

base del instrumento y la superficie del material que está siendo ensayado. El vacío máximo debajo del instrumento no debe exceder de 3 mm (1/8"), aproximadamente. Se deben usar finos del sitio con contenidos de agua similares o una arena fina para rellenar los vacíos. El material de relleno se deberá nivelar con una placa rígida u otra herramienta apropiada. El área total rellenada no deberá superar el 10 % del área de la base del instrumento y la profundidad rellenada no deberá exceder de 3 mm (1/8").

9.3 Se enciende el aparato y se espera que se estabilice, siguiendo para ello las instrucciones del fabricante.

9.4 *Procedimiento A - Procedimiento de transmisión directa:*

9.4.1 Se selecciona un sitio para la prueba donde el instrumento, en la posición de ensayo, esté alejado al menos 150 mm (6") de alguna proyección vertical, de acuerdo con lo indicado en el numeral 9.1.

9.4.2 Empleando el punzón y su guía, se perfora un orificio perpendicular a la superficie preparada. La perforación se debe llevar, como mínimo, 50 mm (2") más abajo de la profundidad deseada para realizar la medida, y su alineación deberá ser tal que la inserción de la sonda no haga inclinar al aparato respecto del plano del área preparada.

9.4.3 Se marca el área de ensayo para permitir la colocación del aparato nuclear sobre ella y alinear la varilla fuente en el orificio. Se deben seguir las instrucciones que, sobre el asunto, se encuentren en el manual de instrucciones del aparato.

9.4.4 Se remueve el punzón con el mayor cuidado, con el fin de evitar la distorsión del orificio, la caída de material suelto dentro de él o el daño a la superficie.

Nota 1: Se debe tener cuidado cuando se haga un orificio en suelos granulares sin cohesión, por cuanto las medidas se pueden ver afectadas por modificaciones en la densidad de los materiales circundantes en el momento de formar el hueco.

9.4.5 Se asienta el equipo firmemente sobre la superficie a ensayar, asegurando el máximo contacto, de acuerdo con lo descrito en el numeral 9.2.3.

9.4.6 Se hace descender la sonda hasta la profundidad deseada. Se tira suavemente el aparato hacia atrás, para que la parte trasera de la

sonda entre en contacto íntimo con el lado del hueco que queda en la trayectoria de medición de los rayos gamma.

Nota 2: Como medida de seguridad, se recomienda que una sonda que contenga una fuente radiactiva no se extienda más allá de su posición de protección, antes de colocarla dentro del orificio de prueba. Siempre que sea posible, el aparato se debe alinear de manera de permitir que la sonda penetre directamente en el orificio desde su posición de protección.

- 9.4.7** Se mantiene cualquier otra fuente radiactiva a una distancia no menor de 9 m (30 pies) del medidor, para evitar que se afecten sus mediciones.
- 9.4.8** Si el aparato dispone de un selector de profundidad, se ajusta éste a la misma profundidad de la sonda.
- 9.4.9** Se obtienen y anotan una o más lecturas de densidad y humedad, de un minuto cada una. La densidad húmeda en el sitio se lee directamente en el aparato o se determina con ayuda de la curva de calibración o de una tabla preparada con anterioridad.
- 9.4.10** Se lee la humedad directamente en el aparato o se determina con ayuda de la curva de calibración o de una tabla preparada con anterioridad.
- 9.5** *Procedimiento B - Procedimiento de retrodispersión o retrodispersión /colchón de aire:*
- 9.5.1** Se asienta el equipo firmemente.
- 9.5.2** Se mantiene cualquier otra fuente radiactiva a una distancia no menor de 9 m (30 pies) del medidor, para evitar que se afecten sus mediciones.
- 9.5.3** Se pone el aparato en la posición de retrodispersión.
- 9.5.4** Se obtienen y anotan una o más lecturas de densidad y humedad, de un minuto cada una. Cuando se use el modo de relación retrodispersión /colchón de aire, se deberán seguir las instrucciones del fabricante en relación con la puesta a punto del aparato. Se deberá tomar el mismo número de lecturas con el aparato en posición de colchón de aire que en posición de retrodispersión. Se calcula la relación de colchón de aire, dividiendo las cuentas por minuto obtenidas en la posición de colchón de aire por las cuentas por minuto

obtenidas en la posición normal (retrodispersión). Muchos aparatos traen de fábrica la manera de calcular automáticamente esta relación y la densidad húmeda.

9.5.5 La densidad húmeda en el sitio se lee directamente en el aparato o se determina con ayuda de la curva de calibración o de una tabla preparada con anterioridad.

9.5.6 Se lee la humedad directamente en el aparato o se determina con ayuda de la curva de calibración o de una tabla preparada con anterioridad (Ver numeral 9.6).

9.6 *Corrección del contenido de agua y corrección por sobretamaños:*

9.6.1 Para un uso apropiado del aparato y para obtener valores exactos, tanto de humedad como de densidad seca, se requiere realizar ambas correcciones cuando sean necesarias. Antes de usar el valor de humedad obtenido del aparato, este valor se debe contrastar con el obtenido por otro método de ensayo como, por ejemplo, alguno de los descritos en las normas INV E-122, INV E-135 o INV E-150. Como parte de un procedimiento rutinario, para realizar verificaciones se deben tomar muestras ocasionales debajo del sitio donde se colocó el medidor nuclear. Todos los fabricantes de medidores nucleares tienen un procedimiento para corregir los valores de humedad derivados de sus aparatos.

9.6.2 Si en el sitio del ensayo hay sobretamaños, se debe rotar el medidor alrededor del eje de la sonda para obtener lecturas adicionales de verificación. Cuando exista alguna incertidumbre en relación con la existencia de sobretamaños, es aconsejable hacer un muestreo en el sitio para verificar la existencia y la proporción relativa de dichas partículas. La norma INV E-143 presenta un método para corregir tanto la densidad húmeda como el contenido de agua.

9.6.3 Cuando se realice el muestreo mencionado en el numeral anterior, la muestra se debe tomar exactamente bajo el sitio que ocupó el medidor nuclear. El tamaño de dicha área es, aproximadamente, de 200 mm (8") de diámetro por una profundidad igual a la de inserción de la sonda cuando se usa el método de transmisión directa, o de 75 mm (3") cuando se emplea el modo de retrodispersión.

10 CÁLCULOS Y RESULTADOS

10.1 Determinación de la densidad húmeda:

10.1.1 En la mayoría de los aparatos se puede leer directamente su valor en kg/m^3 (lb/pie^3). Si la lectura de la densidad se presenta en “cuentas”, la densidad húmeda se determina a partir de ellas y de una curva o tabla de calibración previamente establecida.

10.1.2 Se anota la densidad húmeda con aproximación a 1 kg/m^3 (0.1 lb/pie^3).

10.2 Determinación del contenido de agua (humedad):

10.2.1 Se adopta la lectura del aparato, si éste la despliega en términos de humedad (w).

10.2.2 Si lo que el aparato entrega es la masa de agua por unidad de volumen, en kg/m^3 (lb/pie^3), la humedad (w), como porcentaje de la masa unitaria seca o del peso unitario seco, se calcula de la siguiente manera:

$$w = \frac{M_m \times 100}{\rho_d} \quad [164.3]$$

O:

$$w = \frac{M_m \times 100}{\rho - M_m} \quad [164.4]$$

$$w = \frac{M_m \times 100}{\rho - M_m}$$

Donde: w : Contenido de agua, porcentaje de la densidad seca;

M_m : Contenido de agua, kg/m^3 (lb/pie^3);

ρ_d : Densidad seca del suelo, kg/m^3 (lb/pie^3);

ρ : Densidad húmeda (total) del suelo, kg/m^3 (lb/pie^3).

10.2.3 Si la lectura de la densidad se presenta en el aparato en “cuentas”, la masa de agua por unidad de volumen se determina a partir de ellas y de una curva o tabla de calibración previamente establecida. Luego, se convierte en contenido de agua gravimétrico aplicando las fórmulas del numeral 10.2.2.

10.3 *Determinación de la densidad seca del suelo (ρ_d):*

10.3.1 Se puede aplicar alguno de los métodos que se describen a continuación:

10.3.1.1 Si el contenido de agua se ha obtenido por el método nuclear, se emplean las lecturas del aparato para calcular la densidad seca, así:

$$\rho_d = \rho - M_m \quad [164.5]$$

10.3.1.2 Si el contenido de agua se determinó a partir de una muestra de suelo como se indicó en el numeral 9.6.3, se deben seguir los procedimientos descritos en la norma de ensayo que se haya aplicado (INV E-122, INV E-135 o INV E-150).

10.3.1.3 Con el contenido de agua obtenido según el numeral 10.3.1.2, la densidad seca se calcula con la expresión:

$$\rho_d = \frac{\rho}{100 + w} \times 100 \quad [164.6]$$

10.3.1.4 La densidad seca se informa con aproximación a 1 kg/m^3 (0.1 lb/pe^3).

10.4 *Determinación del porcentaje de compactación:*

10.4.1 Si se quiere expresar la densidad seca como porcentaje de una densidad máxima de laboratorio como, por ejemplo, de la obtenida según las normas INV E-141 o INV E-142, basta dividir la primera por la segunda y multiplicar por 100. Siempre que se requiera efectuar correcciones por la presencia de sobretamaños, ellas se deberán realizar de conformidad con la norma INV E-143.

11 INFORME

11.1 Los registros de campo deben incluir, como mínimo:

11.1.1 Número o identificación del ensayo.

11.1.2 Identificación del sitio de prueba.

11.1.3 Descripción visual del material ensayado.

11.1.4 Número de la capa ensayada o elevación o profundidad.

11.1.5 Nombre del operador.

11.1.6 Marca, modelo y serial del dispositivo de prueba.

11.1.7 Procedimiento de ensayo (A o B).

11.1.8 Datos de normalización y ajuste en la fecha del ensayo.

11.1.9 Correcciones hechas a los valores reportados y motivos para hacerlas (por ejemplo, presencia de sobretamaños).

11.1.10 Densidad máxima de laboratorio en kg/m^3 o lb/pie^3 .

11.1.11 Densidad seca en kg/m^3 o lb/pie^3 .

11.1.12 Densidad húmeda en kg/m^3 o lb/pie^3 .

11.1.13 Contenido de agua en %.

11.1.14 Porcentaje de compactación.

11.2 Informe final (información mínima requerida):

11.2.1 Número del ensayo.

11.2.2 Número de serie del aparato.

11.2.3 Localización del ensayo.

11.2.4 Número de la capa ensayada o elevación o profundidad.

- 11.2.5 Contenido de agua en %.
- 11.2.6 Densidad máxima de laboratorio en kg/m^3 o lb/pe^3 .
- 11.2.7 Densidad seca en kg/m^3 o lb/pe^3 .
- 11.2.8 Porcentaje de compactación.
- 11.2.9 Nombre del operador.

12 PRECISIÓN Y SESGO

12.1 *Precisión:*

- 12.1.1 *Precisión en la densidad húmeda* – Los criterios para juzgar la aceptabilidad de los resultados de la densidad húmeda obtenidos mediante este método de ensayo, se muestran en la Tabla 164 - 1. Los valores se basan en un estudio entre laboratorios en el cual se seleccionaron cinco sitios de ensayo, obteniéndose las densidades húmedas mostradas en la segunda columna. Los valores se obtuvieron empleando ocho aparatos y ocho operarios. La densidad de cada sitio se midió tres veces con cada aparato.
- 12.1.2 *Precisión en la masa de agua por unidad de volumen* – Los criterios para juzgar la aceptabilidad de los resultados de la masa de agua por unidad de volumen obtenidos mediante este método de ensayo, se muestran en la Tabla 164 - 2. Los valores se basan en un estudio entre laboratorios en el cual se seleccionaron cinco sitios de ensayo, obteniéndose las masas de agua por unidad de volumen mostradas en la segunda columna. Los valores se obtuvieron empleando ocho aparatos y ocho operarios. La masa de agua por unidad de volumen de cada sitio se midió tres veces con cada aparato.
- 12.1.3 *Precisión en el contenido de agua (humedad)* – Los criterios para juzgar la aceptabilidad de los resultados de contenido de agua obtenidos mediante este método de ensayo, se muestran en la Tabla 164 - 3. Los valores se basan en un estudio entre laboratorios en el cual se seleccionaron cinco sitios de ensayo, obteniéndose los contenidos de agua mostrados en la segunda columna. Los valores se obtuvieron empleando ocho aparatos y ocho operarios. El contenido de agua de cada sitio se midió tres veces con cada aparato.

12.2 Sesgo – No hay valores de referencia para estos métodos de ensayo; por lo tanto, no se puede determinar el sesgo.

Tabla 164 - 1. Resultados del análisis estadístico (Densidad húmeda)

| MATERIAL | PROMEDIO kg/m ³ (lb/pie ³) | REPETIBILIDAD (DESV. ESTÁNDAR) kg/m ³ (lb/pie ³) | REPRODUCIBILIDAD (DESV. ESTÁNDAR) kg/m ³ (lb/pie ³) | 95% REPETIBILIDAD LÍMITE EN LA DIFERENCIA ENTRE 2 RESULTADOS kg/m ³ (lb/pie ³) | 95% REPRODUCIBILIDAD LÍMITE EN LA DIFERENCIA ENTRE 2 RESULTADOS kg/m ³ (lb/pie ³) |
|----------------------------|--|--|---|--|---|
| Transmisión directa | | | | | |
| ML | 2084 (130.1) | 7.4 (0.46) | 12.3 (0.77) | 21 (1.3) | 34 (2.1) |
| CL | 1837 (114.7) | 5.4 (0.34) | 10.6 (0.66) | 15 (0.9) | 30 (1.9) |
| SP | 1937 (120.9) | 4.2 (0.26) | 11.0 (0.68) | 12 (0.7) | 31 (1.9) |
| Retrodispersión | | | | | |
| ML | 1997 (124.6) | 16.0 (1.00) | 32.0 (2.00) | 45 (2.8) | 90 (5.6) |

Tabla 164 - 2. Resultados del análisis estadístico (Masa de agua por unidad de volumen)

| MATERIAL | PROMEDIO kg/m ³ (lb/pie ³) | REPETIBILIDAD (DESV. ESTÁNDAR) kg/m ³ (lb/pie ³) | REPRODUCIBILIDAD (DESV. ESTÁNDAR) kg/m ³ (lb/pie ³) | 95% REPETIBILIDAD LÍMITE EN LA DIFERENCIA ENTRE 2 RESULTADOS kg/m ³ (lb/pie ³) | 95% REPRODUCIBILIDAD LÍMITE EN LA DIFERENCIA ENTRE 2 RESULTADOS kg/m ³ (lb/pie ³) |
|----------|---|--|---|--|---|
| ML | 313 (19.6) | 5.7 (0.36) | 8.1 (0.50) | 16 (1.0) | 23 (1.4) |
| CL | 193 (12.1) | 6.1 (0.38) | 8.5 (0.53) | 17 (1.1) | 24 (1.5) |
| SP | 320 (20.0) | 4.3 (0.27) | 10.3 (0.64) | 12 (0.7) | 19 (1.89) |

Tabla 164 - 3. Resultados del análisis estadístico (Contenido de agua, %)

| MATERIAL | PROMEDIO % | REPETIBILIDAD (DESV. ESTÁNDAR) % | REPRODUCIBILIDAD (DESV. ESTÁNDAR) % | 95% REPETIBILIDAD LÍMITE EN LA DIFERENCIA ENTRE 2 RESULTADOS % | 95% REPRODUCIBILIDAD LÍMITE EN LA DIFERENCIA ENTRE 2 RESULTADOS % |
|----------|---------------|--|---|---|--|
| ML | 17.7 | 0.39 | 0.59 | 1.1 | 1.7 |
| CL | 11.8 | 0.40 | 0.58 | 1.1 | 1.6 |
| SP | 19.8 | 0.32 | 0.51 | 0.9 | 2.3 |

13 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 6938 –10

ANEXO A (Aplicación obligatoria)

CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LA DENSIDAD HÚMEDA

A.1 *Calibración* – Los aparatos nucleares se deben calibrar inicialmente y después de reparaciones que afecten su geometría. Para encontrarse dentro de las tolerancias especificadas en los procedimientos descritos en el numeral A.2, se deben verificar las curvas o tablas de calibración o los factores de equivalencia, a periodos que no excedan de 12 meses. En cualquier instante en que las tolerancias no se cumplan, el aparato deberá ser calibrado para establecer nuevas curvas o tablas de calibración o factores de equivalencia. Si el propietario no establece un procedimiento de verificación, el aparato se deberá calibrar cada 12 meses o menos.

A.1.1 La respuesta de calibración del aparato debe ser de $\pm 16 \text{ kg/m}^3$ ($\pm 1.0 \text{ lb/pe}^3$) en el bloque de material estándar (referencia estándar) sobre el cual fue calibrado. Esta calibración puede ser hecha por el fabricante, el usuario, o un distribuidor independiente. La respuesta de los instrumentos nucleares está influenciada por la composición química de los materiales medidos. Esta respuesta debe ser tenida en

cuenta cuando se va a establecer la densidad del bloque estándar. El método de calibración usado debe ser capaz de generar una curva general que abarque el rango completo de densidad de los materiales que van a ser ensayados. La densidad de los bloques estándar se debe determinar de manera que la desviación estándar de los resultados de las medidas no exceda del 0.2 % de la densidad medida del bloque.

- A.1.2** Las densidades de los bloques usados para establecer o verificar la calibración se deben verificar o restablecer a períodos que no superen 5 años. Los valores de densidad de los bloques que sean susceptibles a cambios de densidad durante el transcurso del tiempo (suelo, concreto, roca sólida) se deben restablecer, cuando menos, cada 12 meses.

Nota A.1: Los cambios en las condiciones ambientales o en las localizaciones de los bloques usados para calibrar o verificar la calibración de los medidores nucleares, pueden afectar sus resultados. En consecuencia, se debe tratar de asegurar condiciones uniformes siempre que se realicen o verifiquen las calibraciones.

- A.1.3** En cada bloque de densidad se deben tomar suficientes datos para asegurar que la precisión de conteo del instrumento sea, al menos, la mitad de la precisión requerida para uso en el campo, asumiendo una medida de campo de un minuto de duración y una de cuatro minutos para la calibración, o una relación equivalente. Los datos pueden ser presentados en forma gráfica, tablas, coeficientes de ecuaciones, o almacenados en la celda de medición, para permitir la conversión de cuentas de velocidad a densidad del material.
- A.1.4** El método y los procedimientos de ensayo utilizados para establecer los datos del conteo de calibración deben ser los mismos que se usan para obtener los datos de conteo de campo.
- A.1.5** El tipo de material y la densidad real o la densidad asignada al bloque estándar usado para verificar la calibración del instrumento, se deben consignar como parte de la información de calibración. Si la densidad real o asignada del bloque varía con la profundidad de la medición, entonces los datos de densidad para cada profundidad medida deberán ser consignados como parte de la información de calibración.
- A.1.6** Los bloques de calibración deben ser lo suficientemente grandes para que la velocidad de conteo no cambie, si se alarga alguna de sus dimensiones.

Nota A.2: Dimensiones de aproximadamente 610 mm de largo por 430 mm de ancho han resultado satisfactorias. Para el método de retrodispersión, un espesor mínimo de 230 mm (9") resulta apropiado, mientras que para los de transmisión directa, el espesor debe ser, cuando menos, 50 mm (2") mayor que la máxima penetración prevista para la sonda. Se debe considerar una superficie mayor para los equipos del modo retrodispersión/colchón de aire. Para bloques con ancho o longitud menor que los indicados, se deben seguir las recomendaciones de su fabricante, para su adecuada instalación y uso. Los bloques que han demostrado ser más apropiados para la calibración son los de aluminio, magnesio, aluminio/magnesio, granito y piedra caliza. Estos bloques se han usado en combinación unos con otros y con otros bloques preparados, para producir una calibración precisa y confiable.

- A.2 Verificación** - El método utilizado para la verificación debe ser capaz de confirmar la exactitud de la curva general de calibración que representa el rango de densidad de los materiales que serán ensayados en el campo. El proceso de verificación y las tolerancias resultantes sobre las profundidades a las cuales se va usar el aparato, se deben anotar y documentar de manera formal. Si el proceso de verificación indica una variación más allá de los límites tolerados, se deberán establecer nuevas curvas, tablas o coeficientes de calibración.
- A.2.1** La respuesta del aparato en la verificación se debe encontrar en el entorno de $\pm 32 \text{ kg/m}^3$ ($\pm 2.0 \text{ lb/pie}^3$) sobre el bloque de densidad establecida, a cada profundidad de calibración.
- A.2.2** Usando el procedimiento descrito en los numerales C.1.1 o C.1.2 del Anexo C, se debe asegurar una precisión al menos igual a la mitad de la requerida para uso en el campo, asumiendo un uso de 1 minuto durante una medida de campo y un uso de 4 minutos durante la calibración, o una relación equivalente.
- A.2.3** La verificación de la calibración del aparato se puede realizar en los mismos bloques usados para la calibración, o en bloques especialmente preparados.
- A.2.4** Se pueden emplear bloques preparados de suelo, roca sólida, concreto y materiales de ingeniería, que tengan características de uniformidad reproducible, pero se debe tener cuidado para minimizar sus cambios de humedad y densidad durante el tiempo.
- A.2.5** Los valores de densidad de los bloques preparados se deben determinar de manera que la desviación estándar estimada de los resultados de las medidas no exceda de 5 % del valor de densidad medido.

- A.2.6** Los valores de densidad de los bloques preparados de suelo, roca sólida o concreto que tengan el potencial de sufrir modificaciones de densidad o humedad, se deben restablecer o verificar a intervalos que no excedan de 12 meses.
- A.2.7** El método usado para restablecer o verificar la densidad de los bloques se debe incluir como parte de los datos de verificación.
- A.2.8** Todos los densímetros nucleares de deben verificar o calibrar con una frecuencia mínima de 12 meses.

ANEXO B

(Aplicación obligatoria)

CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA

- B.1** *Calibración* – Los aparatos se deben calibrar inicialmente y después de reparaciones que afecten su geometría. Para encontrarse dentro de las tolerancias especificadas en los procedimientos descritos en el numeral B.2, se deben verificar las curvas o tablas de calibración o los factores de equivalencia, a períodos que no excedan de 12 meses. En cualquier instante en que las tolerancias no se cumplan, el aparato deberá ser calibrado para establecer nuevas curvas o tablas de calibración o factores de equivalencia. Si el propietario no establece un procedimiento de verificación, el aparato se deberá calibrar cada 12 meses o menos.
- B.1.1** La respuesta de calibración del medidor debe estar dentro de $\pm 16 \text{ kg/m}^3$ ($\pm 1 \text{ lb/pe}^3$) sobre el bloque en el cual se calibró el aparato. Esta calibración puede ser hecha por el fabricante del aparato, por el usuario o por un distribuidor independiente. El bloque usado para la calibración debe ser capaz de producir una curva general que cubra el rango total de los contenidos de agua de los materiales que serán ensayados en el terreno. La curva de calibración se puede establecer usando conteos y contenidos de agua de bloques estándar, información de una curva previa de fábrica, o a partir de datos históricos. Debido al efecto de la composición química, la calibración suministrada con el aparato por el fabricante puede no resultar aceptable para todos los materiales. Ella será exacta para la sílice y el agua; por lo tanto, la calibración se debe verificar y ajustar, de ser necesario, en acuerdo con lo indicado en el numeral B.2

- B.1.2** Se debe restablecer o verificar el contenido de agua de los bloques usados para calibrar o verificar las calibraciones, con la frecuencia que recomienden los fabricantes de dichos bloques. La humedad de los bloques preparados con materiales que tengan la posibilidad de cambiar su densidad o su humedad durante el tiempo, tales como suelo, concreto o roca sólida, se debe restablecer verificar a intervalos menores de 12 meses.
- B.1.3** Todos los bloques de calibración deben ser lo suficientemente grandes para no cambiar la velocidad de conteo observada, si se alarga alguna de sus dimensiones.

Nota B.1: Dimensiones de aproximadamente 610 mm de largo por 460 mm de ancho y por 360 mm de profundidad (aproximadamente 24" x 18" x 14") han sido satisfactorias. Para bloques con ancho o longitud menor que los indicados, se deben seguir las recomendaciones de su fabricante, para su adecuada instalación y uso.

- B.1.4** Se prepara un bloque homogéneo de materiales hidrogenados que tenga un contenido de agua equivalente, determinado por comparación (usando un instrumento nuclear) con una arena de sílice saturada estándar. Los bloques metálicos de magnesio y aluminio usados para la calibración de la densidad húmeda son adecuados como patrones de contenido de agua igual a cero. Para altas masas de agua por unidad de volumen del bloque, resulta conveniente un bloque de capas alternadas de aluminio o magnesio y polietileno.
- B.1.5** Se preparan recipientes de material compactado con un contenido de agua determinado por secado en el horno (norma INV E-122) y una densidad húmeda calculada a partir de la masa del material y de las dimensiones internas del recipiente. El contenido de agua se puede calcular como sigue:

$$M_m = \frac{\rho \times w}{100 + w} \quad [164.7]$$

Donde: M_m : Contenido de agua, kg/m^3 o lbm/pie^3 ;

w : Contenido de agua en porcentaje de masa seca;

ρ : Densidad húmeda (total), kg/m^3 o lb/pie^3 .

- B.1.6** Si ninguno de los bloques de calibración anteriores está disponible, el medidor nuclear se puede calibrar usando un mínimo de tres sitios de prueba, seleccionados en un área de un proyecto de compactación donde se haya colocado un material homogéneo con diferentes contenidos de agua. Los sitios de prueba deberán representar el rango de contenidos de agua sobre el cual se va a usar la calibración. Se deberán efectuar, al menos, tres réplicas de mediciones nucleares en cada sitio de ensayo. Se deberá verificar la densidad en cada punto, haciendo determinaciones con el equipo calibrado según los procedimientos descritos en esta norma, en acuerdo con las normas INV E-161 ó INV E-162. El contenido de agua de cada prueba de densidad se deberá determinar por medio de la norma INV E-122. El valor promedio de las lecturas de las réplicas se usa como valor del punto de calibración para cada sitio.
- B.2** *Verificación* – El método utilizado para la verificación debe ser capaz de confirmar la exactitud de la curva general de calibración que representa el rango de contenidos de agua de los materiales que serán ensayados en el campo. El proceso de verificación y las tolerancias resultantes obtenidas, se deben anotar y documentar de manera formal. Si el proceso de verificación indica una variación más allá de los límites tolerados, se deberán establecer nuevas curvas, tablas o coeficientes de calibración.
- B.2.1** Una calibración existente se verifica efectuando un número suficiente de conteos sobre uno o más bloques con un contenido de agua conocido, para asegurar la exactitud de la calibración en un rango de $\pm 16 \text{ kg/m}^3$ ($\pm 1 \text{ lb/pe}^3$). Los bloques para la medida del contenido de agua se deben preparar de acuerdo con lo indicado en los numerales B.1.4 y B.1.5.
- B.2.2** Se debe tomar un número suficiente de datos para asegurar una precisión al menos igual a la mitad de la requerida para uso en el campo, asumiendo un uso de 1 minuto durante una medida de campo y un uso de 4 minutos durante la calibración, o una relación equivalente.
- B.2.3** Para verificar la calibración, se pueden usar tanto los bloques de calibración utilizados para establecer los parámetros de calibración, como bloques preparados específicamente para esta labor.

- B.2.4** Se pueden usar bloques preparados que tengan características de uniformidad reproducible, pero se debe tener cuidado de minimizar sus cambios de humedad y densidad durante el tiempo.
- B.2.5** El contenido de agua asignado a los bloques usados para la verificación del instrumento se debe consignar como parte de los datos de verificación.
- B.2.6** Todos los medidores nucleares de deben verificar o calibrar con una frecuencia mínima de 12 meses.

ANEXO C (Aplicación obligatoria)

PRECISIÓN DEL APARATO

C.1 La precisión del conteo del aparato se define como el cambio en densidad o contenido de agua que se presenta debido a un cambio de la desviación estándar en el conteo, causado por el debilitamiento de la fuente radiactiva. Se deben anotar la densidad del material y el tiempo del conteo.

C.1.1 *Precisión del equipo – Método de la pendiente:*

C.1.1.1 La precisión del equipo (P) se determina a partir de la pendiente de la curva de calibración (S) y de la desviación estándar (σ) de las señales (rayos gamma o neutrones detectados) en cuentas por minutos (cpm), como sigue:

$$P = \frac{\sigma}{S} \quad [164.8]$$

Donde: P: Precisión;

σ : Desviación estándar, cpm;

S: Pendiente, cpm/kg/m³ (cpm/lbm/pie³).

Nota C1: Las cuentas desplegadas por el aparato deben tener una escala apropiada. Se debe contactar al fabricante para obtener un factor apropiado de pre-escala.

C.1.2 *Precisión del equipo – Método repetitivo:*

- C.1.2.1** Se determina la desviación estándar de un mínimo de 20 lecturas repetitivas de un minuto cada una (el aparato no se debe mover luego de ser asentado para el primer conteo). Esta desviación estándar es la precisión el aparato.

ANEXO D
(Aplicación obligatoria)**AJUSTES AL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL TERRENO**

- D.1** Se debe verificar la calibración, antes de realizar ensayos sobre materiales que sean marcadamente diferentes de aquellos utilizados en la obtención o ajuste de la calibración previa. La cantidad de agua se debe encontrar en un rango de ± 2 % del establecido como óptimo para la compactación de estos materiales. Se deberá determinar el contenido de agua, w . Se puede utilizar un horno microondas o apelar al calentamiento directo para secar los materiales que no sean sensibles a la combustión de materia orgánica, en adición al método contemplado en la norma INV E-122. Se recomienda realizar un mínimo de tres comparaciones y usar como factor de corrección el promedio de las diferencias observadas.
- D.2** Los recipientes con material compactado tomado del sitio se deberán preparar como se menciona en el numeral B.1.5 del Anexo B.
- D.3** Los sitios de ensayos o el material compactado se deben escoger de acuerdo con lo indicado en el numeral B.1.6 del Anexo B.
- D.4** El método y los procedimientos de ensayo usados para obtener los conteos para determinar el error, deben ser iguales a los que se emplearán para medir el contenido de agua del material que se va a ensayar.
- D.5** El valor medio de la diferencia entre el contenido de agua de las muestras de ensayo tomadas como se indica en los numerales B.1.5 y B.1.6 del Anexo B y los valores medidos con el aparato nuclear, se debe usar como un factor de corrección de las medidas tomadas en el campo. Muchos aparatos que utilizan un microprocesador pueden tener involucrado un factor de corrección que es establecido por los valores relativos del contenido de agua como un porcentaje de la densidad seca, eliminando así la necesidad de determinar la diferencia en las unidades de masa de agua.