

ENSAYO NORMAL DE PENETRACIÓN (SPT) Y MUESTREO DE SUELOS CON TUBO PARTIDO

INV E – 111 – 13

1 OBJETO

- 1.1 Este método describe el procedimiento conocido como Ensayo Normal de Penetración (*Standard Penetration Test* – SPT), el cual consiste en conducir un muestreador de tubo partido dentro del suelo para obtener muestras alteradas representativas con fines de identificación, y medir la resistencia del suelo a la penetración del muestreador. En la norma INVE-109 se describe otro método para hincar un tomamuestras de tubo partido y obtener muestras representativas de suelo, pero la energía del martillo no está normalizada.
- 1.2 La norma ASTM D 6066 presenta una guía para determinar la resistencia a la penetración normalizada de arenas, ajustando la energía correspondiente al valor N a un nivel de energía constante, para evaluar el potencial de licuación.
- 1.3 Los resultados de los ensayos y la información de identificación se emplean para estimar las condiciones del subsuelo en el diseño de cimentaciones.
- 1.4 Los ensayos de resistencia a la penetración se desarrollan, generalmente, a intervalos de 1.5 m (5 pies), o cuando se detectan cambios significativos durante la perforación.
- 1.5 Este método de ensayo se emplea en suelos no litificados y en aquellos cuyo tamaño máximo de partícula es menor que la mitad del diámetro del tomamuestras.
- 1.6 Este método de ensayo involucra el uso de equipos de perforación por rotación (descritos en las normas ASTM D 5783 y D 6151). Se pueden emplear otros procedimientos de perforación y muestreo que pueden resultar más apropiados (normas ASTM D 6286 y D 6169). Esta norma no cubre la hincas manual o el muestreo superficial sin perforaciones. Las investigaciones del subsuelo se registran y reportan de acuerdo con la norma ASTM D 5434. Las muestras se deben conservar y transportar de acuerdo con el registro del grupo B de la norma INV E-103. Las muestras se deben identificar por nombre y símbolo de grupo, de acuerdo con la norma INV E-102.
- 1.7 Esta norma reemplaza la norma INV E-111-07.

2 TERMINOLOGÍA

2.1 Los términos específicos aplicables a esta norma son los siguientes:

2.1.1 *Malacate de rotación* – Cilindro o tambor de rotación, alrededor del cual el operario enrolla un cable para elevar y dejar caer el martillo, halando y aflojando sucesivamente el cable envuelto.

2.1.2 *Varillas o tubos de perforación* – Varillas o tubos empleados para transmitir la fuerza y el torque a la broca de perforación, mientras se efectúa el sondeo.

2.1.3 *Valor de N* – Representación numérica de la resistencia a la penetración de un tomamuestras del tipo tubo partido dentro del suelo. El valor de N, expresado en golpes por pie, es igual a la suma del número de golpes requeridos para hincar el tubo muestreador dentro del intervalo de profundidad de 6 a 18" (0.15 a 0.45 m). Ver numeral 6.3.

2.1.4 *Ensayo de penetración estándar, SPT* – Ensayo que se realiza en el fondo de una perforación, el cual consiste en hincar un tomamuestras de tubo partido una distancia de 1.0 pie (0.30 m) en dos intervalos iguales de 6" (0.15 m), inmediatamente después de haberlo hecho en un primer intervalo de asentamiento de 0.15 m (6"). El muestreador tiene un diámetro interno de 38.1 mm (1½") o 34.9 mm (1 3/8"), y el martillo empleado para la hinca tiene un peso aproximado de 623 N (140 lbf) y se deja caer libremente desde una altura de 0.76 m ± 0.03 m (30 ± 1.0").

2.1.5 *Yunque o cabezal* – Porción del martinete que es golpeada por el martillo y a través de la cual se transmite la energía a la tubería de perforación.

2.1.6 *Martinete* – Equipo que incluye un martillo o pesa, un yunque, la guía para la caída del martillo, el sistema de acople a las varillas o tubos de perforación, y los accesorios del sistema de izado y descarga del martillo.

2.1.7 *Martillo o pesa* – Parte del martinete, consistente en una pesa de 623 ± 9 N (140 ± 2 lbf) que produce el impacto, la cual se levanta y suelta sucesivamente, generando la energía necesaria para efectuar la penetración y el muestreo.

- 2.1.8** *Sistema de caída del martillo* – La parte del martinete mediante la cual el operario o un sistema automático logra levantar y descargar el martillo para producir el golpe.
- 2.1.9** *Guía para la caída del martillo* – Aquella parte del martinete empleada para dirigir la caída del martillo.
- 2.1.10** *Número de vueltas del cable* – Ángulo de contacto total entre el cable y el malacate de rotación, al comienzo del aflojamiento del cable por el operario, para dejar caer el martillo, dividido por 360° (Ver Figura 111 - 1).
- 2.1.11** *Tubos de muestreo* – Tubos que conectan el martinete con el muestreador. Los tubos de perforación se usan con frecuencia con este propósito.

3 IMPORTANCIA Y USO

- 3.1** Mediante este método se obtienen muestras alteradas o remoldeadas de suelo, apropiadas para determinar el contenido de humedad, realizar identificación y clasificación del suelo (normas INV E-181 e INV E-102), así como otro tipo de ensayos de laboratorio recomendados para muestras que han sufrido una gran deformación por corte en el momento de su extracción (normas INV E-128, INV E-122 e INV E-123). No es aconsejable efectuar este ensayo sobre depósitos de suelo que contengan gravas, guijarros o cantos rodados ya que generalmente se obtiene rechazo y, además, se puede dañar el equipo.
- 3.2** Las muestras obtenidas por este método son alteradas y sirven para realizar ensayos de contenido de humedad e identificación del suelo en laboratorio. No se deben usar para definir propiedades geomecánicas del suelo mediante ensayos avanzados de laboratorio, pues el proceso de introducción del muestreador altera el suelo y modifica sus propiedades ingenieriles. Para tal efecto, es mejor emplear en suelos blandos las muestras extraídas mediante el tubo de pared delgada (Norma INV E-105) que son mucho menos remoldeadas. En suelos duros, es preferible extraer núcleos que realizar ensayos de SPT, a menos que se trate de un suelo cementado, el cual se podría deshacer por acción del agua durante la extracción.
- 3.3** El método SPT se usa ampliamente en la mayoría de proyectos de exploración geotécnica. La literatura técnica presenta correlaciones, tanto locales como de

uso general, entre el número de golpes N y las características de los suelos del lugar o los comportamientos de terraplenes y cimentaciones diseñadas empleando estos datos. Para evaluar el potencial de licuación de arenas durante un sismo, se debe normalizar el valor N a un nivel de presión de sobrecarga estándar. En la norma ASTM D 6066 se presentan algunos métodos para convertir los valores N medidos, en registros de resistencia normalizada de arenas con respecto a la penetración de un tomamuestras estándar hincado con una energía normalizada. La resistencia a la penetración se ajusta a una relación de energía de 60 % de la varilla de perforación, usando un sistema de martillo con una entrega de energía estimada o midiendo la energía de las ondas de esfuerzo sobre las tuberías de perforación, empleando el método descrito en la norma ASTM D 4633.

Nota 1: La confiabilidad de los datos e interpretaciones derivadas de este ensayo, depende de la competencia del personal que lo aplica y de la idoneidad del equipo utilizado.

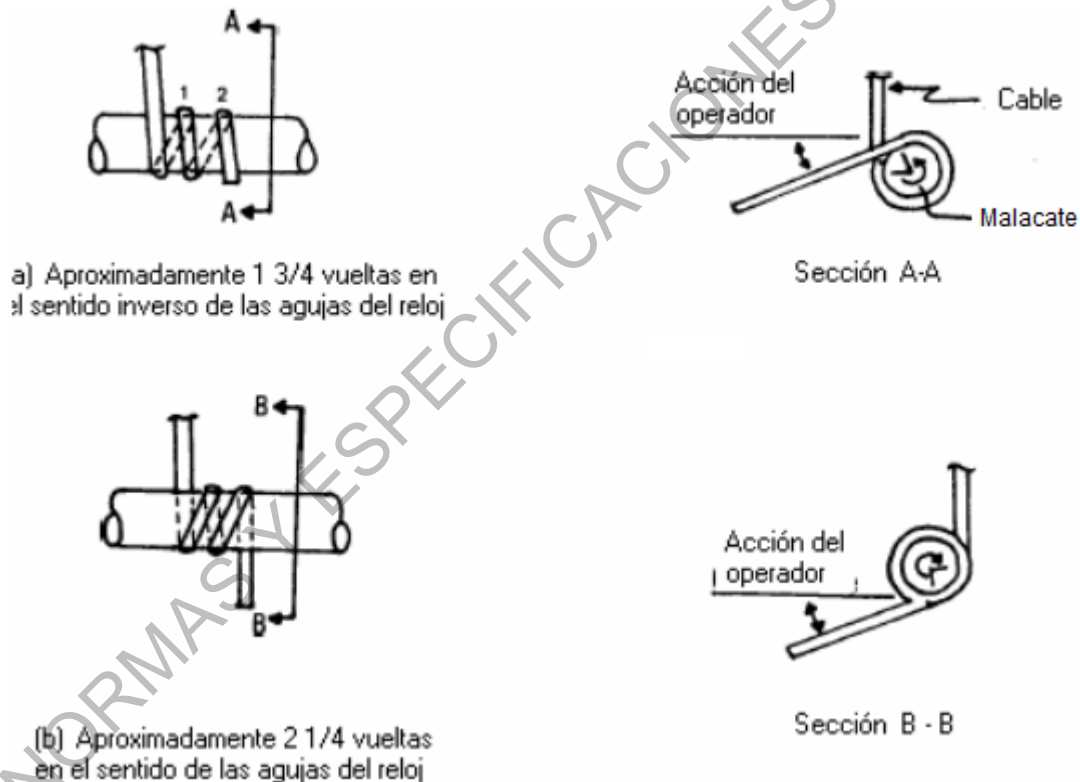


Figura 111 - 1. Definiciones del número de vueltas del cable y del ángulo para (a) Rotación del malacate en sentido contrario a las manecillas del reloj y (b) Rotación del malacate en el sentido de las manecillas del reloj.

4 EQUIPO

- 4.1** *Equipo de perforación* – Se permite el empleo de cualquier equipo de perforación que realice simultáneamente con el muestreo un orificio adecuado antes de la inserción del tomamuestras y que no altere el suelo antes de la penetración del tubo muestreador. Este equipo debe contar con los siguientes elementos:
- 4.1.1** *Brocas de arrastre (drag bits), tipo cincel y tipo cola de pescado* – Con diámetros entre 57 mm (2 ¼") y 162 mm (6 ½"), que se pueden usar en conjunto con métodos de perforación rotatoria con y sin revestimiento. Para evitar la alteración del subsuelo, no se permiten brocas de descarga de fondo, sino solamente brocas de descarga lateral.
- 4.1.2** *Brocas tricono* – Con diámetros entre 57 mm (2 ¼") y 162 mm (6 ½"); se pueden usar en conjunto con métodos de perforación rotatoria con y sin revestimiento, siempre que se desvíe la descarga del fluido de perforación.
- 4.1.3** *Barrenas helicoidales de vástago hueco* – Con o sin una broca ensamblada en el centro, las cuales se emplean para efectuar el sondeo. El diámetro interior de las barrenas de vástago hueco deberá ser menor de 165 mm (6 ½") y mayor de 57 mm (2 ¼").
- 4.1.4** *Barrenas tipo balde y barrenas helicoidales continuas y sólidas* – Entre 57 mm (2 ¼") y 165 mm (6 ½") de diámetro; se pueden emplear siempre y cuando las paredes de la perforación no se derrumben durante el muestreo.
- 4.2** *Tuberías para muestreo* – Se pueden emplear tubos de perforación de acero de junta lisa para conectar el tomamuestras de tubo partido al martinete. La rigidez del tubo de muestreo (momento de inercia) deberá ser igual o mayor que la de una varilla de perforación de pared paralela tipo "A", el cual corresponde a un tubo de acero con diámetro exterior de 41.3 mm (1-5/8") y un diámetro interior de 28.5 mm (1-1/8").
- 4.3** *Tomamuestras de tubo partido (muestreador de media caña estándar)* – Las dimensiones típicas se muestran en la Figura 111 - 2. Tiene un diámetro exterior de 50.8 mm (2"). El diámetro interior (dimensión D en la Figura 111 - 2) puede ser 38.1 mm (1 ½") o 34.9 mm (1 3/8"). El tomamuestras de 38.1 mm (1 ½") puede llevar un revestimiento interior de calibre 16. La zapata de hinca

debe ser de acero templado y se debe remplazar cuando presente abolladuras o distorsiones. El extremo de esta zapata puede ser ligeramente redondeado. El tomamuestras posee una válvula de retención de bola o esfera y aberturas de ventilación. Se pueden usar canastillas plásticas o metálicas para retener las muestras de suelo.

Nota 2: La teoría y la práctica sugieren que los valores de N pueden diferir entre 10 % y 30 % cuando se usan muestreadores de diámetro interior constante en comparación con muestreadores de pared alterada. Para corregir el valor N por el uso de este tipo de muestreadores, se debe consultar la norma ASTM D 6066. El uso de este tipo de muestreadores permite emplear retenedores si son necesarios, reduce la fricción interna y mejora la recuperación. Sin embargo, en muchos países se continúa el uso, aceptado dentro de esta norma, del tomamuestras de diámetro interno constante.

4.4 Martinete:

4.4.1 Martillo y yunque – El martillo deberá pesar 623 ± 9 N (140 ± 2 lbf) y deberá ser una masa metálica sólida y rígida. El martillo deberá golpear el yunque directamente cuando cae. Se deberá emplear una guía para permitir la caída libre. Los martillos empleados con el método de malacate y cable deberán tener una capacidad libre de levantamiento de, por lo menos, 100 mm (4"). Por razones de seguridad, se recomienda el empleo de un sistema de martillo con yunque interno (Ver Figura 111 - 3). La masa total del conjunto que soporta el martillo sobre la tubería de perforación no debe ser superior a 113 ± 5 kg (250 ± 10 lbfm).

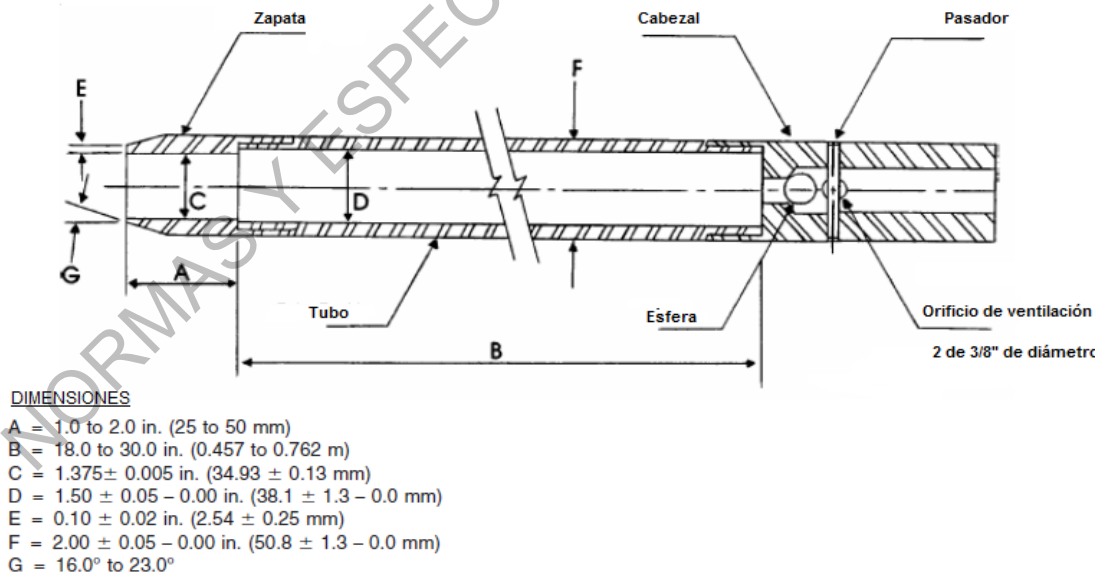


Figura 111 - 2. Tomamuestras de tubo partido

Nota 3: Se sugiere que la guía del martillo esté marcada de manera permanente, para que el operario o el inspector puedan controlar mejor la altura de caída de éste.

- 4.4.2** *Sistema de caída del martillo* – Se pueden emplear sistemas como el de malacate-cable, de disparo, o sistemas automáticos o semiautomáticos de caída del martillo, con la condición de que los aparatos de izado no provoquen la penetración del tomamuestras en el momento del reenganche y levantamiento del martillo.
- 4.5** *Equipo accesorio* – Se deben tener en el sitio accesorios tales como etiquetas, recipientes para muestras, hojas para datos y dispositivos para medir el nivel freático, de acuerdo con las exigencias del proyecto.

5 PROCEDIMIENTO DE PERFORACIÓN

- 5.1** La perforación debe avanzar por incrementos, de manera que permita el muestreo intermitente o continuo. Generalmente, los intervalos y profundidades de los ensayos se definen con anticipación. El intervalo típico es de 1.5 m (5 pies) o menos en estratos homogéneos, con toma de muestra adicional en cada cambio de estrato. La profundidad de la perforación de debe anotar con una aproximación de 0.05 m (o 0.1 pie).
- 5.2** Se acepta cualquier procedimiento de perforación que proporcione un agujero limpio y estable antes de insertar el muestreador y que garantice que el ensayo de penetración se efectúa sobre suelos esencialmente inalterados. Para escoger el método de perforación es importante analizar previamente las condiciones sub-superficiales esperadas. Los siguientes procedimientos se consideran aceptables:
- 5.2.1** Perforación por rotación a pozo abierto.
 - 5.2.2** Perforación con barrenas helicoidales de vástago hueco.
 - 5.2.3** Método de perforación con lavado.
 - 5.2.4** Perforación con barrenas helicoidales macizas.
- 5.3** Algunos métodos de perforación producen huecos inaceptables. Está prohibido emplear el proceso de inyección a través de un muestreador de tubo abierto con posterior toma de suelos, cuando la perforación se encuentra al nivel de muestreo. El método de barrena helicoidal maciza no se permite en perforaciones bajo el nivel freático o en estratos confinados de suelo no cohesivo con presión artésiana. El revestimiento no deberá llegar más allá de la profundidad de muestreo, antes de que éste se realice. Está prohibido el uso

de brocas con descarga de fondo. No se debe avanzar la perforación para la siguiente inserción del tomamuestras, sólo por medio del muestreo previo con el muestreador SPT.

- 5.4** El nivel del fluido de perforación dentro del orificio o la barrena hueca se debe mantener por encima, o al menos al mismo nivel, del nivel freático del terreno durante la perforación, la remoción de la tubería y el muestreo.

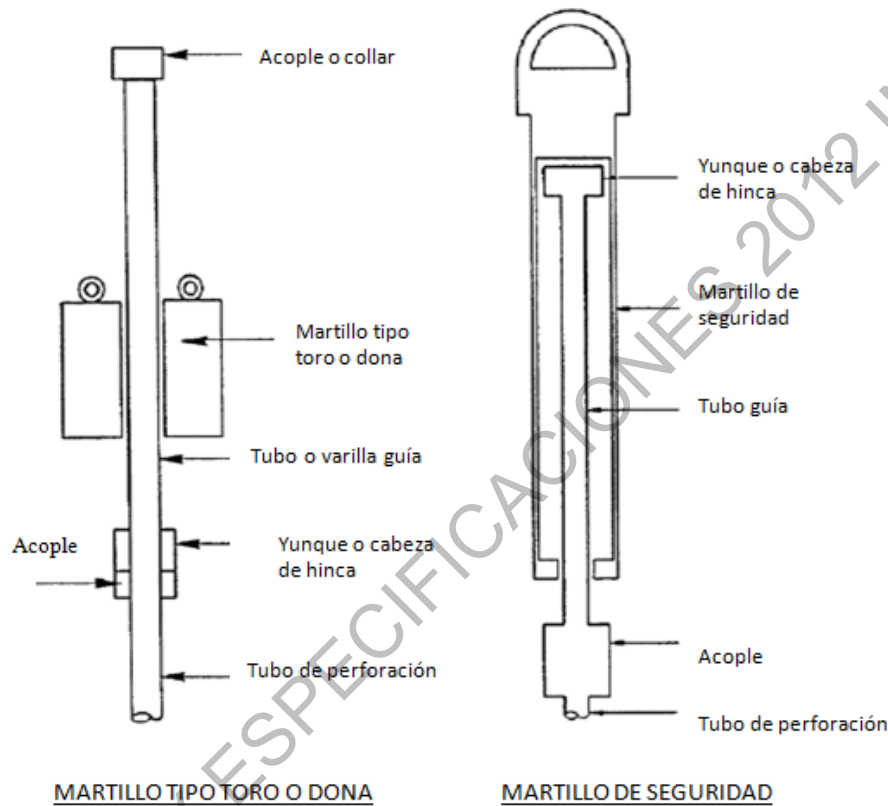


Figura 111 - 3. Tipos de martillos

6 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO Y ENSAYO

- 6.1** Cuando se alcanza la profundidad deseada para el muestreo, se limpia el fondo de la perforación retirando los residuos o detritos de la misma y se registra la profundidad de limpieza con una aproximación de 0.05 m (o 0.1 pie). Para efectuar el ensayo se sigue el siguiente procedimiento:

- 6.1.1** Se conecta el tomamuestras de tubo partido a la tubería de perforación y se baja suavemente dentro del hueco. No se debe

permitir que el tubo muestreador caiga dentro del suelo que va a ser ensayado.

- 6.1.2** Se coloca el martillo en posición y se instala el yunque en la parte superior de la tubería de muestreo. Esto se puede hacer antes de bajar la tubería y el tomamuestras.
 - 6.1.3** Se dejan descansar suavemente el muestreador, la tubería, el yunque y el peso de hinca sobre el fondo de la perforación. Se anota la profundidad de inicio con una aproximación de 0.05 m (o 0.1 pie). Se compara esta profundidad con la de limpieza hallada en el numeral 6.1. Cuando los residuos encontrados en el fondo de la perforación son excesivos, ésta se debe volver a limpiar previo retiro del tomamuestras y de la tubería.
 - 6.1.4** Se marcan los tubos de perforación en tres incrementos sucesivos de 0.15 m (6"), de manera que se pueda observar fácilmente el avance del muestreador bajo el impacto del martillo para cada incremento.
- 6.2** Se hinca el tomamuestras a golpes del martillo de 623 N (140 lbf) y se cuenta el número de golpes aplicados en cada incremento de 0.15 m (6"), hasta que se presente una de las siguientes condiciones:
- 6.2.1** Que se haya aplicado un total de 50 golpes en cualquiera de los tres incrementos de 0.15 m (6") descritos en el numeral 6.1.4.
 - 6.2.2** Que se haya aplicado un total de 100 golpes.
 - 6.2.3** Que no se observe avance del tomamuestras durante la aplicación de 10 golpes sucesivos del martillo.
 - 6.2.4** Que el tubo muestreador avance los tres incrementos completos [0.45 m (18")], sin que se haya presentado ninguna de las situaciones descritas anteriormente.
 - 6.2.5** Si el muestreador se hunde bajo el peso del martillo, el peso de la tubería o de ambos, se registra la longitud recorrida con aproximación de 0.05 m (o 0.1 pie), y se continúa hincando el muestreador a través del tramo que queda de ese intervalo. Si se hunde el intervalo completo, se detiene la perforación, se retiran el tomamuestras y la tubería de muestreo y se avanza la perforación a través del suelo muy blando o suelto hasta la siguiente profundidad de muestreo

programada. En este caso, se registra el valor de N como el peso del martillo, el peso de la tubería o ambos.

- 6.3** Se anota el número de golpes requeridos para avanzar el muestreador cada 0.15 m (6") de penetración o fracción. Se considera que los primeros 0.15 m (6") corresponden a la acomodación del equipo. Por tanto, la suma del número de golpes requeridos para el segundo y tercer intervalo de 0.15 m (6") de penetración, se llama la "resistencia a la penetración normal" o "valor N". Si el tomamuestras se hinca menos de 0.45 m (18"), como se plantea en los casos 6.2.1, 6.2.2 y 6.2.3, se reporta en el registro de la perforación el número de golpes correspondiente a cada incremento de 0.15 m (6") y a cada incremento parcial. Para los incrementos parciales, se informan la penetración conseguida, con una aproximación de 25 mm (1"), y el número de golpes correspondiente. Si el muestreador penetra el suelo bajo el simple peso estático de la tubería de perforación o bajo el peso de ésta más el peso estático del martillo, se deberá anotar esta información en el registro de la perforación.
- 6.4** La elevación y caída del martillo de 623 N (140 lbf), se efectúa mediante cualquiera de los siguientes métodos:
- 6.4.1** *Método A* – Se emplea un sistema de caída de desenganche, semiautomático o automático, que levanta el martillo de 623 N (140 lbf) y lo deja caer 0.76 ± 0.03 m (30 ± 1.0 ") sin ningún obstáculo. La altura de caída en estos sistemas se debe verificar diariamente y a la menor indicación de variaciones en su comportamiento. En la operación de los martillos automáticos se deben atender estrictamente los manuales de operación.
- 6.4.2** *Método B* – Se usa un malacate o cilindro de rotación para halar un cable atado al martillo. Cuando se usa el método del cable con malacate o cilindro de rotación, el sistema y la operación deberán cumplir con las siguientes condiciones:
- 6.4.2.1** El cilindro de rotación deberá estar esencialmente libre de óxido, aceite o grasa y tener un diámetro entre 150 y 250 mm (6 y 10").
- 6.4.2.2** El malacate se debe operar a una velocidad mínima de 100 rpm.
- 6.4.2.3** Generalmente, se usan 1.75 o 2.25 vueltas de cable sobre el malacate, dependiendo de si éste sale de la parte superior

(1.75 vueltas para rotación contraria a las manecillas del reloj) o de la parte inferior (2.25 vueltas para rotación en el sentido de la manecillas del reloj) del cilindro de rotación durante el ensayo de penetración (Ver Figura 111 - 1). Se sabe y acepta, que más de 2.75 vueltas de cable impiden la caída adecuada del martillo y no se deberán emplear para efectuar el ensayo. El cable del malacate debe ser firme y estar relativamente seco y limpio y se deberá remplazar cuando se encuentre desgastado, grasoso, flácido o quemado.

- 6.4.2.4** El operador deberá levantar y dejar caer el martillo desde una altura de 0.76 ± 0.03 m ($30 \pm 1.0''$) en cada golpe. La operación de halar y soltar el cable se efectúa rítmicamente, sin detenerlo o inmovilizarlo en la parte superior durante la carrera.

Nota 4: Si la altura de caída del martillo es diferente de 0.76 ± 0.03 m ($30 \pm 1.0''$), se debe registrar en el informe la altura real de caída. La norma ASTM D 4633 proporciona datos sobre las mediciones de energía para alturas de caída variables y la norma ASTM D 6066 provee información para ajustar el valor de N a un nivel de energía constante (60 % del teórico, N60).

- 6.5** Se saca el muestreador a la superficie y se abre. Se registra el porcentaje de recuperación, con una aproximación del 1% o la longitud de la muestra recuperada con una aproximación de 0.05 m (o 0.1pie). Se describe la muestra de suelo extraída de acuerdo con la norma INV E-102; se coloca luego una o más porciones representativas de la muestra en frascos o recipientes sellados, sin apisonar o distorsionar cualquier estratificación aparente. Se sella cada recipiente para evitar la evaporación de la humedad del suelo. Se fijan etiquetas a los recipientes con el nombre de la obra, el número de la perforación, la profundidad de la muestra, y el número de golpes por cada 0.15 m (6"). Se protegen las muestras contra cambios extremos de temperatura. Si se nota un cambio de suelo dentro del muestreador, se debe emplear un frasco para cada estrato y se anota su localización dentro del tomamuestras. La conservación y el transporte de las muestras se realizan de acuerdo con la norma INV E-103, usando el grupo B.

7 INFORME

- 7.1** La información de la perforación se registra en campo e incluye:

- 7.1.1** Nombre y localización de la obra.

- 7.1.2** Nombres de los integrantes del grupo perforador.
 - 7.1.3** Tipo y marca del equipo de perforación.
 - 7.1.4** Condiciones meteorológicas.
 - 7.1.5** Fechas y horas de iniciación y finalización del sondeo.
 - 7.1.6** Número de la perforación y su localización (estación y coordenadas o distancias a algún eje de referencia).
 - 7.1.7** Cota de la perforación.
 - 7.1.8** Método de avance y limpieza de la perforación.
 - 7.1.9** Método usado para mantener abierta la perforación.
 - 7.1.10** Profundidad del nivel freático y profundidad a la cual se reportan pérdidas del fluido de perforación. Fechas y horas de estas lecturas.
 - 7.1.11** Localización de los cambios de estratos.
 - 7.1.12** Dimensiones del revestimiento, profundidad de la parte revestida de la perforación (aproximación de 0.05 m).
 - 7.1.13** Equipo y método de hincado del muestreador, A o B.
 - 7.1.14** Tipo de muestreador, su longitud y diámetro interior. Se debe aclarar si se usó canasta retenedora o no.
 - 7.1.15** Dimensiones, tipo y longitud de la tubería de muestreo.
 - 7.1.16** Observaciones.
- 7.2** El informe correspondiente a cada muestra incluye:
- 7.2.1** Profundidad de la parte superior de la muestra, con aproximación a los 0.05 m (o 0.1 pie), y número de la muestra.
 - 7.2.2** Descripción del suelo.
 - 7.2.3** Cambios de estratos dentro de la muestra.

7.2.4 Penetración del muestreador y longitudes recuperadas. Aproximación de 0.05 m (o 0.1 pie).

7.2.5 Número de golpes para cada 0.15 m (6") o incremento parcial.

8 PRECISIÓN Y SESGO

8.1 *Precisión* – Los datos sobre precisión de este ensayo no se presentan, debido a la naturaleza de esta prueba. Es poco factible, además de costoso, disponer de 10 o más empresas participando en un programa de ensayos in situ en un mismo lugar.

8.1.1 Los conocimientos actuales sobre precisión, basados en datos suministrados por usuarios de este método, indican que:

8.1.1.1 Se han observado variaciones en valores N de 100 % o más, cuando se emplean diferentes aparatos y perforadores, incluso en perforaciones adyacentes dentro de la misma formación de suelo. La opinión actual, basada en la experiencia en el campo, es que al usar el mismo aparato y el mismo perforador, los valores N en el mismo suelo se pueden reproducir con un coeficiente de variación cercano a 10 %.

8.1.1.2 El empleo de elementos defectuosos como, por ejemplo, un yunque extremadamente grande o dañado, un malacate oxidado y/o de baja velocidad, un cable viejo y grasiento o unas poleas pobremente lubricadas o pesadas, puede contribuir de manera significativa a generar diferencias en los valores N obtenidos entre parejas de sistemas operativo-equipos.

8.2 *Sesgo* – No hay un valor aceptado como referencia para este método de ensayo; por lo tanto, no se puede determinar el sesgo.

9 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 1586–11