

---

## Geotecnia — Ensayo de Penetración Estándar

*Geotechnics – Standard Penetration Test*

ICS 93.020



## DOCUMENTO PROTEGIDO POR COPYRIGHT

© INN 2014

Derechos de autor:

La presente Norma Chilena se encuentra protegida por derechos de autor o copyright, por lo cual, no puede ser reproducida o utilizada en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico o mecánico, sin permiso escrito del INN. La publicación en Internet se encuentra prohibida y penada por la ley.

Se deja expresa constancia que en caso de adquirir algún documento en formato impreso, éste no puede ser copiado (fotocopia, digitalización o similares) en cualquier forma. Bajo ninguna circunstancia puede ser revendida. Asimismo, y sin perjuicio de lo indicado en el párrafo anterior, los documentos adquiridos en formato .pdf, tiene autorizada sólo una impresión por archivo, para uso personal del Cliente. El Cliente ha comprado una sola licencia de usuario para guardar este archivo en su computador personal. El uso compartido de estos archivos está prohibido, sea que se materialice a través de envíos o transferencias por correo electrónico, copia en CD, publicación en Intranet o Internet y similares.

Si tiene alguna dificultad en relación con las condiciones antes citadas, o si usted tiene alguna pregunta con respecto a los derechos de autor, por favor contacte la siguiente dirección:

Instituto Nacional de Normalización - INN  
Matías Cousiño 64, piso 6 • Santiago de Chile  
Tel. + 56 2 445 88 00  
Fax + 56 2 441 04 29  
Correo Electrónico [info@inn.cl](mailto:info@inn.cl)  
Sitio Web [www.inn.cl](http://www.inn.cl)  
Publicado en Chile

## Contenido

Página

<b>Preámbulo .....</b>	<b>iv</b>
<b>1 Alcance y campo de aplicación .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Referencias normativas .....</b>	<b>1</b>
<b>3 Términos y definiciones .....</b>	<b>1</b>
<b>4 Significado y uso.....</b>	<b>2</b>
<b>5 Aparatos y equipo .....</b>	<b>2</b>
<b>5.6 Sistema de caída de martillo .....</b>	<b>4</b>
<b>6 Procedimiento de perforación.....</b>	<b>5</b>
<b>7 Procedimientos de muestreo y ensayo .....</b>	<b>6</b>
<b>8 Informe .....</b>	<b>7</b>

## Anexos

<b>Anexo A (normativo) Evaluación del índice de penetración estándar para su aplicación en la estimación del potencial de licuación de suelos arenosos .....</b>	<b>9</b>
<b>A.1 Alcances.....</b>	<b>9</b>
<b>A.2 Equipos .....</b>	<b>9</b>
<b>A.2.1 Equipo de perforación .....</b>	<b>9</b>
<b>A.2.2 Barras de perforación .....</b>	<b>9</b>
<b>A.2.3 Cuchara normalizada .....</b>	<b>10</b>
<b>A.2.4 Canastillo de retención.....</b>	<b>10</b>
<b>A.2.5 Cuchara limpiadora.....</b>	<b>10</b>
<b>A.3 Precauciones y requerimientos técnicos .....</b>	<b>10</b>
<b>A.4 Ejecución del sondaje.....</b>	<b>11</b>
<b>A.4.1 Sistema de perforación a rotación y lodo de estabilización .....</b>	<b>11</b>
<b>A.4.2 Sistema de Barreno Helicoidal Hueco (HOLLOW STEM AUGER).....</b>	<b>11</b>
<b>A.4.3 Sistema de perforación con rotación del revestimiento .....</b>	<b>12</b>
<b>A.5 Medida de la energía aplicada en el ensayo .....</b>	<b>13</b>
<b>A.6 Cálculo de valor (N1)60.....</b>	<b>13</b>

## Figuras

<b>Figura 1 – Definición del número de vuelta de la soga y el ángulo para la rotación en sentido horario y antihorario .....</b>	<b>3</b>
<b>Figura 2 – Cuchara normalizada (ASTM D 1586) .....</b>	<b>4</b>
<b>Figura 3 – Canastillo de retención de muestra.....</b>	<b>4</b>
<b>Figura A.1 – Sistema de perforación con rotación del revestimiento .....</b>	<b>12</b>
<b>Figura A.2 – Factor <math>C_N</math> según diferentes investigadores .....</b>	<b>16</b>

## Preámbulo

El Instituto Nacional de Normalización, INN, es el organismo que tiene a su cargo el estudio y preparación de las normas técnicas a nivel nacional. Es miembro de la INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) y de la COMISION PANAMERICANA DE NORMAS TECNICAS (COPANT), representando a Chile ante esos organismos.

Esta norma se estudió a través del Comité Técnico CL034 *Especialidades de la construcción*, para establecer los procedimientos mínimos que debe cumplir un ensayo de penetración estándar. En su elaboración se tuvo en consideración tanto la experiencia chilena como la práctica internacional.

Por no existir Norma Internacional, en la elaboración de esta norma se ha tomado en consideración la norma ASTM D 1586:1999 *Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils* y antecedentes técnicos proporcionados por el Comité.

El Anexo A forma parte de la norma

Si bien se ha tomado todo el cuidado razonable en la preparación y revisión de los documentos normativos producto de la presente comercialización, INN no garantiza que el contenido del documento es actualizado o exacto o que el documento será adecuado para los fines esperados por el Cliente.

En la medida permitida por la legislación aplicable, el INN no es responsable de ningún daño directo, indirecto, punitivo, incidental, especial, consecuencial o cualquier daño que surja o esté conectado con el uso o el uso indebido de este documento.

Esta norma ha sido aprobada por el Consejo del Instituto Nacional de Normalización, en sesión efectuada el 30 de octubre de 2014.

## Geotecnia — Ensayo de Penetración Estándar

### 1 Alcance y campo de aplicación

**1.1** Este método describe el procedimiento conocido como ensayo de Penetración Estándar (SPT) el cual consiste en hincar un muestreador de cuchara normalizada para obtener una muestra representativa del suelo y medir su resistencia a la penetración.

**1.2** Este procedimiento de ensayo puede ser utilizado en las metodologías para evaluar el potencial de licuación o licuefacción<sup>1</sup>.

**1.3** Los aspectos de seguridad del ensayo SPT no están cubiertos en esta norma.

### 2 Referencias normativas

El documento siguiente es indispensable para la aplicación de esta norma. Para referencias con fecha, sólo se aplica la edición citada. Para referencias sin fecha se aplica la última edición del documento referenciado (incluyendo cualquier enmienda).

ASTM D 1586:1999, *Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils*.

### 3 Términos y definiciones

Para los propósitos de esta norma, se aplican los términos y definiciones siguientes:

#### 3.1

##### **barras de conexión**

barras que conectan el ensamblaje de caída de martillo al muestreador

#### 3.2

##### **barra guía**

barra encargada de guiar la caída de martillo hasta la cabeza de golpe

#### 3.3

##### **cabeza de golpe**

cuerpo de acero que recibe el impacto y es el encargado de transmitir esta energía a las barras

#### 3.4

##### **C.F.**

Contenido de Finos bajo malla N° 200

#### 3.5

##### **cuchara normalizada**

elemento de penetración que además permite extraer muestras alteradas de suelo durante el ensayo (normalizada por ASTM D 1586)

---

<sup>1</sup> En esta norma se utiliza indistintamente los términos *licuefacción* o *licuación* para definir el mismo fenómeno.

### 3.6

#### **cuerda**

debe ser de manila, de diámetro entre 2 cm y 2,5 cm, para calzar en las poleas o roldanas. Debe estar rígida, seca y limpia y debe ser reemplazada cuando se muestre raída, engrasada, flácida o quemada

### 3.7

#### **DCDMA**

Diamond Core Drill Manufacturers Association

### 3.8

#### **ensamblaje de caída de martillo**

equipo conformado por el martillo, barra guía, cabeza de golpe y de un sistema de caída de martillo

### 3.9

#### **martillo**

masa de acero normalizada que proporciona la energía de impacto al ensayo

### 3.10

#### **número de vueltas de cuerda**

número de veces que la cuerda es enrollada completamente alrededor del tambor

### 3.11

#### **sistema de izaje y caída de martillo**

sistema a través del cual se efectúa la subida y posterior liberación del martillo para producir el impacto

### 3.12

#### **SPT**

abreviación del Ensayo de Penetración Estándar por sus siglas en inglés (Standard Penetration Test)

### 3.13

#### **tambor**

tambor rotatorio alrededor del cual el operador enrolla la cuerda para levantar y liberar el martillo

### 3.14

#### **valor N**

número de golpes representativo de la resistencia a la penetración del suelo

## 4 Significado y uso

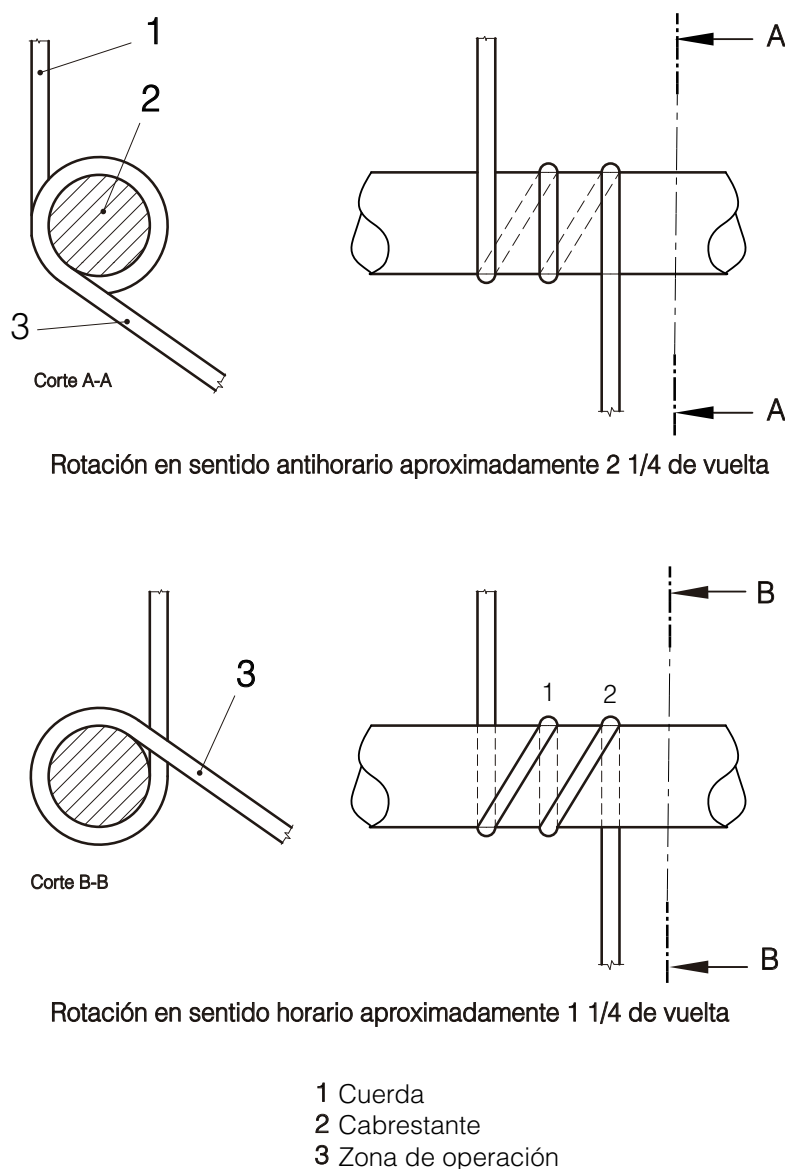
**4.1** Este método proporciona la obtención de una muestra alterada de suelo, la cual puede ser utilizada para realizar ensayos de laboratorio. Para obtener muestras con menor alteración se deben utilizar muestreadores de pared delgada, por ejemplo, tubo Shelby o Denison.

**4.2** Este método es utilizado extensamente en una gran variedad de proyectos geotécnicos de exploración. Existen muchas correlaciones locales y correlaciones extensamente publicadas, que relacionan el valor de N con diversas propiedades ingenieriles de los suelos.

## 5 Aparatos y equipo

**5.1 Martillo**, cuerpo de acero que pesa  $(63,5 \pm 0,5)$  kgf, que se deja caer sucesivamente desde una altura de 0,76 m para proporcionar la energía de impacto al ensayo.

**5.2 Número de vueltas de cuerda**, el número de veces que la cuerda es enrollada completamente alrededor del tambor. El ensayo de resistencia a la penetración se lleva a cabo dando dos vueltas nominales alrededor del tambor. Dependiendo de la posición del operador, la dirección de rotación del tambor y el ángulo al cual la cuerda se separa del tambor, el número de vueltas varía entre  $1 \frac{3}{4}$  y  $2 \frac{1}{4}$  (ver Figura 1).



**Figura 1 – Definición del número de vuelta de la sog y el ángulo para la rotación en sentido horario y antihorario**

**5.3 Equipo de perforación**, se acepta cualquier equipo que proporcione una perforación limpia y que asegure que el ensayo SPT sea realizado en suelo inalterado.

**5.4 Barras de conexión**, se deben usar barras de perforación de acero, de unión rápida, para conectar la cuchara normalizada con el sistema de caída de martillo. Las barras deben tener una rigidez (momento de inercia) igual o mayor a la de una barra del tipo “A” de paredes paralelas (diámetro exterior de 4,1 cm y diámetro interior de 2,85 cm).

NOTA 1 De acuerdo a ASTM D 1586:1999, investigaciones recientes indican que barras con rigidez en el rango de calibres A hasta N no producen un efecto significativo en los valores de N para ensayos realizados en profundidades de hasta 30 m.

NOTA 2 Los tipos de barras y sus calibres a utilizar hasta profundidades de 30 m (Conventional Drill Rod) son los siguientes: AW (1,75 pulgadas); BW (2,13 pulgadas) y NW (2,63 pulgadas). Para profundidades mayores que 30 m, utilizar BW o NW.

**5.5 Muestreador de cuchara normalizada**, el muestreador debe tener las dimensiones indicadas en Figura 2. La punta del muestreador debe ser de acero endurecido y ésta debe ser remplazada o reparada cuando esté abollada o deformada. La cuchara normalizada debe estar equipada con una bolilla de retención y ventilación. Para el caso de arenas sueltas y saturadas, la cuchara normalizada debe estar equipada con canastillo (ver Figura 3).

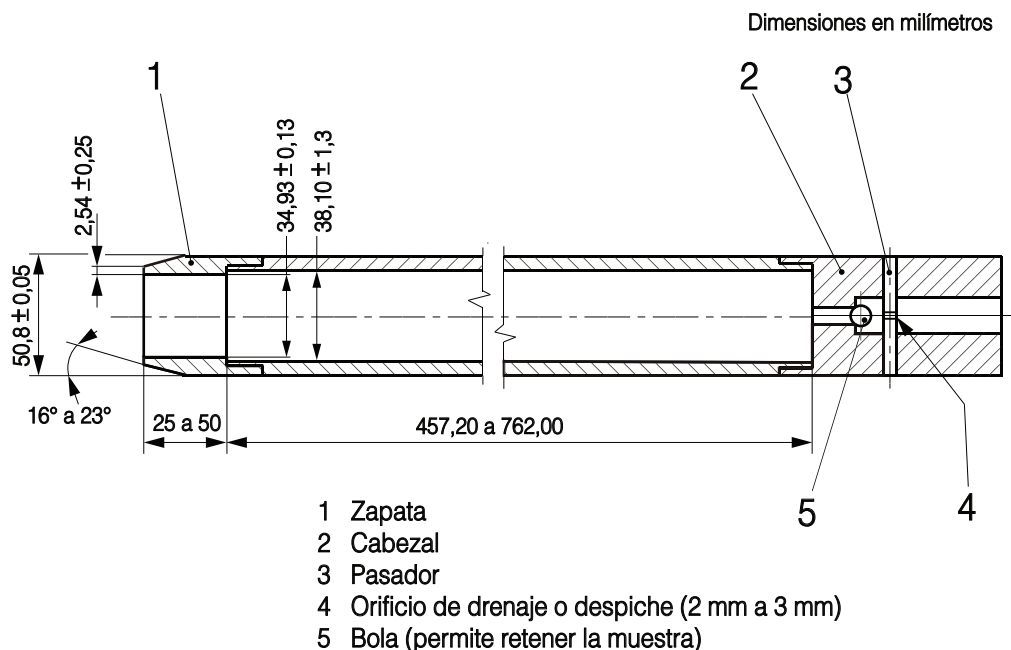


Figura 2 – Cuchara normalizada (ASTM D 1586)

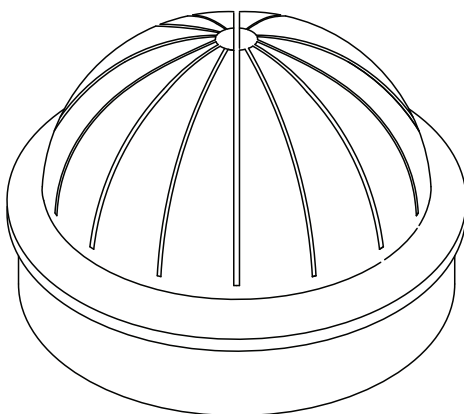


Figura 3 – Canastillo de retención de muestra

## 5.6 Sistema de caída de martillo

**5.6.1 Martillo y cabeza de golpe**, el martillo debe ser de acero sólido y tener un peso de  $(63,5 \pm 0,5)$  kgf. El martillo debe impactar la cabeza de golpe y realizar un contacto acero con acero cuando se deja caer. Los martillos que se utilizan con el método de tambor y soga, deben tener una capacidad de sobre elevación libre de por lo menos 10 cm. Por razones de seguridad, se recomienda un equipo con cabeza de golpe interna. El peso total del conjunto martillo y cabeza de golpe sobre las barras de perforación no debe ser mayor que  $(113 \pm 5)$  kgf.



**5.6.2 Sistema de levante y caída del martillo**, se pueden utilizar sistemas de tambor-soga, semiautomático o automático, todo esto siempre y cuando el aparato de levante sea completamente independiente del tren de barras para impedir que se afecte el muestreador.

**5.6.3** Durante la ejecución del ensayo se debe procurar la verticalidad del sistema. Para ello se debe utilizar barra guía, cabeza de golpe y tren de barras.

**5.7 Accesorios**, se debe contar con etiquetas, contenedores para muestras, hojas para registro de datos y equipo para medir el nivel de agua en el interior del sondaje, de acuerdo con los requisitos del proyecto y otras Normas Chilenas.

## 6 Procedimiento de perforación

**6.1** El sondaje debe avanzar por incrementos para permitir un muestreo intermitente. Los intervalos y las localizaciones de ensayo son normalmente especificados por el profesional responsable del estudio geotécnico. Típicamente, los intervalos elegidos son de 1 m, con ensayos y muestreos en cada cambio de estrato.

**6.2** No se debe realizar un ensayo SPT a un distanciamiento menor que 0,5 m del término del ensayo anterior.

**6.3** El procedimiento de perforación debe proporcionar una cavidad limpia y estable antes de introducir el muestreador y asegurar que el ensayo se realiza en un suelo esencialmente inalterado.

**6.4** Los procedimientos considerados como aceptables, dependiendo de las condiciones del suelo a ensayar son los siguientes:

**6.4.1** Método de perforación por rotación.

**6.4.2** Método de barreno helicoidal continuo con eje hueco.

**6.4.3** Método de lavado de perforación.

**6.4.4** Método de barreno continuo con eje sólido.

**6.5** No se debe permitir el proceso de inyección de fluido a través de un muestreador de tubo abierto y luego el ensayo SPT cuando se alcanza la profundidad deseada.

**6.6** No se acepta el uso de lanza de agua (chorro frontal de agua a presión) como método de preparación y limpieza para la ejecución de un ensayo SPT.

**6.7** En suelos arenosos, el método de barreno continuo con eje sólido no debe ser usado para avanzar el sondaje debajo del nivel freático.

**6.8** El entubado o revestimiento no debe avanzar por debajo del punto de inicio del ensayo SPT.

**6.9** No se permite avanzar la perforación con brocas de descarga de fondo o frontal.

**6.10** No se permite utilizar la cuchara normal como herramienta de avance.

**6.11** En todo momento el nivel de fluido de perforación dentro del sondaje debe ser mantenido a nivel o por encima del nivel freático durante la perforación, remoción de barras de perforación y del muestreo.

**6.12** Para mantener la estabilidad de la perforación en suelos no cohesivos, particularmente en arenas limpias, se debe usar lodo bentonítico o solución con aditivo biodegradable.

## 7 Procedimientos de muestreo y ensayo

**7.1** Luego que el sondaje haya avanzado hasta la profundidad deseada para realizar el ensayo y se ha removido los sobrantes de la perforación o detritus, prepare el ensayo con la siguiente secuencia de operaciones:

**7.1.1** Revisar que el muestreador se encuentre en buenas condiciones, limpio y con todos sus accesorios.

**7.1.2** Asegurar el muestreador de cuchara normalizada a las barras de muestreo y bajar por la perforación. Asegurar un adecuado apriete entre las barras.

**7.1.3** Colocar el martillo por encima y conectar la cabeza de golpe a la parte superior de las barras de muestreo. Esto puede ser hecho antes que las barras de muestreo y el muestreador se bajen a la perforación.

**7.1.4** Descansar el peso muerto del muestreador, barras, martillo y cabeza de golpe, en el fondo de la perforación y aplicar un golpe de asiento. Anotar la profundidad de comienzo de ensayo. Si se encuentra muchos detritus de la perforación en el fondo del sondaje, levantar el tren de barras y muestreador y limpiar de nuevo la perforación antes de realizar el ensayo.

**7.1.5** Marcar las barras de perforación en tres tramos sucesivos de 0,15 m cada uno, de modo que el avance del muestreador bajo los impactos del martillo pueda ser observado fácilmente en cada intervalo de 0,15 m.

**7.2** Hincar el muestreador con golpes de martillo y contar el número de golpes aplicado en cada tramo de 0,15 m. El valor de N corresponde a la suma de los golpes de los dos últimos tramos de 0,15 m.

**7.3** Se define condición de rechazo (R) cuando ocurre cualquiera de las situaciones siguientes:

**7.3.1** Aplicar un total de 50 golpes en uno de los tres tramos de 0,15 m descritos en 6.1.5.

**7.3.2** Aplicar un total de 100 golpes durante los tres tramos sucesivos.

**7.3.3** No se observa ningún avance del muestreador durante la aplicación de 10 golpes sucesivos del martillo.

NOTA En todos los casos debe quedar registrado el número de golpes y la penetración obtenida.

**7.4** Registrar el número de golpes requerido para alcanzar cada 0,15 m de penetración o fracción. Los primeros 0,15 m se consideran de acomodamiento. La suma del número de golpes del segundo y tercer tramo se denomina *resistencia a la penetración estándar* o *valor de N*. Si el muestreador se hince menos que 0,45 m como lo indica 7.3.1, 7.3.2 y 7.3.3 para los tramos parciales, se debe reportar la profundidad de penetración alcanzada, además del número de golpes. Si el muestreador avanza por debajo del fondo de la perforación por acción del peso propio de las barras, martillo y cabeza de golpe, debe ser anotada dicha información en el registro.

**7.5** El izaje y posterior caída de martillo se debe ejecutar mediante uno de los métodos siguientes:

**7.5.1** Mediante la utilización de un sistema de caída de martillo automático o semiautomático, que levante el martillo de 63,5 kgf y lo deje caer desde una altura de 0,76 m sin impedimentos.

**7.5.2** Mediante el uso de un sistema manual utilizando un tambor rotatorio para enrollar una soga de manila de diámetro entre 2 cm y 2,5 cm conectada al martillo. Cuando se use el método de tambor y soga, el sistema de operación debe cumplir con lo siguiente:

**7.5.2.1** El tambor debe estar libre de oxidación, aceite y grasa, y debe tener un diámetro en el rango de 15 cm a 25 cm.

**7.5.2.2** El tambor debe ser operado a una velocidad de rotación mínima de 100 rpm.

**7.5.2.3** El operador debe aplicar 1 3/4 o 2 1/4 vueltas de soga sobre el tambor, dependiendo de su sentido de giro (ver Figura 1). La soga se debe mantener en una condición relativamente seca, limpia y se debe remplazar si se vuelve aceitosa, desgastada o quemada.

**7.5.2.4** Para cada golpe de martillo, la elevación y posterior caída debe ser realizada por el operador. Esta operación debe ser realizada rítmicamente sin sostener la cuerda al momento de la caída de martillo. Se recomienda una frecuencia de 30 a 40 golpes por minuto.

## **7.6 Recuperación de la muestra**

El procedimiento a seguir es el siguiente:

**7.6.1** Subir el muestreador a la superficie y abrir.

**7.6.2** Registrar la longitud de la muestra recuperada. Describir la muestra de suelo recuperada de acuerdo a su composición, color, estratificación u otro aspecto relevante.

**7.6.3** Colocar una o más partes representativas de la muestra en recipientes sellados e impermeables, evitando dañar o distorsionar las muestras.

**7.6.4** Sellar cada recipiente para evitar la pérdida de humedad.

**7.6.5** Adherir etiquetas a los recipientes indicando la obra, número de sondaje, profundidad de la muestra y número de golpes por cada incremento de 0,15 m.

**7.6.6** Si existe algún cambio de suelo dentro del muestreador, preparar un recipiente para cada estrato indicando su localización en el muestreador.

**NOTA** Si en el extremo superior del muestreador se observa material sobrante de la perforación, no incluir en las muestras recuperadas.

## **8 Informe**

**8.1** La información del sondaje se debe registrar en terreno y contener los puntos siguientes:

**8.1.1** Nombre y localización de la obra.

**8.1.2** Nombre del personal.

- 8.1.3** Tipo y marca de la máquina de perforación.
- 8.1.4** Fecha y hora de comienzo y fin de la perforación.
- 8.1.5** Código identificador del sondaje.
- 8.1.6** Ubicación del sondaje mediante coordenadas geodésicas, señalando su respectivo sistema de referencia.
- 8.1.7** Fotografías de las cajas de sondaje con sus respectivas muestras, utilizando como referencia la carta de colores Munsell.
- 8.1.8** Sistema de levante y caída de martillo utilizado, como tambor-soga; semiautomático, automático u otro.
- 8.1.9** Cota de boca del sondaje, si está disponible.
- 8.1.10** Método de avance y limpieza de la perforación.
- 8.1.11** Método de mantenimiento de la perforación.
- 8.1.12** Profundidad del nivel freático, fecha y hora de cuando se hizo la medición.
- 8.1.13** Profundidad de los cambios de estratos.
- 8.1.14** Revestimiento y profundidades de la porción revestida de la perforación.
- 8.1.15** Tipo de muestreador.
- 8.1.16** Observaciones.
- 8.2** Los datos obtenidos de cada muestra se debe registrar en terreno e incluir lo siguiente:
  - 8.2.1** Profundidad de la muestra y número de ésta.
  - 8.2.2** Descripción del suelo.
  - 8.2.3** Cambios de estrato dentro de la muestra.
  - 8.2.4** Penetración del muestreador y longitudes de recuperación.
  - 8.2.5** Número de golpes por cada incremento de 0,15 m o incremento parcial.
- 8.3** El informe debe contar con la firma del profesional responsable que acredite la validez del ensayo y sus resultados.

## **Anexo A**

### **(normativo)**

## **Evaluación del índice de penetración estándar para su aplicación en la estimación del potencial de licuación de suelos arenosos**

### **A.1 Alcances**

En este anexo se describen el procedimiento para obtener un registro de la resistencia a la penetración estándar (Índice de Penetración Estándar, N) y las respectivas normalizaciones y correcciones a ser aplicadas al N medido, de forma de utilizar la metodología de evaluación del potencial de licuación de suelos arenosos saturados. La metodología específica para evaluar el potencial de licuación está fuera del alcance de esta norma.

Las expresiones para normalizar y corregir el valor medido de N que se indican en este anexo son las recomendadas en el artículo “Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils” publicado en Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 127, N° 10, Oct. 2001. Otros aspectos del ensayo fueron obtenidos de ASTM D 6066:1996 (Reapproved 2004) “Standard Practice for Determining the Normalized Penetration Resistance of Sands for Evaluation of Liquefaction Potential”.

La aplicación de la metodología detallada en este anexo se limita a suelos arenosos (SM, SW, SP, SP-SM y SW-SM). En casos justificados, esta metodología también es aplicable a suelos limo arenosos (ML) cuyos finos (bajo malla N° 200) presenten un índice de plasticidad menor que 4.

En la mayoría de los casos, el Ensayo de Penetración Estándar es realizado en depósitos saturados que se desarrollan por debajo del nivel freático. En este contexto se deben cumplir a cabalidad con las exigencias de perforación y ensayo que se detallan en este anexo.

### **A.2 Equipos**

#### **A.2.1 Equipo de perforación**

Se deben utilizar métodos de perforación rotativos con estabilización mediante lodos o aditivos según corresponda, esto para minimizar la perturbación de terreno durante la perforación.

No está permitido el lavado de la perforación con lanza de agua, ni el avance de la camisa de perforación con métodos de hincado a golpes, debido a la perturbación que pueden generar en el terreno a ensayar.

#### **A.2.2 Barras de perforación**

La mayoría de los casos de licuación históricos que conforman la base de datos han sido obtenidos con barras de conexión pequeñas. Para mantener la consistencia, el tamaño de las barras de conexión se debe limitar a barras AW o AWJ (según DCDMA), con una masa de 4,5 kgf/m a 7,5 kgf/m (3 lb/pie a 5 lb/pie). Para profundidades mayores que 15 m (50 pies), se prefieren las barras más grandes, como BW a NW, esto para evitar coletazos y/o pandeo.

### **A.2.3 Cuchara normalizada**

La principal preocupación en el diseño de la cuchara normalizada está en el diámetro interior de ésta por sobre la zapata de penetración. Es práctica habitual el uso de una cuchara con la geometría y dimensiones que se indican en Figura 2, es decir, con un diámetro interior de 38,1 mm (1,5 pulgadas) para el uso de un encamisado o liner. Sin embargo, este liner en general no es colocado. La base de datos sobre licuación ha sido obtenida de diferentes países, en mucho de los cuales es utilizada la cuchara con un diámetro interno constante de 349 mm (1,375 pulgadas). Un factor de corrección por liner puede ser aplicado para convertir la resistencia a la penetración con o sin liner, de forma de ajustarse a la bases de datos empíricos.

### **A.2.4 Canastillo de retención**

No existe información disponible sobre el efecto del canastillo en el valor resultante de la resistencia a la penetración. Sin embargo, se considera que canastillos plásticos tienen un efecto reducido, mientras que canastillos metálicos sí tienen efecto, aumentando la resistencia a la penetración, por lo que estos últimos no están permitidos.

### **A.2.5 Cuchara limpiadora**

Cuchara de 75 mm y 88 mm (3 pulgadas y 3 1/2 pulgadas) pueden ser utilizadas para extraer material del sondaje y dejar limpia la cavidad.

## **A.3 Precauciones y requerimientos técnicos**

**A.3.1** El procedimiento con uso del sistema cuerda-tambor está afecto al operador. Además, la resistencia a la penetración está afecta a la energía proporcionada por el ensayo, la cual a su vez está relacionada tanto con la operación como con las condiciones del sistema cuerda-tambor. Consecuentemente, toda desviación de las condiciones óptimas debe ser informada.

**A.3.2** Especial cuidado se debe tener en mantener estrictamente las condiciones de ensayos sobre las cuales se estableció la energía proporcionada por el sistema de ensayo.

**A.3.3** Se debe cuidar de mantener limpio el orificio donde se ubica la bola de retención en la parte superior de la cuchara normalizada.

**A.3.4** Bajo condiciones climáticas adversas (viento fuerte, lluvia, nieve), el sistema cuerda-tambor puede variar la energía del ensayo por cambio en el roce cuerda-tambor. Se debe cuantificar el cambio e informar el resultado.

**A.3.5** Los ensayos de penetración no pueden ser realizados en forma continua. Se requiere de un intervalo mínimo de 50 cm entre dos ensayos de penetración adyacentes.

**A.3.6** Las correlaciones entre el índice de penetración y la resistencia a la licuación son dependientes del contenido de finos del suelo. Por esta razón se requiere que las muestras extraídas en la cuchara normalizada sean debidamente rotuladas y embaladas para su transporte al laboratorio, donde al menos se les debe realizar un ensayo granulométrico. De haber distintos lentes en la muestra, se deben detallar y ensayar por separado si la cantidad de suelo así lo permite.

## A.4 Ejecución del sondaje

La ejecución del sondaje debe ser realizada con alguno de los procedimientos siguientes:

### A.4.1 Sistema de perforación a rotación y lodo de estabilización

Es siempre preferible estabilizar el sondaje vía la utilización de lodo o aditivo según corresponda. Sin embargo, también es posible complementar con el uso de revestimiento metálico, el cual se debe mantener más arriba de la profundidad de ensayo en no menos de 20 cm. Es de vital importancia mantener en todo momento el nivel del fluido de perforación por sobre el nivel de la napa freática. Para mayor control se recomienda mantener a nivel de boca del sondaje, lodo o aditivo según corresponda. Esto es especialmente crucial durante la extracción de la herramienta de perforación, pues se puede producir el fenómeno de ebullición o sifonamiento de la arena a ensayar, perturbándose completamente por el flujo ascendente de agua hacia el sondaje. Para evitar lo anterior, el levantado del muestreador se debe realizar en forma lenta.

### A.4.2 Sistema de Barreno Helicoidal Hueco (HOLLOW STEM AUGER)

El sistema HSA consiste en un helicoide de eje hueco el cual al girar permite perforar y revestir simultáneamente y, por su interior, realizar diversos ensayos geotécnicos (SPT, Shelby, Veleta, etc.). Asimismo, obtener muestras de suelo mediante tubo muestreador de doble o triple pared. Una vez terminado el sondaje es posible instrumentarlo por el interior de su eje (piezómetro, deflectómetro, etc.).

En la práctica, el barreno helicoidal hueco, se utiliza para sondear suelos finos y arenas, de dos formas:

- a) Cerrado al fondo (barreno ciego) mediante una broca piloto en el extremo inferior. Al avanzar el helicoide, no se obtiene muestra por el interior del eje hueco. Al llegar a la profundidad de ensayo SPT, se debe tener especial cuidado y levantar, lentamente, la broca piloto de modo que no se genere una succión que favorezca la ebullición del suelo no cohesivo, el cual quedará expuesto al fondo del eje hueco de la columna helicoidal.
- b) Abierto al fondo: al avanzar de este modo el suelo sondeado va penetrando simultáneamente por el interior del eje hueco. Así se va obteniendo la muestra naturalmente, la cual se introduce y se almacena en un muestreador, por ejemplo, tipo cuchara partida, el cual no gira al rotar el helicoide. También puede llevar un *liner* por su interior. Esto equivale a muestreo con pared doble o triple. Previamente al ensayo SPT, se debe extraer, lentamente, el muestreador.

Cuando se trata de arenas saturadas, es imprescindible que el interior del eje hueco permanezca lleno con un lodo bentónico o equivalente, o bien, agua. Así se mantiene, sobre el fondo, una carga hidráulica mayor que la de la napa freática.

Para realizar un ensayo SPT, la cuchara normal se introduce por el interior del eje hueco hasta la profundidad predefinida de ensayo, bajo el nivel del cabezal de perforación.

En caso que se detecte presencia de detritos al interior del eje hueco, se deberá efectuar una limpieza del fondo del sondaje al alcanzar la profundidad de ensayo SPT<sup>2</sup>.

---

2 Entendiéndose su uso para estabilizar la pared del pozo. El perforista podrá usar otra dispersión estabilizadora en caso que la perforación sea utilizada posteriormente para otro fin, como mediciones piezométricas.

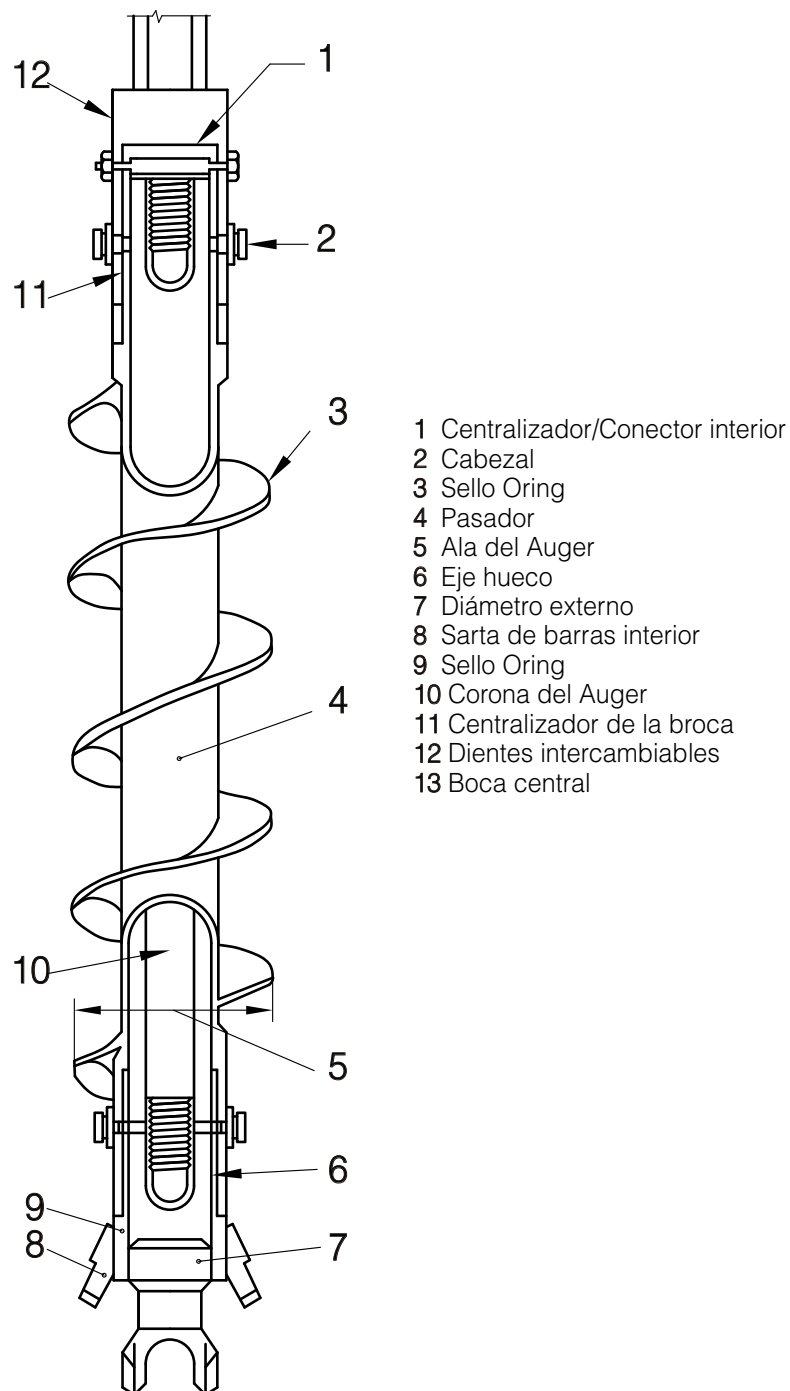


Figura A.1 – Sistema de perforación con rotación del revestimiento

#### A.4.3 Sistema de perforación con rotación del revestimiento

El sistema de perforación con rotación del revestimiento se utiliza para perforar el suelo mediante un tricono, corona barril o similar, que avanza conjuntamente al rotar el revestimiento del sondaje. La zapata o algún tipo de anillo escariador, también va penetrando levemente desplazada detrás de la herramienta de perforación interna.



Se emplea como fluido de refrigeración, preferentemente una dispersión de bentonita en agua, el cual se alimenta por el interior del revestimiento. El retorno hacia la superficie debe llevar consigo el correspondiente detrito que circula entre el revestimiento y la pared del sondaje. La presión del fluido y el caudal de circulación se deben mantener controlados a medida que la perforación avanza a fin de evitar perturbar el suelo y que permita retirar todo el detrito que va generando la perforación.

Una vez alcanzada la profundidad para el ensayo SPT, se retira la herramienta de perforación interna mediante wireline. Por el interior del revestimiento se introduce la cuchara normal y se procede a realizar el ensayo. El sondaje debe permanecer constantemente lleno con dispersión de bentonita o equivalente para evitar ebullición o levantamiento del suelo del fondo del sondaje.

## A.5 Medida de la energía aplicada en el ensayo

Todo sistema o equipo utilizado para ejecutar el ensayo de penetración estándar, orientado a evaluar el potencial de licuación, debe poseer la documentación respectiva que indique el porcentaje de energía (ERi) que éste está aplicando respecto de la energía teórica nominal medidos en la cabeza de golpe. Esta documentación debe ser verificable y tener una vigencia no mayor que 1 año.

La evaluación de la energía aplicada debe ser realizada conforme a ASTM D 4633:2010.

## A.6 Cálculo de valor $(N_1)_{60}$

**A.6.1** El valor medido del índice de penetración,  $N_m$ , se determina mediante la expresión:

$N_m$  = número de golpes para penetrar desde 15 cm a 30 cm + número de golpes para penetrar desde 30 cm a 45 cm.

El valor  $N_m$  es calculado sólo si la penetración ha alcanzado completamente el intervalo de ensayo de 30 cm. No se permite extrapolar valores de  $N_m$  cuando la penetración es menor que 30 cm. En dicho caso, se debe informar el número de golpes y la distancia penetrada.

**A.6.2** El valor de  $(N_1)_{60}$  requiere de los siguientes factores de corrección y normalización:

$$(N_1)_{60} = N_m \times C_N \times C_E \times C_B \times C_R \times C_S \quad (A.1)$$

en que:

$N_1$  = índice de penetración estándar normalizado por presión de confinamiento de 1 kgf/cm<sup>2</sup> aplicables sólo a suelos que clasifican como arena;

$(N_1)_{60}$  = índice de penetración estándar normalizado por presión de confinamiento de 1 kgf/cm<sup>2</sup> y corregido al 60% de la energía normalizada, sólo a suelos que clasifican como arena;

$C_N$  = factor de normalización a presión confinante de 1 kgf/cm<sup>2</sup>;

$C_E$  = factor de corrección para llevar al 60% de la energía teórica del ensayo;

$C_B$  = factor de corrección por diámetro del sondaje;

$C_R$  = factor de corrección por largo de barras;

$C_S$  = factor de corrección para cucharas con o sin liner.

### A.6.3 Cálculo del porcentaje de recuperación

$$\text{Porcentaje de recuperación} = 100 \times \frac{\text{largo de muestra recuperada (cm)}}{\text{largo perforado (cm)}}$$

### A.6.4 Corrección por energía

Es usual realizar esta corrección para obtener la resistencia a la penetración normalizada al 60%. Para esto se debe corregir el valor medido,  $N_m$ , a una razón equivalente al 60% de la  $N_{60}$ , mediante Ecuación A.2 siguiente:

$$N_{60} = N_m \times C_E \quad (\text{A.2})$$

en que:

$$C_E = (E_{Ri}/60);$$

$E_{Ri}$  = razón de energía transmitida por las barras de perforación, expresado como porcentaje (%).

### A.6.5 Resistencia a la penetración normalizada a un nivel de tensión de 1 kgf/cm<sup>2</sup>

Calcular el valor  $N_1$  como se indica a continuación:

$$N_1 = C_N \times N_m$$

Una de las expresiones más utilizada del factor  $C_N$  es:

$$C_N = (P_a / \bar{\sigma}_{v0})^n \quad (\text{A.3})$$

en que:

$$P_a = \text{presión atmosférica (1 kgf/cm}^2\text{);}$$

$$\bar{\sigma}_{v0} = \text{tensión efectiva vertical a la profundidad de ensayo, en las mismas unidades de } P_a;$$

$$n = \text{exponente que depende del material.}$$

El exponente  $n$  se ha derivado a partir de ensayos de cámara y depende de la teoría de expansión de una cavidad. El valor del exponente varía con la densidad, tamaño de partícula, razón de preconsolidación y el envejecimiento del suelo. Además, los efectos de borde no son considerados normalmente en los ensayos de cámara. Valores típicos del exponente  $n$  en arenas limpias, que se usan actualmente en la práctica, se encuentran en el rango de 0,45 a 0,60. La revisión de ensayos de penetración hechos en cámara, indican que el exponente  $n$  es menor en arenas densas (tan bajo como 0,40). El valor típico utilizado en la práctica es  $n = 0,5$ . La escasa evidencia disponible de penetración en arenas con finos (C.F. > 15%), sugiere que el valor de  $n$  es cercano a 1,0, a menos que se produzca drenaje durante la penetración. En tal caso, la selección de  $n = 0,60$  ó  $0,70$  puede ser apropiada para esos suelos. En Figura A.2 se presentan las tendencias del factor  $C_N$  sugeridas por diversos investigadores. Notar que el factor  $C_N$  puede alcanzar valores considerables a bajas profundidades. Algunos investigadores han recomendado limitar los valores de  $C_N$  a aproximadamente 1,6 a muy bajas profundidades.

Para  $n = 0,5$

$$C_N = \left( \frac{P_a}{\bar{\sigma}_{v0}} \right)^{0,5}$$

La tensión vertical efectiva es calculada a partir de la presión hidrostática y tensiones totales del terreno. La tensión vertical efectiva es la diferencia entre el esfuerzo vertical total y la presión hidrostática:

$$\bar{\sigma}_{v0} = \sigma_v - u_0 \quad (\text{A.4})$$

en que:

$$\sigma_v = \sum (h_{us} \times \gamma_{t \text{ o sat}})$$

$\gamma_{t \text{ o sat}}$  = peso unitario húmedo o saturado del suelo por sobre la zona de ensayo.

La magnitud de la presión hidrostática puede ser estimada como:

$$u_0 = \text{presión de poros} = h_i \times \gamma_w \quad (\text{A.5})$$

en que:

$h_i$  = altura de agua estimada a partir de las condiciones del sitio;

$\gamma_w$  = peso unitario del agua.

En suelos estratificados, con múltiples acuíferos colgados, puede ser un error asumir una posición única de la superficie freática. Usualmente el nivel de agua al interior del sondaje es poco confiable para estimar la presión de agua en la zona de ensayo. Adicionalmente, se pueden requerir mediciones piezométricas precisas que permitan asegurar la magnitud real de la presión de poros.

Para el caso de un único acuífero, la tensión efectiva es la suma de las tensiones totales sobre el nivel freático y de las tensiones boyantes bajo dicho nivel:

$$\bar{\sigma}_{v0} = \sum (h_{us} \times \gamma_t) + \sum (h_s \times (\gamma_{sat} - \gamma_w)) \quad (\text{A.6})$$

en que:

$h_{us}$  = espesor de estratos individuales por sobre el nivel freático;

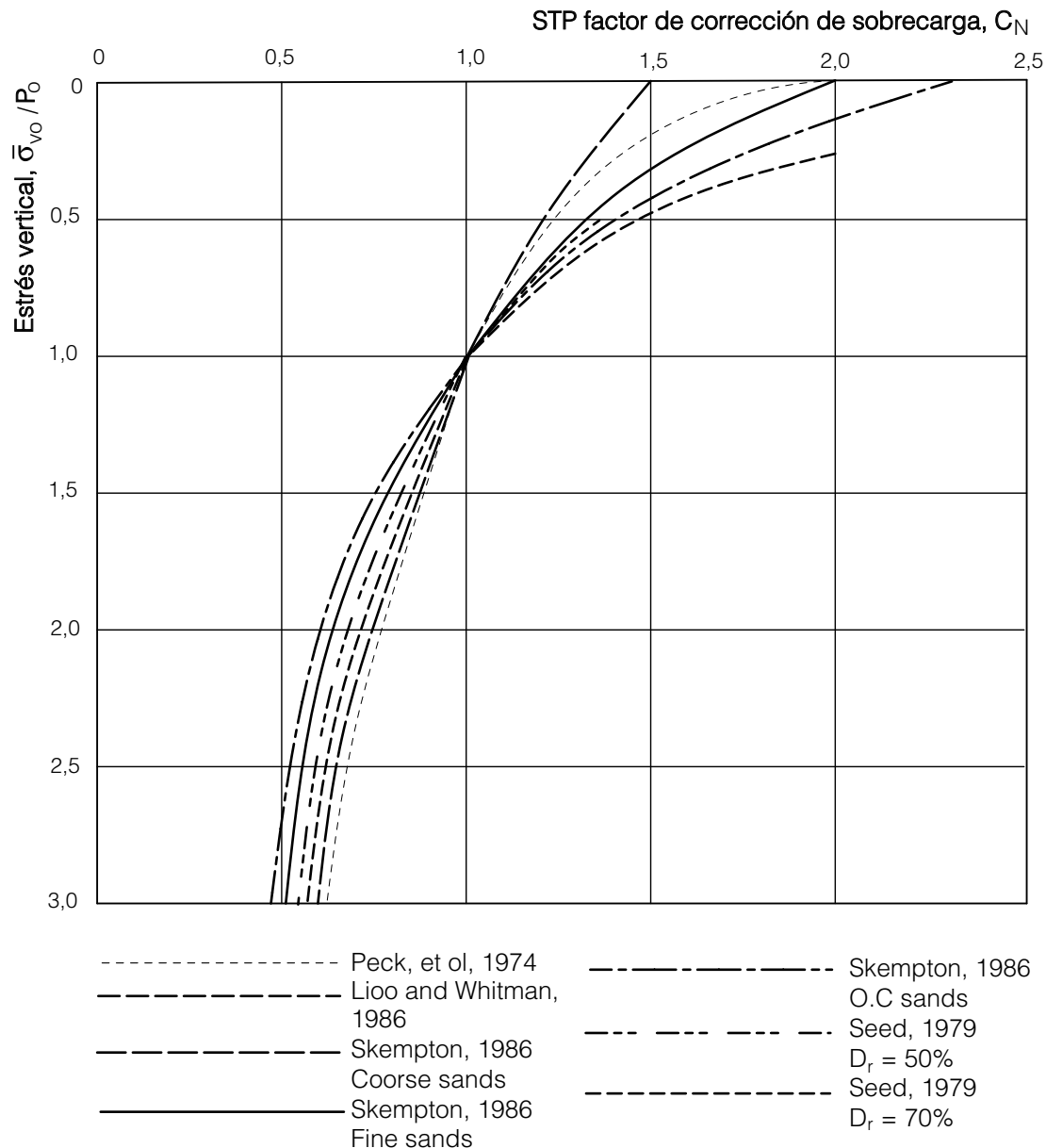
$\gamma_t$  = peso unitario húmedo de los estratos de suelo por sobre el nivel freático;

$h_s$  = espesor de los depósitos de suelo saturado bajo la napa freática;

$\gamma_{sat}$  = peso unitario saturado de los estratos de suelo;

$\gamma_w$  = peso unitario del agua.

La determinación de la tensión vertical efectiva requiere un detallado conocimiento de las condiciones del sitio. Bajo condiciones de acuíferos colgados o artesianos, se puede dificultar la estimación de la presión de poros. El nivel de agua al interior del sondaje puede no dar información fiable de la presión de poros. En ciertas condiciones geológicas, como zonas cementadas, que sobre yacen a zonas normalmente consolidadas, la tensión total puede ser difícil de estimar. La estimación de la tensión vertical efectiva requiere de un juicio de un geotécnico experto.



**Figura A.2 – Factor  $C_N$  según diferentes investigadores**

Alternativamente, el factor  $C_N$  que ha sido propuesto en el documento citado en cláusula A.1 es el siguiente:

$$C_N = \frac{2,2}{1,2 + \frac{\bar{\sigma}_{v0}}{P_a}}$$

Cualquiera sea la expresión utilizada para el factor  $C_N$ , éste se acota superior e inferiormente a 1,7 y 0,5, respectivamente.

### A.6.6 Factor de corrección $C_B$

Este factor considera los siguientes valores de acuerdo al diámetro de la perforación resultante a nivel del ensayo:

Diámetro de la perforación mm	$C_B$
65 a 115	1,00
150	1,05
200	1,15

### A.6.7 Factor de corrección $C_R$

Este factor considera los siguientes valores de acuerdo al largo total de barras utilizadas hasta la profundidad del ensayo ( $L_t$ ):

Para martinete manual:

Largo total ( $L_t$ ) m	$C_R$
$\leq 3$	0,75
150	1,00

Para martinete automático:

Largo total ( $L_t$ ) m	$C_R$
$\leq 3$	0,75
$3 < L_t \leq 4$	0,80
$4 < L_t \leq 6$	0,85
$6 < L_t \leq 10$	0,95
$10 < L_t \leq 30$	1,00

### A.6.8 Factor de corrección $C_S$

Cuchara estándar	$C_S$
Con liner	1
Sin liner	1,1 - 1,3

Dado que la cuchara presenta un espacio para alojar el liner, en general se recomienda utilizarlo, de modo que la muestra mantenga la ubicación de eventuales subestratos. En caso de no utilizarlo, se debe informar explícitamente.