

Depósitos de relave - Control de compactación con penetrómetro dinámico ligero

Tailings deposits - Control of compaction with light dynamic penetrometer

Primera edición : 2012

CIN 93.020

COPYRIGHT © 2012: INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION - INN

* Prohibida reproducción y venta *

Dirección : Matías Cousiño N° 64, 6° Piso, Santiago, Chile

Web : www.inn.cl

Miembro de : ISO (International Organization for Standardization) • COPANT (Comisión Panamericana de Normas Técnicas)

Contenido

	Página
Preámbulo	V
0 Introducción	1
1 Alcance y campo de aplicación	2
2 Referencias normativas	2
3 Simbología	2
4 Términos y definiciones	4
5 Métodos de ensayo	6
5.1 Principios generales	6
5.2 Funciones de control	7
6 Equipos y dispositivos de medición	9
6.1 Penetrómetro dinámico ligero a energía variable	9
6.2 Penetrómetro dinámico ligero a energía constante	11
6.3 Controles y verificaciones periódicas	12
6.4 Calibración del equipo	13
6.5 Cancha de calibración	13
7 Realización del ensayo	14
7.1 Preparación del ensayo	14
7.2 Ensayo	14
7.3 Resultados	15

Contenido

		Página
8	Informe de ensayo	16
9	Interpretación de los resultados	17
9.1	Penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable	17
9.2	Penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante	22
Anexos		
Anexo A (informativo) Características principales de los penetrómetros dinámicos ligeros		24
Anexo B (informativo) Métodos de calibración de penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable o penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante		26
B.1	Metodología general	26
B.2	Selección del molde de calibración	27
B.3	Variación del contenido de humedad	27
B.4	Variación de la energía de compactación	29
B.5	Método de compactación del molde	29
B.6	Ensayos de penetración	30
Anexo C (informativo) Penetrómetro dinámico ligero a energía variable - Interpretación de resultados en función B		32
C.1	Tratamiento de los datos	32
C.2	Obtención de las curvas valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) y de valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR})	34
Anexo D (informativo) Bibliografía		35

Contenido

	Página
Figuras	
Figura 1 Penetrograma característico para un material homogéneo definido a partir de q_{d0} , Z_c y q_{d1}	5
Figura 2 Esquema del equipo de penetración dinámica a energía variable	9
Figura 3 a) Esquema del equipo de penetración dinámica a energía constante	11
Figura 3 b) Punta tipo	11
Figura 4 Morfología simplificada de la señal penetrométrica obtenida en una capa compactada	18
Figura 5 a) Principio para el control de compactación empleando un penetrómetro dinámico ligero a energía variable	19
Figura 5 b) Ejemplo de control de compactación a partir de un penetrograma <i>in situ</i>	20
Figura 6 Curva de calibración - Índice de resistencia a la penetración N en función del grado de energía de compactación Estándar o de energía de compactación Modificada	23
Figura B.1 Molde de calibración Panda	28
Figura B.2 Esquema de separación de ensayos	30
Figura B.3 Esquema simplificado del proceso de calibración	31
Figura C.1 Relación entre la resistencia dinámica de punta a nivel superficial (q_{d0}) y la densidad seca (γ_d)	33
Figura C.2 Relación entre la resistencia dinámica de punta en profundidad (q_{d1}) y la densidad seca (γ_d)	33
Figura C.3 Relación entre la profundidad crítica (Z_c) y la densidad seca (γ_d)	34
Tablas	
Tabla A.1 Características principales de los penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable	24

Contenido

	Página
Tabla A.2 Características principales de los penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante	24
Tabla A.3 Precisión de resistencia dinámica de punta (q_d)	25
Tabla A.4 Precisión de profundidad (Z)	25
Tabla B.1 Clasificación del estado hídrico en función de la humedad natural (W_n) referida a la humedad óptima de compactación (W_{op})	27
Tabla B.2 Rango propuesto para el grado de compactación	29
Tabla C.1 Tolerancia de repetitividad de ensayos de penetración en un mismo molde de calibración	32

Depósitos de relave - Control de compactación con penetrómetro dinámico ligero

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 *Minería*, para establecer un procedimiento para realizar el control de compactación en depósitos de relaves, durante la fase de operación o construcción, mediante el empleo de penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable o penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante.

Esta norma está basada en estudios realizados en laboratorio e *in situ* por el Grupo de Geotecnia de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, dentro del marco del proyecto INNOVA 08CM01-13 (Proposición de Proyectos de Normas para Optimizar el Proceso de Operación y Control de Calidad Tranques de Relaves).

La norma NCh3261 ha sido preparada por la División de Normas del Instituto Nacional de Normalización, INN y por el Grupo de Geotecnia de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, y en su estudio el Comité estuvo constituido por las organizaciones y personas naturales siguientes:

Geotecnia Ambiental Ltda.
Instituto Nacional de Normalización, INN

Laboratorio de Ensayos LEPUCV S.A.

Alvaro Gorena I.
Ana María Alvarado S.
Manuel Jara M.
Gabriel Villavicencio A.

NCh3261

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Raúl Espinace A.

Juan H. Palma G.

Servicio Nacional de Geología y Minería, Sernageomin

Pamela Valenzuela T.

Nelson Ramírez M.

Los Anexos A, B, C y D no forman parte de la norma, se insertan sólo a título informativo.

Esta norma ha sido aprobada por el Consejo del Instituto Nacional de Normalización, en sesión efectuada el 20 de enero de 2012.

Depósitos de relave - Control de compactación con penetrómetro dinámico ligero

0 Introducción

0.1 Los penetrómetros dinámicos ligeros son una alternativa para realizar el control de compactación de depósitos de relaves, durante la fase de operación o construcción.

0.2 Este control de compactación es el especificado en el Decreto Supremo N° 248 "Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves Ministerio de Minería". Publicado en el Diario Oficial el 11 De abril de 2007.

0.3 El empleo de los penetrómetros dinámicos ligeros, tiene como objetivo determinar el grado de compactación resultante del proceso empleado, para la construcción de un depósito de relaves.

0.4 Las funciones de control propuestas permiten considerar la variabilidad inherente a los materiales depositados y al proceso aplicado para la construcción del muro resistente de un depósito de relaves.

0.5 En cláusula 5 se describen los métodos de ensayo y las funciones de control propuestas.

0.6 En cláusula 6 se describen los equipos y dispositivos de medición, y las metodologías de calibración de los aparatos.

0.7 En cláusula 7 se describe la forma de realizar el ensayo.

0.8 En cláusula 8 se establece el contenido mínimo del informe de ensayos.

0.9 En cláusula 9 se indica la metodología de interpretación de los resultados.

1 Alcance y campo de aplicación

1.1 Esta norma establece procedimientos de ensayo para realizar el control de compactación en depósitos de relaves, durante la fase de operación o construcción, mediante el empleo de penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable o penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante.

1.2 Esta norma se aplica a los ensayos realizados con penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable o penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante.

1.3 Los ensayos con penetrómetros dinámicos ligeros se deben realizar de acuerdo a las condiciones que se establecen en 7.2.

2 Referencias normativas

Los documentos siguientes son indispensables 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).

NCh179	<i>Mecánica de suelos - Símbolos, unidades y definiciones.</i>
NCh1516	<i>Mecánica de suelos - Determinación de la densidad en el terreno - Método del cono de arena.</i>
NCh1532	<i>Mecánica de suelos - Determinación de la densidad de partículas sólidas.</i>
NCh1534/1	<i>Mecánica de suelos - Relaciones humedad/densidad - Parte 1: Métodos de compactación con pisón de 2,5 kg y 305 mm de caída.</i>
NCh1534/2	<i>Mecánica de suelos - Relaciones humedad/densidad - Parte 2: Métodos de compactación con pisón de 4,5 kg y 457 mm de caída.</i>
LVN 105	<i>Laboratorio Nacional de Vialidad - Análisis granulométrico.</i>

3 Simbología

A	sección de la punta, expresada en centímetros cuadrados (cm^2).
$DMCS$	densidad máxima compactada seca, obtenida del ensayo de energía de compactación estándar o el ensayo de energía de compactación modificado, expresada en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3).
d	diámetro de la punta, expresado en milímetros (mm).
d_t	diámetro exterior del tren de barras, expresado en milímetros (mm).
E	energía de hincado generada por el dispositivo, expresada en Joules (J).
e	penetración para cada golpe de martillo, expresada en milímetros (mm).
M	masa del martillo, expresada en kilogramos (kg).

N	índice de resistencia a la penetración.
L_1	longitud de la parte cilíndrica de la punta, expresada en milímetros (mm).
L_2	longitud de la parte cónica de la punta, expresada en milímetros (mm).
$\%PS$	porcentaje de compactación referido al ensayo de energía de compactación Estándar ¹⁾
$\%PM$	porcentaje de compactación referido al ensayo de energía de compactación Modificado ²⁾
P	masa de la cabeza de golpeo, del tren de barras y de la punta, expresada en kilogramos (kg).
q_d	resistencia dinámica de punta, expresada en megapascuales (MPa).
q_{d0}	resistencia dinámica de punta a nivel superficial, expresada en megapascuales (MPa).
q_{d1}	resistencia dinámica de punta en profundidad, expresada en megapascuales (MPa).
q_{dL}	valor límite de resistencia dinámica de punta, expresado en megapascuales (MPa).
q_{dR}	valor de referencia de resistencia dinámica de punta, expresado en megapascuales (MPa).
W_{op}	humedad óptima de compactación, obtenida desde los ensayos de energía de compactación Estándar o Modificado, expresada en porcentaje (%).
W_n	humedad natural, obtenida desde el método del cono de arena, expresada en porcentaje (%).
Z	profundidad, expresada en metros (m).
Z_c	profundidad crítica, expresada en metros (m).
α	ángulo de la punta, expresado en grados ($^{\circ}$).
γ_d	densidad seca, expresada en gramos por centímetro cúbico (g/cm ³).

1) El ensayo de energía de compactación estándar es también conocido como Ensayo Proctor (ver NCh1534/1).

2) El ensayo de energía de compactación modificado es también conocido como Ensayo Proctor Modificado (ver NCh1534/1).

4 Términos y definiciones

Para los propósitos de esta norma se aplican los términos y definiciones indicados en NCh179 y adicionalmente los siguientes:

4.1 grado de compactación: relación porcentual entre la densidad seca *in situ* (γ_d) y la densidad máxima seca compactada ($DMCS$), obtenida de los ensayos de energía de compactación estándar o de energía de compactación modificado, según se establece en NCh1534/1 y NCh1534/2, respectivamente

4.2 índice de resistencia a la penetración, N <penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante> número de golpes necesarios para hincar el penetrómetro a intervalos de profundidad constantes, previamente definidos según el tipo de equipamiento empleado

4.3 parámetros penetrométricos <penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable> : para un suelo homogéneo en relación a su naturaleza, humedad y densidad, y en ausencia de rozamiento lateral entre el tren de barras y la pared del sondaje, el penetrograma obtenido (ver 4.4) se caracteriza por los parámetros penetrométricos siguientes:

- a) resistencia dinámica de punta a nivel superficial (q_{d0}), corresponde a la resistencia del suelo al momento de comenzar la penetración;
- b) profundidad crítica (Z_c), a partir de la resistencia dinámica de punta a nivel superficial, q_{d0} , la señal penetrométrica aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor constante a una determinada profundidad, denominada de profundidad crítica (Z_c). La profundidad crítica depende del grado de compactación del material, del tamaño de las partículas y del diámetro de la punta;
- c) resistencia dinámica de punta en profundidad promedio, q_{d1} : corresponde al valor de la resistencia dinámica de punta promedio obtenida a partir de la profundidad crítica (Z_c).

Un penetrograma se puede esquematizar, en coordenadas semi-logarítmicas, considerando los parámetros q_{d0} , q_{d1} y Z_c (ver Figura 1).

Los parámetros penetrométricos q_{d0} , Z_c y q_{d1} se emplean para definir los valores de resistencia dinámica de punta (q_d), para realizar el control de compactación en función B (ver 5.2), según el grado de compactación especificado para la construcción del depósito de relaves.

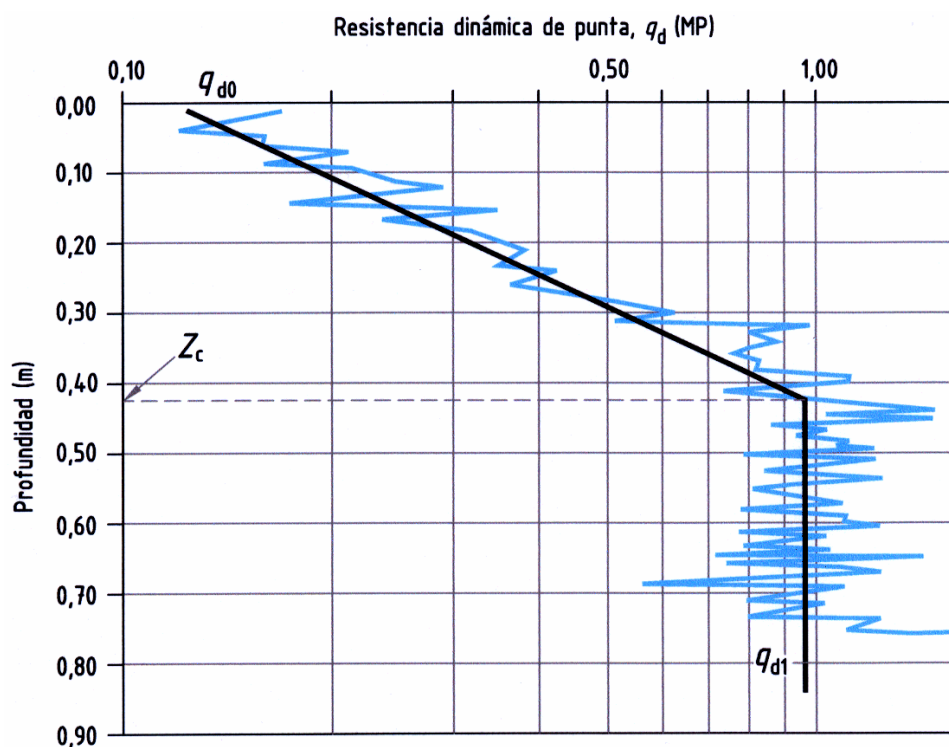


Figura 1 - Penetrograma característico para un material homogéneo definido a partir de q_{d0} , Z_c y q_{d1}

4.4 penetrograma o señal penetrométrica: curva de distribución de resistencia dinámica de punta (q_d) o del índice de resistencia a la penetración (N), expresada en función de la profundidad y graficada en el sistema de coordenadas cartesianas, según lo establecido en 7.3.1

4.5 resistencia dinámica de punta <penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable> : valor calculado por el sistema de adquisición de un penetrómetro, en función de la penetración de la punta, de la energía liberada por el dispositivo de hincado (martillo), de la conexión del tren de barras empleadas para penetración y del peso del equipo. La energía se calcula mediante la aplicación de la fórmula de hincado dinámica, conocida como la fórmula de los Holandeses [11] (ver 6.1.2)

4.6 valor de referencia de resistencia dinámica de punta, q_{dR} <penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable> : para una profundidad Z , el valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}) a la penetración, corresponde al valor promedio de la resistencia dinámica de punta (q_d) que equivale a la densidad o grado de compactación especificado

4.7 valor límite de resistencia dinámica de punta, q_{dL} <penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable> : para una profundidad Z , el valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) a la penetración, corresponde al valor límite por debajo del cual la resistencia dinámica de punta (q_d) no debe descender para verificar la densidad o grado de compactación especificado

5 Métodos de ensayo

5.1 Principios generales

5.1.1 El principio general de ensayo consiste en penetrar en el suelo un tren de barras provisto en su extremo de una punta metálica maciza, mediante la aplicación de una energía de hincado. En el extremo superior del tren de barras, la energía de hincado (E) generada por el dispositivo es aportada por el impacto de un martillo, de masa normalizada, sobre una cabeza de golpeo conectada al tren de barras. El impacto genera una onda de esfuerzo que se propaga hacia la punta generando de esta manera la penetración.

5.1.2 Con penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable, se registra de manera continua la penetración para cada golpe de martillo (e) alcanzada y la resistencia dinámica de punta (q_d) del suelo, mediante una adaptación de la fórmula de hincado dinámica (ver ecuación 1).

Estos penetrómetros permiten determinar de manera continua la resistencia dinámica de punta en función de la profundidad.

5.1.3 Con penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante, el martillo de masa normalizada impacta a la cabeza de golpeo desde una altura de caída constante, generando una energía de hincado teóricamente constante. De esta manera se obtiene la resistencia del suelo a la penetración, expresada como el índice de resistencia a la penetración (N), correspondiente al número de golpes promedio necesarios para penetrar un intervalo de profundidad previamente establecido, dependiendo del tipo de equipamiento empleado.

Estos penetrómetros permiten determinar el índice de resistencia a la penetración en función de la profundidad.

5.1.4 En depósitos de relaves los penetrómetros dinámicos ligeros se pueden emplear para:

- a) control de calidad, control de compactación de una capa recientemente compactada;
- b) control de aseguramiento, control de compactación post-construcción en profundidad de un conjunto de capas compactadas. Este control sólo es aplicable utilizando penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable;
- c) en el caso de realizar controles de compactación a profundidades que excedan el alcance de un penetrómetro en particular, se debe realizar una excavación o antepozo que permita alcanzar la profundidad necesaria.

5.1.5 Mediante el empleo de penetrómetros dinámicos ligeros para control de calidad y de aseguramiento post-construcción en depósitos de relaves, se pueden evaluar los aspectos siguientes:

- a) espesor de una capa o de un conjunto de capas depositadas para la construcción del muro resistente (función A). Esta función sólo es aplicable empleando penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable;

- b) grado de compactación de una capa o de un conjunto de capas depositadas, considerando la variabilidad de las características físicas de las arenas de relaves, la densidad *in situ* y el estado hídrico asociado que presenta el material al momento de realizar el control (funciones B y C).

5.2 Funciones de control

5.2.1 Penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable

5.2.1.1 Función A. Verificación del espesor de capa.

En esta modalidad la morfología de la señal penetrométrica obtenida *in situ* se emplea para identificar el espesor de una capa compactada.

5.2.1.2 Función B. Verificación del grado de compactación para una capa o para un conjunto de capas (calibración en laboratorio).

Para la aplicación de la función B, el penetrograma obtenido *in situ* se compara con una curva de valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) y una curva de valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}), ambas obtenidas a partir de la calibración en laboratorio del equipo empleado (ver Anexo C).

La calibración se realiza considerando el grado de compactación especificado y el estado hídrico *in situ* referido al porcentaje de humedad óptima de compactación (ver Tabla B.1).

5.2.1.3 Función C. Verificación del grado de compactación para una capa o un conjunto de capas (calibración *in situ*).

La función C se puede aplicar considerando los métodos siguientes:

- a) el penetrograma obtenido *in situ* se compara con una curva de valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) y una curva de valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}), obtenidas de un análisis estadístico de regresión simple de los penetrogramas de referencia obtenidos en la cancha de calibración. Los límites de predicción necesarios para determinar la curva de valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) se determinan a 90% o 95% de confianza.
- b) el penetrograma obtenido *in situ* se compara de manera visual con un conjunto de penetrogramas de referencia, obtenidos de una serie de ensayos de penetración realizados en una cancha de calibración. Esta cancha se debe construir empleando las mismas arenas de relave depositadas en el muro resistente en el sector a controlar y considerando las especificaciones de construcción previamente establecidas (número de pasadas, espesor de capa y humedad de compactación);

5.2.2 Penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante

Función B. Verificación del grado de compactación para sólo una capa (calibración en laboratorio)

La evaluación de la compactación se realiza a partir de la comparación del penetrograma obtenido *in situ* con la curva de calibración obtenida en laboratorio, definida para determinar la variación de N en función del grado de compactación referido al ensayo de energía de compactación Estándar (ver NCh1534/1) o el ensayo de energía de compactación Modificado (ver NCh1534/2), para el estado hídrico *in situ* referido al porcentaje de humedad óptima de compactación (ver Tabla B.1).

5.2.3 Penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable y penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante

5.2.3.1 Para la aplicación de las funciones definidas para ambos penetrómetros se debe considerar:

- a) en el caso de la función B, es necesario conocer previamente la densidad de las partículas sólidas, la distribución granulométrica, la densidad máxima seca compactada, la humedad óptima de compactación y el estado hídrico de las arenas de relaves al momento de realizar el ensayo de penetración *in situ*;
- b) en el caso de la función C, es necesario conocer las especificaciones establecidas para la construcción del muro resistente de un depósito de relaves (grado de compactación, número de pasadas, espesor de capa y la humedad de compactación definida del ensayo de energía de compactación estándar o el ensayo de energía de compactación modificado).

5.2.3.2 En Tabla 1 se presenta un resumen de aplicabilidad de las funciones definidas, con el objeto de realizar el control de compactación en depósito de relaves, mediante el empleo de penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable y penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante.

Tabla 1 - Resumen de funciones aplicables para penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable y penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante

Penetrómetro dinámico ligero	Función			Calibración	
	A	B	C	Laboratorio	<i>In situ</i>
A energía variable	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
A energía constante	No	Sí	No	Sí	No

6 Equipos y dispositivos de medición

6.1 Penetrómetro dinámico ligero a energía variable

6.1.1 Equipo

El esquema que se presenta en Figura 2 muestra los diferentes elementos que constituyen un penetrómetro dinámico ligero a energía variable. Ver también Anexo A.

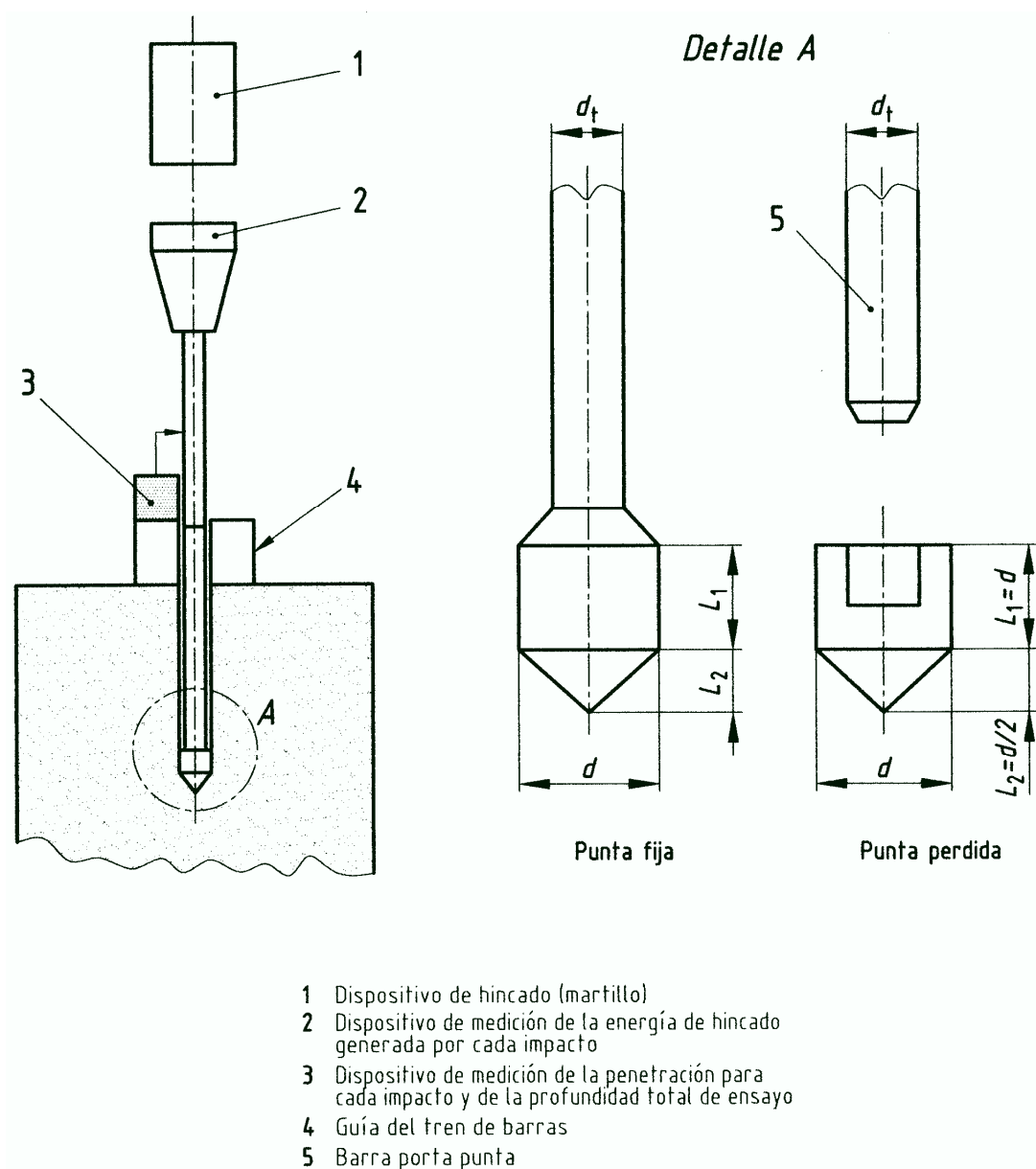


Figura 2 - Esquema del equipo de penetración dinámica a energía variable

6.1.2 Principio para determinar la resistencia dinámica de punta (q_d)

La energía variable del penetrómetro dinámico ligero se genera por el impacto de un martillo sobre una cabeza de golpeo, conectada al extremo superior de un tren de barras provisto de una punta metálica maciza, empleada como herramienta de penetración. El equipo mide para cada golpe de martillo, la energía transmitida por el sistema y la penetración del tren de barras. La resistencia a la penetración se calcula a partir de una adaptación de la fórmula de hincado dinámica:

$$q_d = E \times \frac{M}{A \times e \times (M + P)} \quad (1)$$

6.1.3 Dispositivo de hincado

El dispositivo de hincado corresponde a un martillo de masa uniforme.

6.1.4 Tren de barras y puntas

6.1.4.1 El ensamble de las barras mediante atornillado, genera un conjunto que actúa de manera rígida durante la penetración.

6.1.4.2 Para puntas perdidas, el diámetro exterior del tren de barras (d_l) debe ser menor al diámetro de la punta (d) dividido por 1,4.

6.1.4.3 Para puntas fijas, el diámetro exterior del tren de barras (d_l) debe ser menor al diámetro de la punta (d) dividido por 1,1.

6.1.4.4 Las puntas deben ser de acero, o de un material similar, deben tener geometría cónica (ver Figura 2). Las puntas pueden ser fijas o perdidas (ver Anexo A). Las puntas fijas se pueden emplear para profundidades de hasta 2 m. Las puntas perdidas se pueden emplear para profundidades de hasta 6 m.

6.1.5 Dispositivos de medición

6.1.5.1 El equipo mide para cada golpe de martillo:

- a) la energía de hincado aportada al sistema en dirección de la penetración; y
- b) la penetración del tren de barras.

6.1.5.2 La documentación técnica del equipo debe especificar el principio de medición para la energía de hincado y de penetración, además de las modalidades de calibración y verificación periódica de los captores del dispositivo de medición.

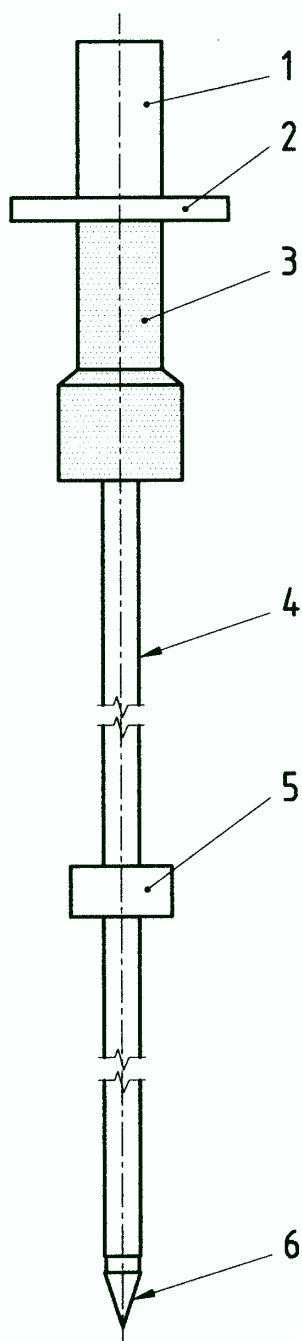
6.1.6 Precisión

La precisión de la resistencia dinámica de punta (q_d) y de la profundidad (Z), se indican en Tablas A.3 y A.4, respectivamente.

6.2 Penetrómetro dinámico ligero a energía constante

6.2.1 Equipo

El esquema que se presenta en Figura 3 a) muestra los diferentes elementos que constituyen un penetrómetro dinámico ligero a energía constante. Ver también Anexo A.



- 1 Empuñadura
- 2 Placa tope
- 3 Martillo
- 4 Barra guía
- 5 Cabeza de golpeo
- 6 Punta

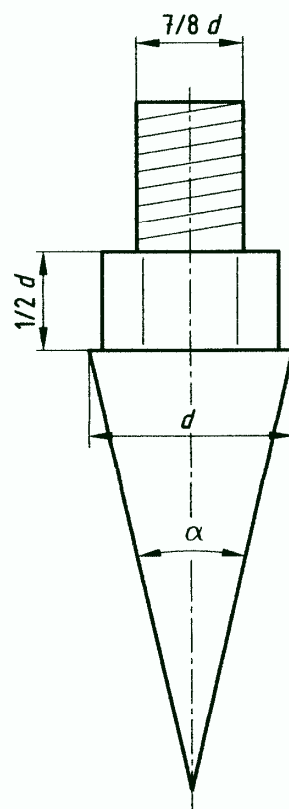


Figura 3 a) - Esquema del equipo de penetración dinámica a energía constante

Figura 3 b) - Punta tipo

6.2.2 Principio para obtener el índice de resistencia a la penetración

El hincado del tren de barras se realiza mediante la aplicación de una energía potencial teóricamente constante, generada por el impacto de un martillo de masa normalizada, en caída libre desde una altura constante. De esta manera se obtiene la resistencia del suelo a la penetración de la punta cónica, expresada como el índice de resistencia a la penetración (N), correspondiente al número de golpes promedio necesarios para penetrar de manera continua intervalos de profundidad constantes.

6.2.3 Dispositivo de hincado

El dispositivo de hincado corresponde a un martillo de masa normalizada.

6.2.4 Tren de barras y puntas

6.2.4.1 El ensamble de las barras mediante atornillado, genera un conjunto que actúa de manera rígida durante la penetración.

6.2.4.2 Para puntas fijas el diámetro exterior del tren de barras (d_t) debe ser menor al diámetro de la punta (d) dividido por 1,14.

6.2.4.3 La parte cónica de la punta tiene una longitud (L_2) igual a 1,07 veces el diámetro de la punta [ver Figura 3 b)]. La parte superior, de geometría cilíndrica y longitud (L_1), es igual a la mitad del diámetro de la punta (ver Anexo A).

6.2.5 Precisión

Actualmente no existen estudios o investigaciones realizadas con el objeto de determinar la precisión de las medidas del índice de resistencia a la penetración (N) en función de la profundidad.

6.3 Controles y verificaciones periódicas

Durante el período de utilización del equipo se debe controlar mensualmente o cada 100 m lineales de penetración, lo que ocurra primero, los aspectos siguientes:

- a) rectitud e hilos de las barras;
- b) desgaste de las puntas;
- c) estado de la cabeza de golpe;
- d) ensayo de los dispositivos empleados para la medición de la energía de hincado y de la penetración, según instrucciones del fabricante para el caso de los penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable.

6.4 Calibración del equipo

La calibración previa del equipo sólo es necesaria en el caso de las funciones de control B y C.

- a) los penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable se calibran en laboratorio (función B) o *in situ* mediante la construcción de canchas de calibración (función C);
- b) los penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante se calibran en laboratorio (función B).

En Anexo B se describen los métodos de calibración.

6.5 Cancha de calibración

6.5.1 La cancha de calibración se construye empleando los mismos materiales depositados en el sector del muro resistente del depósito de relaves a controlar, la misma maquinaria de distribución y compactación, además, de las especificaciones técnicas establecidas para la construcción (humedad de compactación, espesor y número de pasadas).

6.5.2 Las características de la cancha de calibración son:

- a) Configuración geométrica mínima:

La configuración geométrica mínima de una cancha de calibración debe estar conformada por un ancho igual a dos veces el ancho de la maquinaria de compactación y un largo igual a $\frac{2}{3}$ de longitud central del tramo compactado.

- b) Materiales depositados:

- i) realizar una identificación geotécnica en laboratorio de los materiales depositados considerando determinar: la densidad de las partículas sólidas, la distribución granulométrica, la densidad máxima seca compactada y la humedad óptima de compactación;
- ii) para cada capa se debe determinar la densidad *in situ* mediante la realización de tres mediciones, utilizando el método de control de referencia (ver NCh1516).

- c) Registro:

Se debe registrar el origen de las arenas de relave y la condición de empleo.

d) Número de puntos:

En una cancha de calibración se deben realizar en los mismos puntos emplazados de manera equidistante, al menos cinco ensayos de penetración y cinco ensayos de cono de arena (ver NCh1516). Los ensayos de penetración y de cono de arena deben estar distanciados al menos 0,5 m.

7 Realización del ensayo

7.1 Preparación del ensayo

7.1.1 Inspección visual

Antes de comenzar el ensayo se deben realizar las verificaciones siguientes:

- a) examen visual de la rectitud de las barras a emplear;
- b) angularidad de las puntas;
- c) estado de los hilos extremos de las barras.

7.1.2 Posicionamiento de los puntos de ensayo

El posicionamiento de los puntos de ensayo se debe definir considerando un sistema de referencia fijo, existente en el muro resistente de un depósito de relaves (por ejemplo, sistema de empalizado o estacado fijo) o bien mediante el empleo de algún sistema de geo-referenciación.

7.1.3 Estado particular de la capa a controlar

En el caso que las capas a controlar presenten una condición irregular, producto de la terminación del proceso de compactación, antes de realizar el ensayo se debe excavar un antepozo y proceder a enraizar con el objeto de obtener una superficie horizontal.

7.2 Ensayo

a) Ejecución del proceso de hincado

Para la correcta ejecución del proceso de hincado se deben verificar los aspectos siguientes:

- i) que la barra portapunta se encuentre en la dirección del ensayo después de cada adición de una barra y durante el proceso de hincado. En el caso que la barra pierda su verticalidad, el ensayo se detiene y se reinicia en un punto cercano. La inclinación máxima aceptada es de 10° con relación a la dirección establecida al inicio del ensayo;

- ii) que las barras sean cuidadosamente atornilladas hasta su bloqueo;
 - iii) que en el caso de los penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable, la energía de hincado sea regulada de manera que la penetración por golpe se encuentre entre 0,10 cm y 2 cm;
- b) Detención del hincado

El hincado se detiene cuando se alcanza alguna de las condiciones siguientes:

- i) una vez alcanzada la profundidad máxima de penetración previamente establecida;
 - ii) en un punto *duro*, la penetración máxima por golpe es menor que 1 mm durante cinco golpes sucesivos, para el caso de penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable;
- c) Inspección visual posterior al ensayo

Después de la extracción del tren de barras, examinar visualmente la rectitud de las barras, estado de los extremos de las barras y de los hilos, además del atornillado.

7.3 Resultados

7.3.1 Trazado del penetrograma

7.3.1.1 Penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable

Para el trazado del penetrograma, la escala vertical descendente está graduada en unidades de longitud (metros o centímetros), con graduaciones intermedias adaptadas a la profundidad máxima de ensayo. La escala horizontal de la resistencia dinámica de punta (q_d) es logarítmica y creciente de derecha a izquierda.

7.3.1.2 Penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante

Para el trazado del penetrograma, la escala vertical descendente está graduada en unidades de longitud (metros o centímetros), con graduaciones intermedias adaptadas a la profundidad máxima de ensayo. La escala horizontal del índice de resistencia a la penetración (N) es natural y creciente de derecha a izquierda.

7.3.1.3 En ambos casos para controlar una misma zona, se recomienda que los gráficos se tracen considerando las mismas escalas.

7.3.2 Alisamiento de un penetrograma

Con el objeto de eliminar el *ruido de fondo* de la señal penetrométrica y la existencia de puntos anómalos, se recomienda realizar un tratamiento o alisamiento del penetrograma obtenido en terreno. El alisamiento es sólo aplicable para el caso de los penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable.

8 Informe de ensayo

8.1 El informe de ensayos, tanto para penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable como para penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante, debe contener al menos los datos siguientes:

- a) referencia a esta norma;
- b) tipo de equipo empleado y sus características principales (masa del martillo, diámetro de la punta, altura de caída, masa y longitud de cada barra);
- c) fecha de ensayo;
- d) nombre del laboratorio que realiza el ensayo;
- e) referencia y las coordenadas del ensayo;
- f) profundidad y ángulo de inclinación en relación al plano vertical;
- g) funciones de control empleadas (A, B, C).

Este informe debe contener además los datos específicos siguientes:

8.1.1 Para penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable

8.1.1.1 En función A, el espesor de capa

8.1.1.2 En función B

- a) penetrograma según el método de calibración seleccionado:
 - i) curvas límite y de referencia (para mayor información, ver Anexo B);
- b) especificar el grado de compactación establecido, las características físicas y los parámetros de estado de las arenas de relave (densidad de las partículas sólidas, distribución granulométrica, energía de compactación estándar o modificada, resultados).
 - i) nombre del laboratorio que ha realizado los ensayos de caracterización, además de la fecha de la extracción de las muestras y su emplazamiento;
 - ii) nombre del laboratorio que ha realizado los ensayos para determinar la densidad in-situ y el método empleado;
 - iii) nombre del laboratorio que ha efectuado la calibración el equipo empleado, estableciendo las curvas límite y de referencia (para mayor información, ver Anexo C);
 - iv) las condiciones de detención del ensayo (ver 7.2).

8.1.2 Para penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante:

En función B.

- a) penetrograma;
- b) curva de calibración;
- c) especificar el grado de compactación especificado, las características físicas y los parámetros de estado de las arenas de relave (densidad de las partículas sólidas, distribución granulométrica, energía de compactación estándar o energía de compactación modificado, resultados):
 - i) nombre del laboratorio que ha realizado los ensayos de caracterización, además de la fecha de la extracción de las muestras y su emplazamiento;
 - ii) nombre del laboratorio que ha realizado los ensayos para determinar el contenido de humedad de las arenas de relaves, en función de la profundidad y el método empleado;
 - iii) nombre del laboratorio que ha efectuado la calibración el equipo empleado, estableciendo las curvas de variación del índice de resistencia a la penetración (N) en función del grado de compactación referido al ensayo de energía de compactación estándar (ver NCh1534/1) o ensayo de energía de compactación modificado (ver NCh1534/2), para estado hídrico *in situ* referido al porcentaje de humedad óptima de compactación.

9 Interpretación de los resultados

9.1 Penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable

9.1.1 Utilización del penetrograma en función A

La función A sólo se puede emplear en el caso de ensayos verticales. La interpretación de los resultados se efectúa a partir de los penetrogramas obtenidos *in situ*, y consiste en determinar los espesores de las capas depositadas a partir de la morfología de señal penetrométrica obtenida (ver Figura 4), para posteriormente compararlos con los valores establecidos en las especificaciones técnicas de construcción.

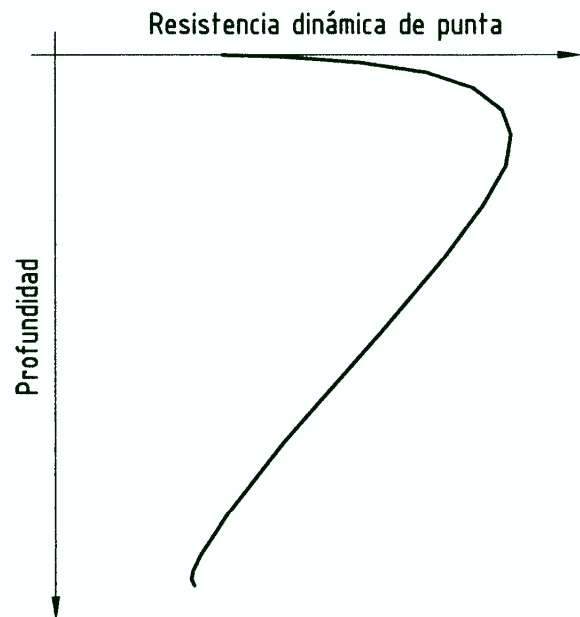


Figura 4 - Morfología simplificada de la señal penetrométrica obtenida en una capa compactada

9.1.2 Utilización del penetrograma en función B

En función B, la interpretación de resultados se realiza a partir de la comparación de los penetrogramas obtenidos *in situ* y las curvas de valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) y de valor referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}), asociadas a las características físicas de los materiales depositados, al grado de compactación especificado y al estado hídrico *in situ* al momento de realizar el ensayo.

La metodología empleada para la obtención de las curvas de valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) y de valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}) en laboratorio se presenta en Anexo C.

9.1.2.1 Interpretación

El grado de compactación resultante de la metodología de construcción empleada cumplirá con las especificaciones técnicas previamente definidas, dependiendo de su posición en relación a las curvas de valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) y del valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}) [ver Figuras 5 a) y 5 b)]. Para tal efecto se definen las tres zonas siguientes: de aceptación, de tolerancia y de rechazo.

- a) zona de aceptación, se encuentra a la derecha de la curva de valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}). Si el penetrograma se encuentra en esta zona el grado de compactación es mayor o igual que el valor especificado.

- b) zona de tolerancia, está comprendida entre valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) y el valor referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}). Si el penetrograma se encuentra en esta zona el grado de compactación se considera adecuado.
- c) zona de rechazo, se encuentra a la izquierda de la curva de valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}). Si el penetrograma es inferior al valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) el grado de compactación es insuficiente.

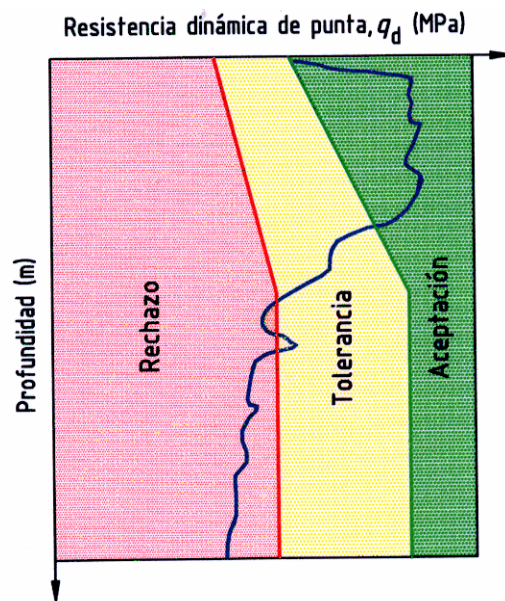


Figura 5 a) - Principio para el control de compactación empleando un penetrómetro dinámico ligero a energía variable

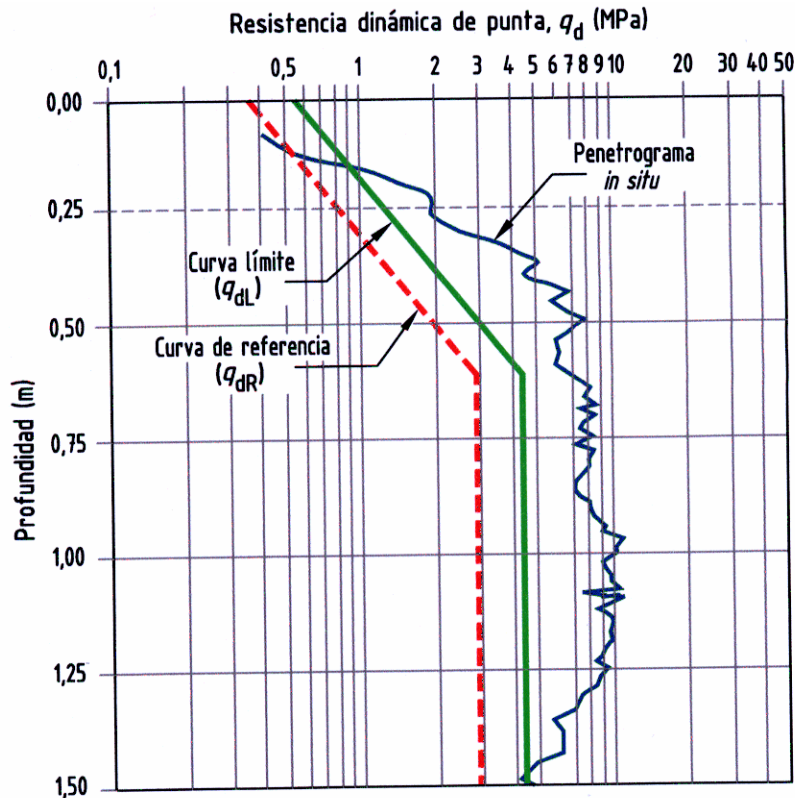


Figura 5 b) - Ejemplo de control de compactación a partir de un penetrograma *in situ*

9.1.2.2 Condiciones de aplicabilidad

La función B es aplicable si se cumplen las condiciones siguientes:

- se conocen la densidad de las partículas sólidas, la distribución granulométrica, la densidad máxima seca compactada, la humedad óptima de compactación y el estado hídrico de los materiales al momento de realizar el ensayo *in situ*;
- las curvas de valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) y de valor referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}) para los materiales depositados son definidas;

9.1.3 Utilización del penetrograma en función C

Los penetrogramas obtenidos en el sector de control se comparan con los penetrogramas de referencia obtenidos en una cancha de calibración de referencia *in situ*, construida al grado de compactación especificado para la construcción del muro resistente de arenas de relaves.

Para realizar el control de compactación en función C se pueden emplear dos tipos de interpretaciones.

9.1.3.1 Interpretación visual

Cada penetrograma del sector controlado se compara con el conjunto de penetrogramas obtenidos en la cancha de calibración, para observar:

- a) si el penetrograma se encuentra dentro del rango definido para los penetrogramas obtenidos en la cancha de calibración;
- b) si en profundidad la resistencia a la penetración dinámica es superior a la resistencia dinámica de punta (q_d). En la parte superior los resultados obtenidos se deben comparar a igual profundidad.

En el caso que un penetrograma indique la existencia de una condición heterogénea, es necesario realizar un nuevo ensayo en la zona dudosa, a una distancia aproximada de 1,0 m del ensayo precedente. Además, verificar que la variación de la resistencia dinámica de punta obtenida, no se deba a una causa externa al proceso de compactación. En este caso puede ser necesario la toma de una muestra para su caracterización geotécnica en laboratorio, para verificar la naturaleza y estado de las arenas depositadas.

9.1.3.2 Interpretación estadística

Un análisis de regresión simple de los penetrogramas de referencia permite determinar las curvas de valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) y de valor referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}), para realizar el control de compactación de manera análoga a la función B. La metodología propuesta para la obtención de las curvas de valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) y de valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}) es la siguiente:

- a) alisamiento de las señales penetrométricas obtenidas en la cancha de calibración;
- b) obtención de una señal penetrométrica promedio considerando la totalidad de los resultados obtenidos en la cancha de calibración. No considerar las señales que se encuentran fuera del rango de variación de resistencia dinámica de punta (q_d) definida por el conjunto de los resultados obtenidos;
- c) obtención de la curva de valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}), mediante un análisis de regresión simple para obtener la mejor curva de ajuste a los datos de resistencia dinámica de punta/profundidad;
- d) obtención de la curva de valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) considerando un límite de predicción comprendido entre un 90% a un 95% de confianza, en relación a la curva de valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}).

9.1.3.3 Condiciones de aplicabilidad

La función C es aplicable si se cumplen las condiciones siguientes:

- a) la densidad de las partículas sólidas, las características físicas y los parámetros de estado de los materiales que constituyen el sector a controlar son similares a los materiales empleados para la construcción de la cancha de calibración;
- b) El control del origen mineralógico, de las características físicas y de los parámetros de estado se debe realizar mediante la extracción de al menos tres muestras de arenas de relaves, por un grupo de ensayos de penetración realizado para el sector a controlar. El contenido de humedad se debe determinar cada dos ensayos de penetración realizados.

9.1.4 Expresión de resultados

El informe de resultados debe considerar al menos lo siguiente:

- a) plano de ubicación de la cancha de calibración, ensayos de penetración de referencia, ensayos de cono de arena, muestras extraídas, sector controlado y ensayos de penetración realizados para el control;
- b) penetrogramas de referencia;
- c) penetrogramas de control, considerando la mismas escalas empleadas para los penetrogramas de referencia, y su análisis en profundidad en relación a su posición respecto a las curvas de control (interpretación visual o estadística);

9.2 Penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante

La interpretación de resultados se realiza a partir de la comparación del índice de resistencia a la penetración (N) y la curva de calibración obtenida en laboratorio (N versus grado de energía de compactación estándar o de energía de compactación modificada), asociada a las características físicas de las arenas de relaves y estado hídrico *in situ* al momento de realizar el ensayo (ver Figura 6).

9.2.1 Método

La función B es aplicable si al momento de realizar en el ensayo de penetración *in situ*, se conocen la densidad de las partículas sólidas (ver NCh1532), la distribución granulométrica (ver LNV 105), la densidad máxima seca compactada, la humedad óptima de compactación y el estado hídrico del relave.

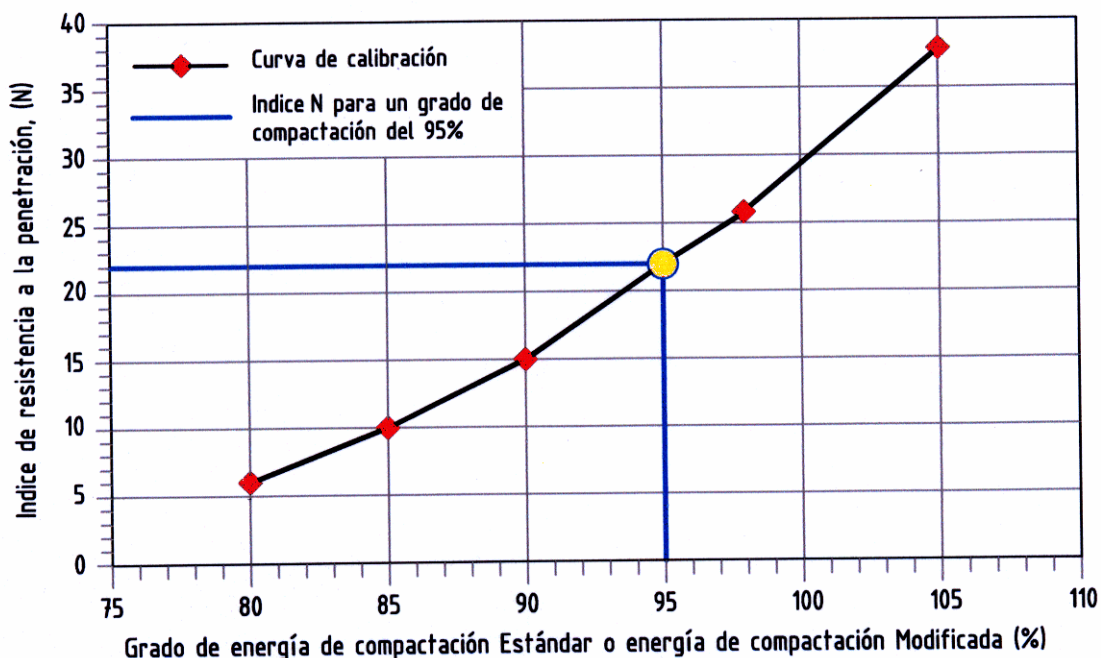


Figura 6 - Curva de calibración - Índice de resistencia a la penetración (N) en función del grado de energía de compactación estándar o de energía de compactación modificada

9.2.2 Interpretación

El control de compactación se realiza comparando el penetrograma obtenido *in situ* y el índice de resistencia a la penetración (N) asociado al grado de energía compactación especificado, obtenido de la curva de calibración en el laboratorio. En función del valor del par N y el grado de energía de compactación especificada (energía de compactación estándar o energía de compactación modificada) obtenidos en laboratorio, se definen dos zonas:

- zona de aceptación, se encuentra a la derecha del par. Si el penetrograma se encuentra en esta zona el grado de compactación es mayor o igual que valor especificado.
- zona de rechazo, se encuentra a la izquierda del par. Si el penetrograma se encuentra en esta zona, el grado de compactación es insuficiente.

Anexo A

(Informativo)

Características principales de los penetrómetros dinámicos ligeros

Tabla A.1 - Características principales de los penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable

Dispositivo	Unidad de medida	Símbolo	Valores		Tolerancias de fabricación
			Mínimo	Máximo	
Martillo	Masa (kg)	M	1	25	$\pm 1\%$
Cabeza de golpeo + barras al inicio del hincado	Masa (kg)	-	-	1,5 M	$\pm 2\%$
Barras	Largo (m)	L_t	0,25	2,0	$\pm 0,1\%$
	Masa/metro (kg/m)	-	-	2,5	$\pm 1\%$
	Diámetro exterior (mm)	d_t	-	$\leq 0,9 d$	$\pm 2\%$
Puntas	Diámetro exterior (mm)	d	15	62	$\pm 2\%$
	Area (cm ²)	A	2	30	-
	Longitud parte cónica (mm)	L_2	$d/2$	-	-
	Longitud parte cilíndrica (mm)	L_1	d	-	-

Tabla A.2 - Características principales de los penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante

Dispositivo	Unidad de medida	Símbolo	Valores		Tolerancias de fabricación
			Mínimo	Máximo	
Martillo	Masa (kg)	M	2,2	2,4	$\pm 4,3\%$
Cabeza de golpeo	Masa (kg)	-	-	-	-
Barras	Largo (m)	L_t	0,25	2,0	$\pm 0,1\%$
	Masa/metro (kg/m)	-	-	-	-
	Diámetro exterior (mm)	d_t	15,9	19,1	$\pm 9,1\%$
Puntas	Diámetro exterior (mm)	d	-	-	$\pm 2\%$
	Area (cm ²)	A	-	-	-
	Longitud parte cónica (mm)	L_2	$1,07 d$	-	-
	Longitud parte cilíndrica (mm)	L_1	$d/2$	-	-

La precisión de las medidas registradas por el equipo son:

- Resistencia dinámica de punta (q_d):

Tabla A.3 - Precisión de resistencia dinámica de punta (q_d)

Resistencia dinámica de punta (q_d) (MPa)	Precisión MPa
> 10	0,5
1 a 10	0,2
< 1	0,1

- Profundidad (Z):

Tabla A.4 - Precisión de profundidad (Z)

Profundidad Z (m)	Precisión (%)
> 10	± 0,5
1 a 10	± 0,2
< 1	± 0,2

NOTA - Para depósito de relaves la profundidad máxima de control puede alcanzar 6 m, en función de desarrollo del efecto de envejecimiento que experimenta este tipo de depósitos a lo largo del tiempo.

Anexo B (Informativo)

Métodos de calibración de penetrómetros dinámicos ligeros a energía variable o penetrómetros dinámicos ligeros a energía constante

B.1 Metodología general

Empleando el modelo característico de la variación de la resistencia dinámica de punta en función de la profundidad para un material homogéneo (ver Figura 1), se determina en laboratorio las curvas de valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) y de valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}) considerando las etapas siguientes:

- a) caracterización geotécnica del material, mediante la realización de los ensayos de distribución granulométrica (ver NCh1532), densidad de las partículas sólidas (ver NCh1532), y ensayo de energía de compactación Estándar (ver NCh1534/1) o ensayo de energía de compactación modificado (ver NCh1534/2);
- b) colocación del material en el molde de ensayo, preparando cinco probetas para cinco energías de compactación diferentes y tres estados hídricos para cada una de ellas;
- c) compactación de cada una de las probetas empleando un método que asegure una adecuada homogeneidad. El rango de energía de compactación debe estar comprendido entre 80% y 110% en relación a la energía de compactación estándar o energía de compactación modificada;
- d) para cada energía de compactación, es decir para cada una de las cinco probetas, realizar tres ensayos penetrométricos con el equipo a calibrar;
- e) determinación directa de la densidad seca mediante el método del cono de arena y el porcentaje de humedad;
- f) determinación de los parámetros penetrométricos q_{d0} , Z_c y q_{d1} . Las curvas se trazan después del análisis y tratamiento estadístico para cada densidad y porcentaje de humedad.

B.2 Selección del molde de calibración

Es necesario emplear un molde de dimensiones suficientes para que el ensayo de penetración se pueda considerar como efectuado en un medio semi-infinito.

El molde se debe construir en acero estructural soldable (A 47-24 ES), que permita la unión de piezas de sostenimiento y cerrajería. Tener 407 mm de diámetro exterior, 7,0 mm de espesor, 393 mm de diámetro interior, 850 mm de altura y poseer un collarín acoplable al molde de 150 mm de altura. La altura total del conjunto molde-collarín es de 1 m.

B.3 Variación del contenido de humedad

Para realizar el proceso de calibración de los materiales, considerando la posible variación de la humedad natural (W_n) al momento de la compactación, para cada una de las series de probetas construidas aplicando cinco energías de compactación diferentes, se deben definir dos estados hídricos clasificados como seco y medio, determinados en función de la humedad óptima de compactación (W_{op}) a energía de compactación estándar o energía de compactación modificada. En Tabla B.1 se presentan los rangos de valores para la humedad natural (W_n) en función de la humedad óptima de compactación (W_{op}).

Tabla B.1 - Clasificación del estado hídrico en función de la humedad natural (W_n) referida a la humedad óptima de compactación (W_{op})

Rango	Estado hídrico
$0,90 W_{op} \% \leq W_n \% < 1,10 W_{op} \%$	Medio
$0,60 W_{op} \% \leq W_n \% < 0,90 W_{op} \%$	Seco

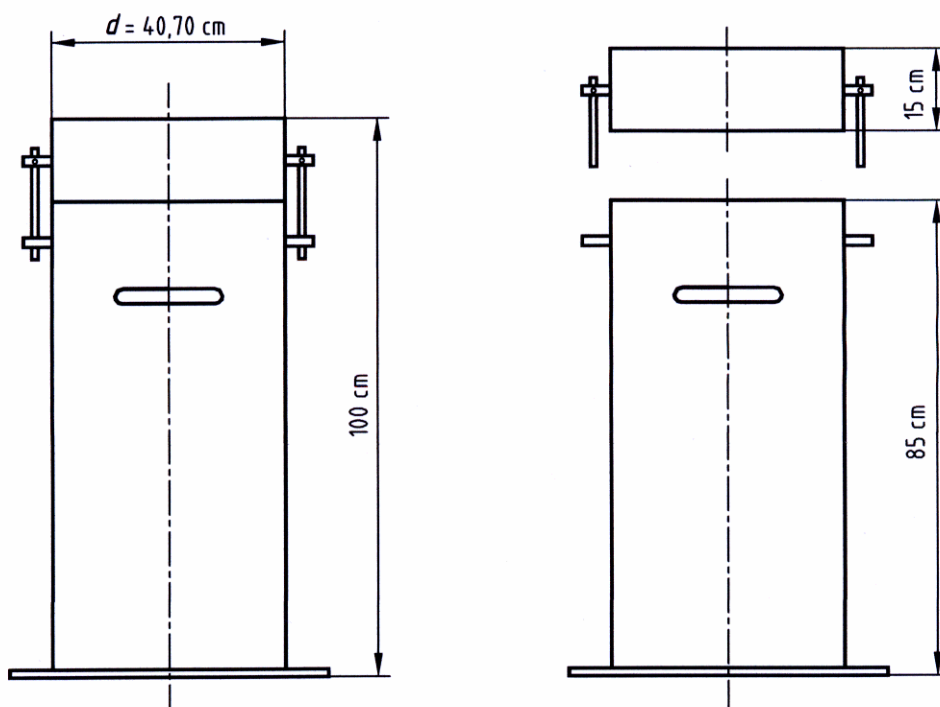
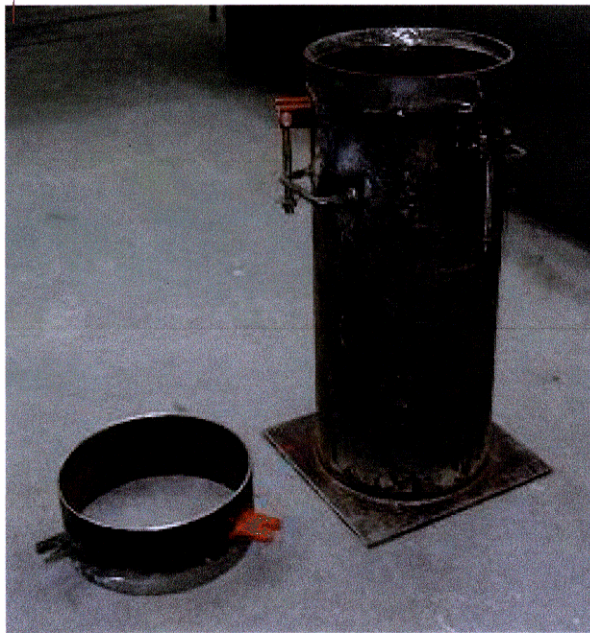


Figura B.1 - Molde de calibración Panda

B.4 Variación de la energía de compactación

Para un porcentaje de humedad definido, correspondiente a un estado hídrico en particular, se establecen cinco valores de densidad seca (γ_d), variando desde el estado más suelto (80%) hasta alcanzar un valor superior al máximo (110%), en relación al valor óptimo de energía de compactación estándar o de energía de compactación modificada. Los rangos de valores propuestos para la construcción de los moldes son los siguientes:

Tabla B.2 - Rango propuesto para el grado de compactación

Molde	1	2	3	4	5
%PS o %PM	80-85	85-90	90-95	95-100	100-110

B.5 Método de compactación del molde

El principio de compactación es similar al método empleado en el ensayo de energía de compactación estándar o modificado. Se preparan tres series de ensayos (estados hídricos: seco, y medio) para cinco energías de compactación diferentes. Para cada molde se debe determinar el contenido de humedad del material antes de su colocación. La compactación debe ser homogénea para alcanzar una densidad constante en el molde. Después de finalizar el ensayo, a diferentes niveles, se deben extraer al menos tres o cuatro muestras de material para determinar su contenido de humedad después del ensayo.

En general la compactación del molde se debe realizar de la manera siguiente:

- obtener una muestra de material. La cantidad mínima aproximada es de 600 kg;
- determinar la DMCS (g/cm^3) y la humedad óptima de compactación (W_{op}) del material;
- determinar el contenido de humedad de la muestra;
- obtener la humedad de compactación requerida mediante la aplicación de agua y la homogenización del material;
- determinar el material necesario para cada capa mediante:

$$M(g) = \text{DMCS} \times \alpha \times (1 + (W\%)) \times \text{Area molde} \times h$$

NCh3261

en que:

α = valor PS;

$W\%$ = humedad del material al momento de compactar;

h = altura de la capa compactada, expresada en centímetros (cm). Se recomiendan capas de 12 cm de espesor.

- f) depositar cada una de las capas cuidando de no perder material y esparciéndolo para que la placa de compactación se asiente de buena manera;
- g) compactar el molde: la compactación se debe realizar con un método que asegure una condición de homogeneidad. Una vez compactada cada capa, no olvidando escarificar su superficie, se debe determinar la altura real de la capa a través de cinco mediciones, cuidando de que la última se haga en el centro. La altura de cada capa se determina ya que se conoce la altura total del conjunto molde. Se recomienda que se compacten siete capas que logran una altura de 84 cm de material compactado;
- h) determinar la densidad mediante el método del cono de arena, a diferentes niveles al interior del molde.

B.6 Ensayos de penetración

Para cada serie de moldes, definidos para cinco energías de compactación y tres estados hídricos, se deben realizar tres ensayos de penetración dinámica ligera, separados entre sí a una distancia mínima igual a d , como se presenta en Figura B.2.

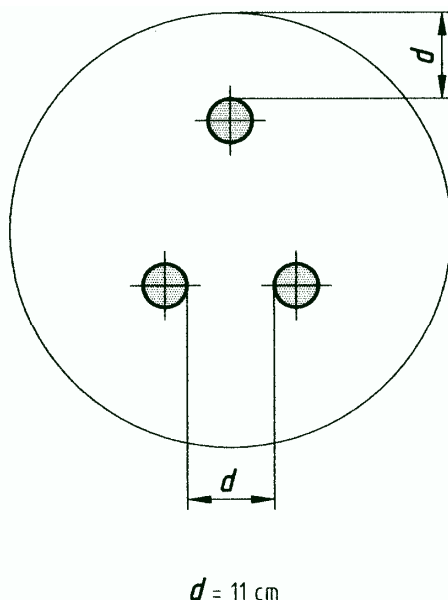


Figura B.2 - Esquema de separación de ensayos

Los penetrogramas obtenidos no deben diferir entre ellos por más de 10%, además, la señal penetrométrica debe presentar una forma tal que sea fácil determinar los parámetros penetrométricos q_{d0} , Z_c y q_{d1} . Si estas condiciones no están presentes, la serie de ensayos no es validada. En Figura B.3 se presenta de manera simplificada el proceso de compactación.

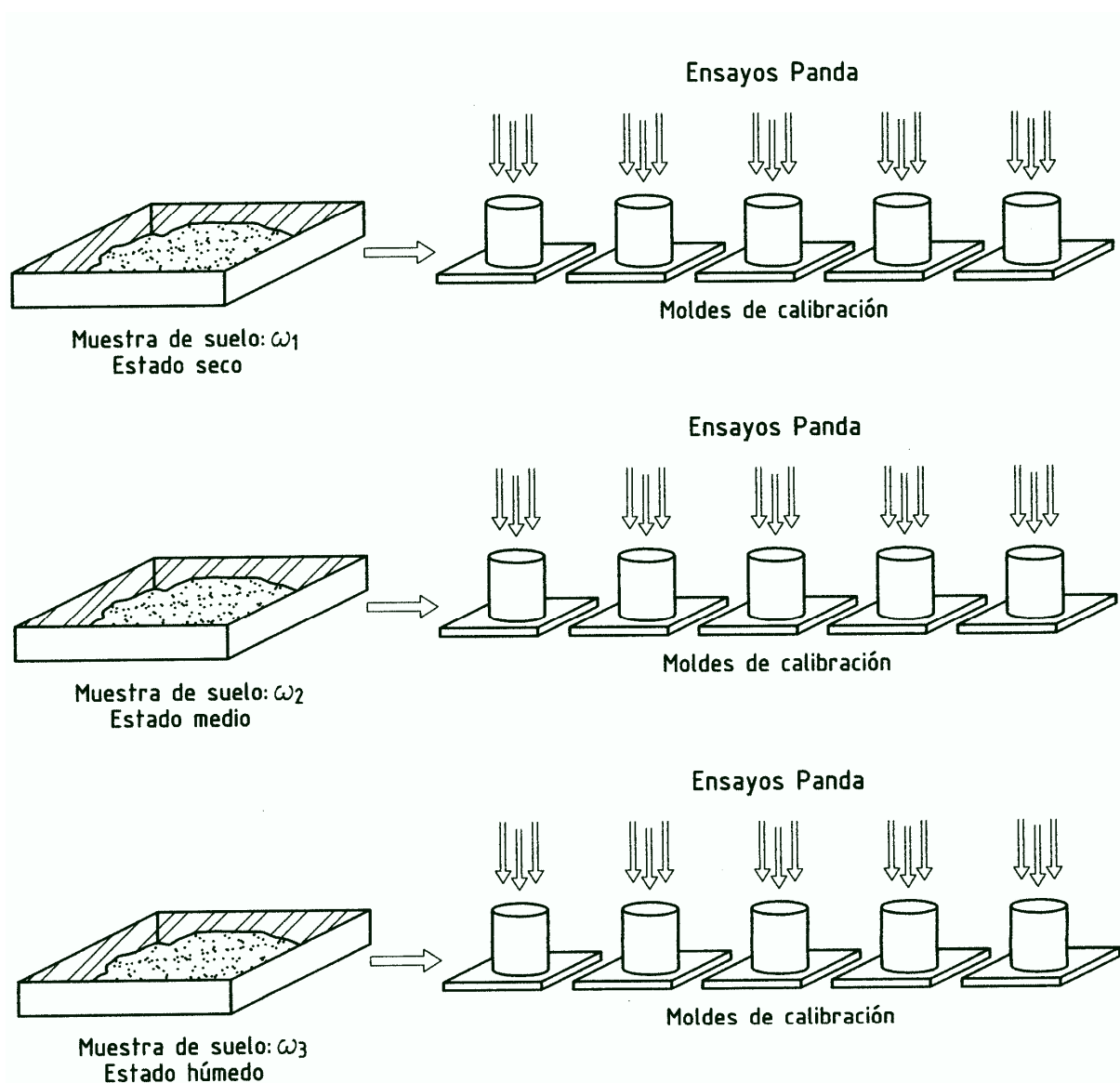


Figura B.3 - Esquema simplificado del proceso de calibración

Anexo C

(Informativo)

Penetrómetro dinámico ligero a energía variable - Interpretación de resultados en función B

C.1 Tratamiento de los datos

Para una serie de tres ensayos de penetración realizados en un mismo molde de calibración, se calcula el valor medio para cada parámetro q_{d0} , q_{d1} y Z_c . Ello respetando y verificando las condiciones de repetitividad de los penetrogramas obtenidos para estados de compactación consecutivos. Los límites de tolerancia adoptados se presentan en Tabla C.1.

Tabla C.1 - Tolerancia de repetitividad de ensayos de penetración en un mismo molde de calibración

Molde	1	2	3	4	5	Tolerancia de ensayos
γ_d (g/cm ³)	γ_{d1}	γ_{d2}	γ_{d3}	γ_{d4}	γ_{d5}	< 1,0%
q_{d0} (MPa)	q_{d0}	q_{d0}	q_{d0}	q_{d0}	q_{d0}	< 15,0%
q_{d1} (MPa)	q_{d1}	q_{d1}	q_{d1}	q_{d1}	q_{d1}	< 10,0%
Z_c (cm)	Z_c	Z_c	Z_c	Z_c	Z_c	< 20,0%

Para cada parámetro, empleando los cinco puntos obtenidos para los cinco niveles de compactación previamente definidos, se realiza un análisis de regresión simple con el objeto de adaptar la función logarítmica asociada a cada uno de los parámetros (ver Figuras C.1, C.2 y C.3). Las constantes α y β dependen del tipo de material.

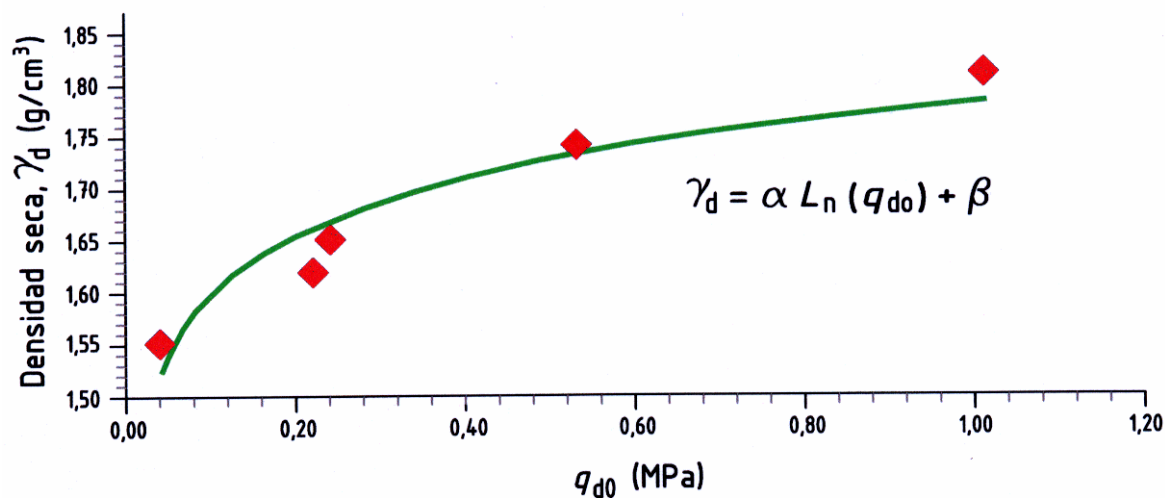


Figura C.1 - Relación entre la resistencia dinámica de punta a nivel superficial (q_{d0}) y la densidad seca (γ_d)

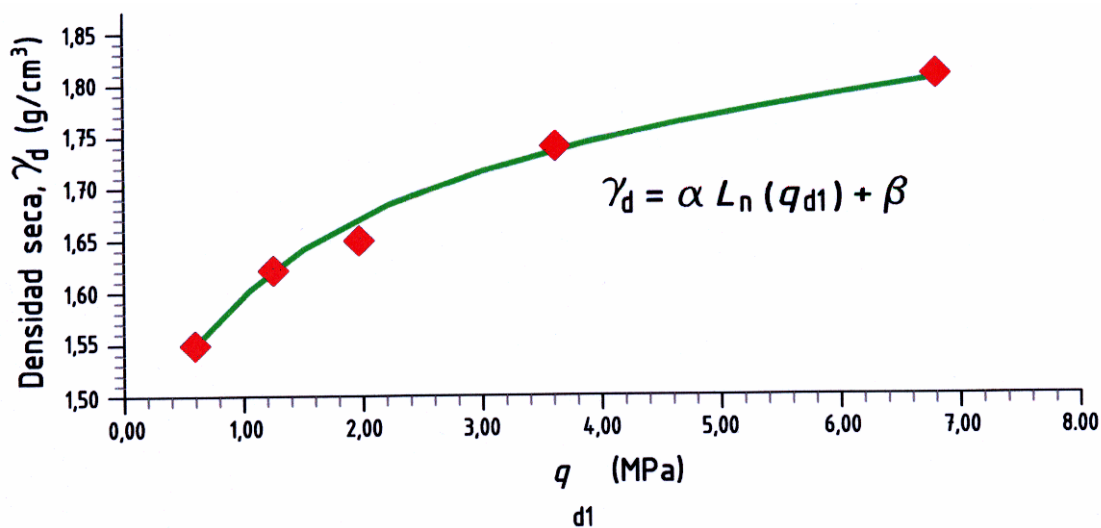


Figura C.2 - Relación entre la resistencia dinámica de punta en profundidad (q_{d1}) y la densidad seca (γ_d)

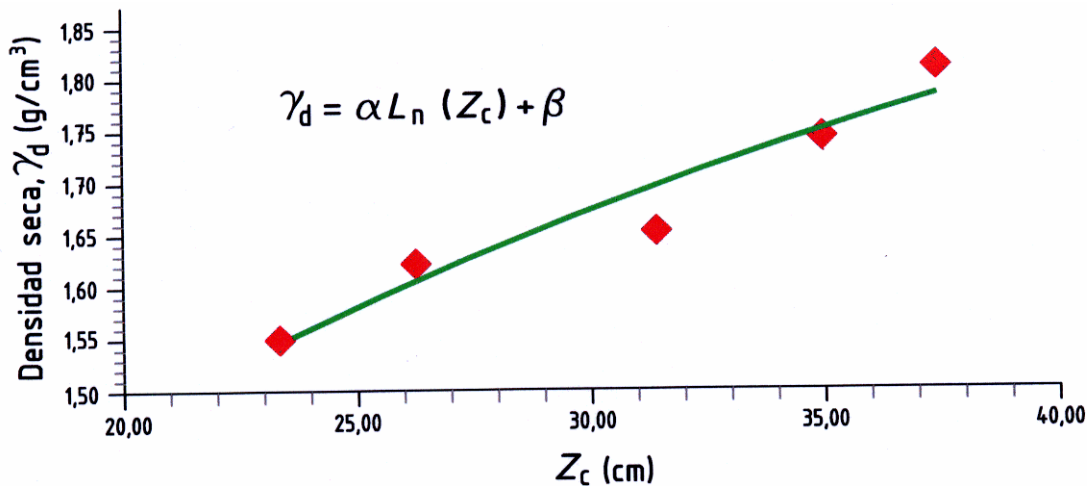


Figura C.3 - Relación entre la profundidad crítica (Z_c) y la densidad seca (γ_d)

C.2 Obtención de las curvas de valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) y de valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR})

a) Curva de valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR})

Establecidas las curvas $\gamma_d = f(q_{d0})$, $\gamma_d = f(q_{d1})$ y $\gamma_d = f(Z_c)$ y conocido el valor exigido para el control del grado de compactación, se traza (desde este valor en la ordenada) una recta hasta la intersección con la curva respectiva; $f(q_{d0})$, $f(q_{d1})$ y/o $f(Z_c)$. Desde el punto de intersección se proyecta perpendicularmente en sentido a la abscisa otra recta, la cual indicará el valor de q_{d0} , q_{d1} o Z_c en la intersección.

b) Curva de valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}):

La recta de valor límite de resistencia dinámica de punta (q_{dL}) es un porcentaje de la recta de valor de referencia de resistencia dinámica de punta (q_{dR}). Esta permite insertar en el proceso de control la variabilidad inherente al material y al proceso de compactación empleado.

Anexo D

(Informativo)

Bibliografía

- [1] Bacconnet C. et Breul P. (2006): *Banque de données de matériaux*. Informe 2006-MS-PB4, Contrato de Investigación. LGC/Sol Solution, Documento Interno.
- [2] Benz M.A. y Cancino P. (2005): *Control de la Calidad de Compactación y Estimación del Angulo de Fricción Interna de las Arenas de Relave con el Penetrómetro Ligero Panda*. Tesis para optar el título de Ingeniero en Construcción. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Chile.
- [3] Benz M.A. (2009): *Mesures Dynamiques lors du Battage du Pénétrömètre Panda 2*. Tesis Doctoral. Especialidad Ingeniería Civil. Universidad Blaise Pascal, Clermont II. Clermont-Ferrand. Francia.
- [4] Biarez J., Favre JL. (1977): *Statistical estimation and extrapolation from observations*. Reports of Organisers, IX ICSMFE, Tokyo, vol. 3 pp505-509.
- [5] Bustillo L. (1990): *Le contrôle de compactage des tranchées d'assainissement à l'aide d'un pénétromètre dynamique léger*. Proyecto de fin de estudios de Ingeniero CUST Génie Civil, Clermont-Ferrand. Francia.
- [6] Cambou B. (1987). *Mécanique des milieux granulaires: l'approche microstructurale*. Rhéologie des géomatériaux, éd. F. Darve, presse E.N.P.C, 1987, pp. 261-278.
- [7] Chaigneau L. (2002). *Caractérisation des Milieux Granulaires de Surface à l'aide d'un Penetrometre*. Tesis Doctoral. Especialidad Ingeniería Civil. Universidad Blaise Pascal, Clermont II. Clermont-Ferrand. Francia.
- [8] Decreto Supremo N° 248. Of. 2007: Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves.
- [9] Deplagne F. (1991): *Analyse structurale d'essais de pénétration*. Proyecto de Master. Universidad Blaise Pascal, Clermont-Ferrand. Francia.
- [10] Favre, JL (1980). *Milieu continu et milieu discontinu: Mesure statistique indirecte des paramètres rhéologiques et approche probabiliste de la sécurité*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Pierre et Maire Curie, Paris 6.
- [11] Frazer, B. (1971) *Fórmula de Hínca Dinámica*. Revista de Obras Públicas. 118, Tomo I (3080), pp. 977-990.

- [12] Gourvès R., (1991). *Le PANDA: Pénétrromètre dynamique léger à énergie variable pour la reconnaissance des sols*. Laboratoire LERMES. Université Blaise Pascal.
- [13] Gourvès R. y Richard B. (1995): *Le pénétrromètre dynamique léger PANDA*. Proceeding of ECSMFE. Copenhagen, Denmark, pp. 83-88.
- [14] Gourvès R. y Zhou S. (1997): *The in situ characterization of the mechanical properties of granular media with the help of penetrometer*. 3rd International conference on micromécanique of granular media. Duram, pp. 57-60.
- [15] Magnan, J.P.: *Les méthodes statiques et probabilistes en mécanique des sols*. Presses des Ponts et Chaussées.
- [16] Seyman E. (2003). *Laboratory Evaluation of In situ Tests as Potential Quality Control/Quality Assurance Tools*. Thesis Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. Department of Civil and Environmental Engineering. Bogazici University, Istanbul, Turkey.
- [17] UNE ENV 1997-3. *Eurocódigo 7. Proyecto Geotécnico. Parte 3: Proyecto Asistido por Ensayos de Campo*.
- [18] Vermorel J.M. (2006). *Utilisation de la géostatistique pour l'étude de la stabilité des digues de stériles miniers*. Proyecto de fin de estudios de Ingeniero CUST Génie Civil, Clermont-Ferrand. Francia.
- [19] Villavicencio, G. (2009). *Aplicación del penetrómetro PANDA para el control de compactación y análisis de estabilidad mecánica en tranques de relaves chilenos*. Tesis Doctoral. Universidad Blaise Pascal. Francia.
- [20] Zhou, S. (1997). *Caractérisation des sols de surface à l'aide du pénétrromètre dynamique léger à énergie variable type PANDA*. Tesis Doctoral. Especialidad Ingeniería Civil. Universidad Blaise Pascal, Clermont II. Clermont-Ferrand. Francia.
- [21] Decreto Supremo N° 248. *Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves*. Ministerio de Minería. Publicado en el diario Oficial del día 11 de abril de 2007.
- [22] ASTM D 6951 - 03: *Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*.
- [23] ASTM D 7308 - 08. *Standard Test Method for Soil Compaction Determination Depths Using 5-lb (2,3 kg) Dynamic Cone Penetrometer*.

- [24] *NCh 1517/1.Of1979 Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 1: Determinación del límite líquido.*
- [25] *NCh 1517/2.Of1979 Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 2: Determinación del límite plástico.*
- [26] *NCh 1562 Mecánica de suelos - Determinación de la densidad de las partículas sólidas.*
- [27] *XP- 94-105 Sols, Reconnaissance et essais - Contrôle de la qualité du compactage - Méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable - Principe et méthode d'étalonnage du pénétromètre - Exploitation des résultats - Interprétation*