

Suelos: Reconocimiento y pruebas

Control de calidad de compactación

**Método del penetrómetro dinámico de energía variable —
Principio y método de calibrado del penetrómetro —
Explotación de resultados — Interpretación**

E : Soils : investigation and testing — Inspection of compaction quality —
Method using a variable energy dynamic penetrometer — Principle and method
for calibrating the penetrometer — Explotation of results — Interpretation
D : Boden : Erkundung und Prüfungen — Kontrolle der Verdichtungsqualität —
Dynamische mit ungleichmäßiger Energie — Prinzip und Eichungsverfahren
des Penetrometers — Ergebnisauswertung — Auslegung

Norma experimental

Publicada por AFNOR en mayo de 2000.

Las observaciones relativas a la presente norma experimental se deberán remitir a AFNOR antes del 31 de diciembre de 2002.

Correspondencia

En la fecha de publicación del presente documento, no hay ningún trabajo europeo o internacional que trate el mismo tema.

Análisis

El presente documento define para el control de compactación de suelos un método de prueba con penetrómetro dinámico de energía variable.

Descriptores

Técnica Thésaurus Internacional: suelo, prueba, control de calidad, compactación, penetración, medidas, instrucciones, aparato de prueba, instrumento de medida, calibrado, características, condiciones de uso.

Modificaciones

Correcciones

Calzadas excavaciones — Ejecución de excavaciones

BNSR-CTT

Miembros de la comisión de normalización

Presidente: Sr. BOLLE

Secretaría: Sr. JOUBERT — BNSR

Sr.	ABDO	CIMBETON
Sr.	BERRAUD	BOUYGUES
Sr.	BOLLE	INGENIERO ASESOR
Sr.	BUFALO	VALERIAN
Sr.	GANDILLE	GUINTOLI
Sr.	GUIMONT	SETRA-BNSR
Sr.	LAVEAU	SNCF
Sr.	MANOJLOVIC	CEMAGREF
Sr.	POILPRE	RAZEL
Sr.	PREL	EDF-TEGG
Sr.	RAYNAUD	AEROPUERTOS DE PARÍS
Sr.	RINCENT	RINCENT BTP SERVICES
Sr.	SCHAEFFNER	LCPC
Sr.	SMERECKI	AFNOR

Con la participación como peritos de

Sr.	BIGOT	LABORATOIRE REGIONAL des PONTS et CHAUSSEES de PARIS EST.
Sr.	GOURVES	CUST-LERMES CLERMONT FERRAND
Sr.	MERIAUX	CEMAGREF AIX EN PROVENCE
Sr.	MOLLIER	SCETAURROUTE GRENOBLE
Sr.	MOREL	CER — ROUEN
Sr.	DE PILLOT	CETE DE LYON

Índice

	Página
1	Campo de aplicación 5
2	Referencias normativas 5
3	Definiciones — Terminología — Símbolos 6
4	Principio de la prueba y del método de verificación 9
4.1	Función A 9
4.2	Función B 9
4.3	Función C 9
5	Equipo y dispositivos de medida 10
5.1	Esquema de principio del aparato 10
5.2	Descripción 11
5.2.1	Descripción y principio del método 11
5.2.2	Dispositivo de hinca 11
5.2.3	Varillas de hinca 11
5.2.4	Puntas 11
5.2.5	Dispositivo de medida 11
6	Instrucciones 12
6.1	Realización de la prueba 12
6.1.1	Preparación de la prueba 12
6.1.2	Ejecución de la prueba 12
6.1.3	Control después de cada sondeo 12
6.2	Controles y verificaciones periódicos 13
6.3	Resultados 13
6.3.1	Trazado del penetrograma 13
7	Informe de prueba 13
8	Calibrado del aparato 14
9	Utilización de los resultados — Interpretación 14
9.1	Utilización del penetrómetro en función A 14
9.1.1	Método 14
9.1.2	Expresión de los resultados 15
9.2	Utilización del penetrómetro en función B 16
9.2.1	Explotación de los resultados por el método por rectas de referencia 16
9.2.2	Explotación de los resultados por el método semi-probabilista 20
9.3	Utilización del penetrómetro en función C 20
9.3.1	Método 20
9.3.2	Expresión de los resultados 22
Anexo A (informativo) Principales características de los penetrómetros dinámicos de energía variable 24	
Anexo B (informativo) Presentación de los resultados 25	

Índice (fin)

Página

Anexo C (informativo) Método de calibrado del penetrómetro dinámico de energía variable en laboratorio		26
C.1	Recordatorio y generalidades	26
C.2	Presentación general del método	26
C.3	Elección del molde de pruebas.....	27
C.4	Clasificación del material.....	27
C.5	Margen de variación del contenido de agua	27
C.6	Variación de la energía de compactación	28
C.7	Colocación y compactación en el molde.....	28
C.8	Prueba penetrométrica	28
C.9	Tratamiento de datos	29
C.9.1	Método por establecimiento de rectas límite y de referencia (determinación de los valores q_L y q_R) ...	29
C.10	Método semi-probabilista	29
Anexo D (informativo) Explotación en función B de los resultados del penetrómetro dinámico de energía variable según el método semi-probabilista		30
D.1	Definiciones y terminología específicas del método	30
D.1.1	Resistencia a la penetración dinámica: valor límite (para un material clasificado)	30
D.1.2	Resistencia a la penetración dinámica: valor de referencia (para un material clasificado)	30
D.1.3	Catálogo de relaciones $\rho_d = f^{-1}(q)$	31
D.2	Explotación de los resultados e interpretación	32
D.2.1	Principio	32
D.2.2	Método	32

1 Campo de aplicación

El presente documento trata de los ensayos con penetrómetro dinámico aplicados al control de calidad en compactación de materiales, sin tratar o tratados con cal.

Hace referencia a los penetrómetros dinámicos que funcionan con energía variable y están equipados con un dispositivo de medida que permite calcular la resistencia a la penetración dinámica, en función de la profundidad.

El presente documento se aplica al control de la compactación de terraplenes ordinarios, incluidas concretamente la obras de carácter rodado, ferroviario o hidráulico (construcción de presas y diques de tierra), y al de los terraplenes de excavaciones y zanjas.

El ensayo es limitado en profundidad en función de la naturaleza de los materiales atravesados y de los equipos utilizados, y por las condiciones de hincas indicadas en el punto 6.1.2.2.

El método permite utilizar los penetrómetros dinámicos en una o más de las siguientes funciones:

- evaluar el espesor de las capas o tongadas (función A);
- **verificar que se alcanza el objetivo de densificación buscado** (función B). En tal caso, hay que clasificar los materiales empleados según la norma NF P 11- 300, conocer los objetivos de densificación (porcentaje de la densidad en la mejor situación Proctor o referencia a los objetivos q₂, q₃, q₄, tal como se definen en la norma NF P 98-331 — en 6.2.5) y el estado de humedad de los materiales en el momento de las pruebas de control;
- verificar que la compactación se ajusta a lo obtenido en los ensayos de referencias específicos en la obra (función C).

2 Referencias normativas

El presente documento incluye por referencia fechada o sin fechar disposiciones de otras publicaciones. Esas referencias normativas se mencionan en los lugares oportunos en el texto y a continuación se enumeran las publicaciones. Para las referencias fechadas, las enmiendas o revisiones posteriores de alguna de las publicaciones sólo se aplican a este documento si han sido incorporadas por enmienda o revisión. Para las referencias sin fechar se aplica la última edición de la publicación a la que se hace referencia.

NF P 11-300, Ejecución de las excavaciones — Clasificación de los materiales utilizables en la construcción de los terraplenes y las capas de forma de infraestructuras de carretera.

NF P 11-301, Ejecución de las excavaciones — Terminología.

NF P 94-049-1, Suelos: Reconocimiento y pruebas —Determinación del contenido de agua ponderal de los materiales

— 1ª Parte: Método de desecación en el horno micro-ondas.

NF P 94-049-2, Suelos, Reconocimiento y pruebas — Determinación del contenido de agua ponderal de los materiales

— 2ª Parte: Método de la placa de calentamiento o de los paneles radiantes.

NF P 94-050, Suelos, Reconocimiento y pruebas — Determinación del contenido de agua ponderal de los materiales — Método para secado por calor.

XP P 94-063, Suelos, Reconocimiento y pruebas — Control de la calidad de la compactación — Método del penetrómetro dinámico de energía constante — Principio y método de calibrado penetrodensitógrafos — Explotación de resultados — Interpretación.

NF P 94-093, Suelos, Reconocimiento y pruebas — Determinación de las referencias de compactación de un material — Ensayo Proctor normal — Ensayo Proctor modificada.

NF P 98-231-1, Pruebas relativas a las calzadas — Comportamiento frente a la compactación de los materiales no tratados con aglutinantes hidrocarbonados — 1ª parte: Prueba Proctor modificada adaptada a las gravas y arenas utilizadas en los cimientos de calzadas.

NF P 98-231-2, Pruebas relativas a las calzadas— Determinación del comportamiento frente a la compactación de los materiales no tratados con aglutinantes hidrocarbonados — 2ª parte: Ensayo de compactación con prensa de corte giratorio (PCG).

NF P 98-231-3, Pruebas relativas a las calzadas— Determinación del comportamiento frente a la compactación de los materiales no tratados con aglutinantes hidrocarbonados — 3ª parte: Determinación de la masa volúmica máxima de referencia y de la dificultad de compactación por prueba de vibro-compresión con parámetros controlados (VCPC).

NF P 98-331, Calzadas y dependencias — Zanjas: apertura, terraplenado, reparación.

3 Definiciones — Terminología — Símbolos

Para las necesidades del presente documento se aplican los siguientes términos y definiciones.

3.1

Resistencia a la penetración dinámica

La resistencia a la penetración dinámica q es el valor calculado por el sistema de adquisición del penetrómetro, en cada golpe de la masa de golpeo, en función del hundimiento de la punta y de la energía suministrada en el cabezal de barra, por aplicación de la fórmula de hinca, llamada de los Holandeses.

3.2

Penetrograma

El penetrógrama es la curva de la distribución de la resistencia a la penetración dinámica q en función de la profundidad z , en el sistema de coordenadas y siguiendo los principios de trazado definidos en 6.3.1

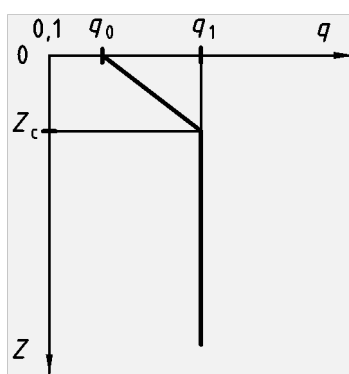
3.3

Profundidad crítica

En un suelo homogéneo (naturaleza, contenido de agua y densidad) y a falta de rozamiento lateral, la resistencia a la penetración dinámica aumenta desde la superficie para estabilizarse a partir de una profundidad crítica, en un valor determinado. La profundidad crítica depende del estado de compacidad del material, del tamaño de las partículas y del diámetro de la punta.

Un penetrógrama se puede esquematizar, en coordenadas semi-logarítmicas, en una relación bilineal con tres parámetros:

(Escala logarítmica)



- q_0 Resistencia en superficie
- q_1 Resistencia en profundidad
- z_c Profundidad crítica.

Figura 1 — Penetrógrama

3.4

Resistencia a la penetración dinámica para un material clasificado:: valores particulares

3.4.1

Valor límite

El valor límite q_L de la resistencia a la penetración dinámica es, a una profundidad determinada Z , el valor mínimo a partir del cual q no debe seguir bajando para comprobar que se ha llegado al nivel de densidad deseada ρ_{min} (función B)

3.4.2

Valor de referencia

El valor de referencia q_R de la resistencia a la penetración dinámica es, a una profundidad determinada z , el valor medio en torno al cual se sitúa q cuando la densidad corresponde a un valor medio prescrito ρ_{med} (función B)

La utilización de q_R es una ayuda a la interpretación. Completa la utilización de q_L .

3.5

Objetivos de densificación

Se definen por referencia a la prueba Proctor normal o modificada en la norma NF P 98-331

3.6

Casos tipo para un aparato determinado

Cada caso se define por un objetivo de densificación y una clasificación del material, en naturaleza y estado según la norma NF P 11-300, o para los materiales elaborados (total o parcialmente triturados) por una dificultad de compactación DC1, DC2 ó DC3. Ésta viene determinada por las pruebas en la norma NF P 98-231-2 o la norma NF P 98-231-3, o por referencia a un material conocido

La denominación del material, identificado geotécnicamente, se puede sustituir en la clasificación cuando se considera en particular (véase Artículo 8)

3.7

Catálogo de casos (función B)

El catálogo de casos (función B) es el conjunto de valores q_L y q_R resultantes del calibrado de un aparato de características precisadas, en los distintos casos tipo. El método de obtención de los valores q_L y q_R se detalla en el Artículo 8

3.8

Catálogo de relaciones $\rho_d = f^{-1}(q)$

El aparato también se puede calibrar según un método semi-probabilista (véase Artículo 8 et Anexo C). En tal caso se dispone de un catálogo de relaciones (obtenidas por regresión) (siendo ρ_d la densidad seca del material) combinadas con sus husos de confianza, teniendo como entradas la clase del material y su estado de humedad en el momento de la prueba penetrométrica

3.9

Símbolos

- A es la sección de la punta (expresada en metros cuadrados)
- a es la diferencia entre el valor límite de la resistencia q_L y el valor medido q (expresado en mega pascales)
- b es la diferencia entre el valor límite de la resistencia q_L y el valor límite de referencia q_R (expresado en mega pascales)
- d es el diámetro de la punta (expresado en milímetros)
- d_t es el diámetro exterior de las varillas de hincas (expresado en milímetros)
- D_{ci} es la dificultad de compactación

E	es la energía aportada al sistema (expresada en julios)
e	es el espesor prescrito de la capa (expresado en metros)
e'	es el hundimiento plástico (expresado en metros)
F	es la frecuencia de los espesores excedentarios (expresada en porcentaje)
f'	es la frecuencia de los espesores excedentarios por nivel de sobre-espesor (expresada en porcentaje)
h	es la profundidad controlada (expresada en metros)
L ₁	es la anchura de la parte cilíndrica de la punta (expresada en milímetros)
L ₂	es la anchura de la parte cónica de la punta (expresada en milímetros)
M	es la masa de golpeo (expresada en kilogramos)
N	es el número de pruebas del penetrómetro dinámico
h	es el número de pases del compactor
P	es la masa del cabezal de batido + varillas + punta (expresada en kilogramos)
q _i	es el objetivo de densificación
q	es el valor de la resistencia a la penetración dinámica (expresada en mega pascales)
q ₀	es el valor de la resistencia a la penetración dinámica en superficie (expresada en mega pascales)
q ₁	es el valor de la resistencia a la penetración dinámica en profundidad (expresada en mega pascales)
q _L	es el valor límite de la resistencia a la penetración dinámica (expresada en mega pascales)
q _R	es el valor de referencia de la resistencia a la penetración dinámica (expresada en mega pascales)
q _a	es el valor de la resistencia a la penetración dinámica detectada en la parte inferior de la capa (expresada en mega pascales)
q _b	es el valor de la resistencia a la penetración dinámica detectada en la parte superior de la capa subyacente (expresada en mega pascales)
q' _m	es el valor medio de las q para el conjunto de la hinca de un penetrógrama de control (expresado en mega pascales)
q' _a	es el valor de q _a en la parte inferior de cualquier de las capas de un penetrógrama de control (expresado en mega pascales)
q _m	es el valor de la media de las resistencias q de un penetrógrama de referencia para el conjunto de la hinca sobre un número entero de capas (expresada en mega pascales)
$\overline{q_m}$	es el valor de la media de las q _m de los distintos penetrógramos de referencia (expresada en mega pascales)
σ(q _m)	es la diferencia tipo calculada a partir de los valores individuales q _m
$\overline{q_a}$	es el valor de la media de las q _a en la parte inferior de las distintas capas de los penetrógramos de referencia (expresada en mega pascales)
σ(q _a)	es la diferencia tipo correspondiente a la media anterior
V	es la velocidad de hinca (expresada en metros por segundo)

W_{opt}	es el contenido de agua en estado óptimo Proctor normal (expresado en porcentaje)
Z	es la profundidad (expresada en metros)
Z_c	es la profundidad crítica (expresada en metros)
r	es el valor de la densidad seca del material (expresada en toneladas por metro cúbico)
$\rho_{\text{mín}}$	es el valor mínimo de la densidad seca del material (expresada en toneladas por metro cúbico)
ρ_{med}	es el valor medio de la densidad seca del material (expresada en toneladas por metro cúbico)
ρ_{OPN}	es el valor de la densidad seca en el estado óptimo Proctor normal (expresado en toneladas por metro cúbico)
ρ_{REF}	es el valor de la densidad seca de referencia (expresada en toneladas por metro cúbico)

4 Principio de la prueba y del método de verificación

a) Principio de la prueba

El principio de la prueba consiste en meter una punta en el material, por hincas de una sarta de varillas. En el cabezal del tren de varillas, la energía de hincas se obtiene del golpe de un martillo. Esa energía se transmite en parte a la punta que, con cada golpe, va a penetrar una determinada profundidad en el suelo, variable según la resistencia del suelo a la penetración dinámica.

b) Principio del método de verificación de la calidad de la compactación

El método consiste en interpretar el penetrógrama según las tres funciones que se indican a continuación:

4.1 Función A

En la función A, los contrastes de la variación de la resistencia a la penetración dinámica en la transición de las capas se utilizan para apreciar los espesores compactados.

4.2 Función B

En esta función, es necesaria la identificación de los materiales realmente utilizados según la norma NF P 11-300 así como el conocimiento de su estado de humedad en el momento de la prueba.

En la función B, el penetrógrama se compara, para los valores requeridos de densidad seca, con los valores q_L y q_R extraídos del catálogo de calibrado específico del aparato:

- bien catálogo de casos tipo sometidos a prueba, si se utiliza el método de calibrado estableciendo rectas límite y de referencia (véase en 9.2);
- o bien catálogo de relaciones $\rho = f^{-1}(q)$, si se utiliza el método de calibrado por aproximación semi-probabilista ρ (véase Anexo D).

4.3 Función C

En la función C, los penetrogramas de la parte controlada se comparan con la población de los penetrógramos obtenido con el mismo aparato en una plancha de referencia específica en el taller. Las condiciones de reutilización de los materiales deben ser idénticas a las recomendadas para la parte controlada.

La función C se puede utilizar en todos los casos, en particular si el catálogo de casos o de relaciones

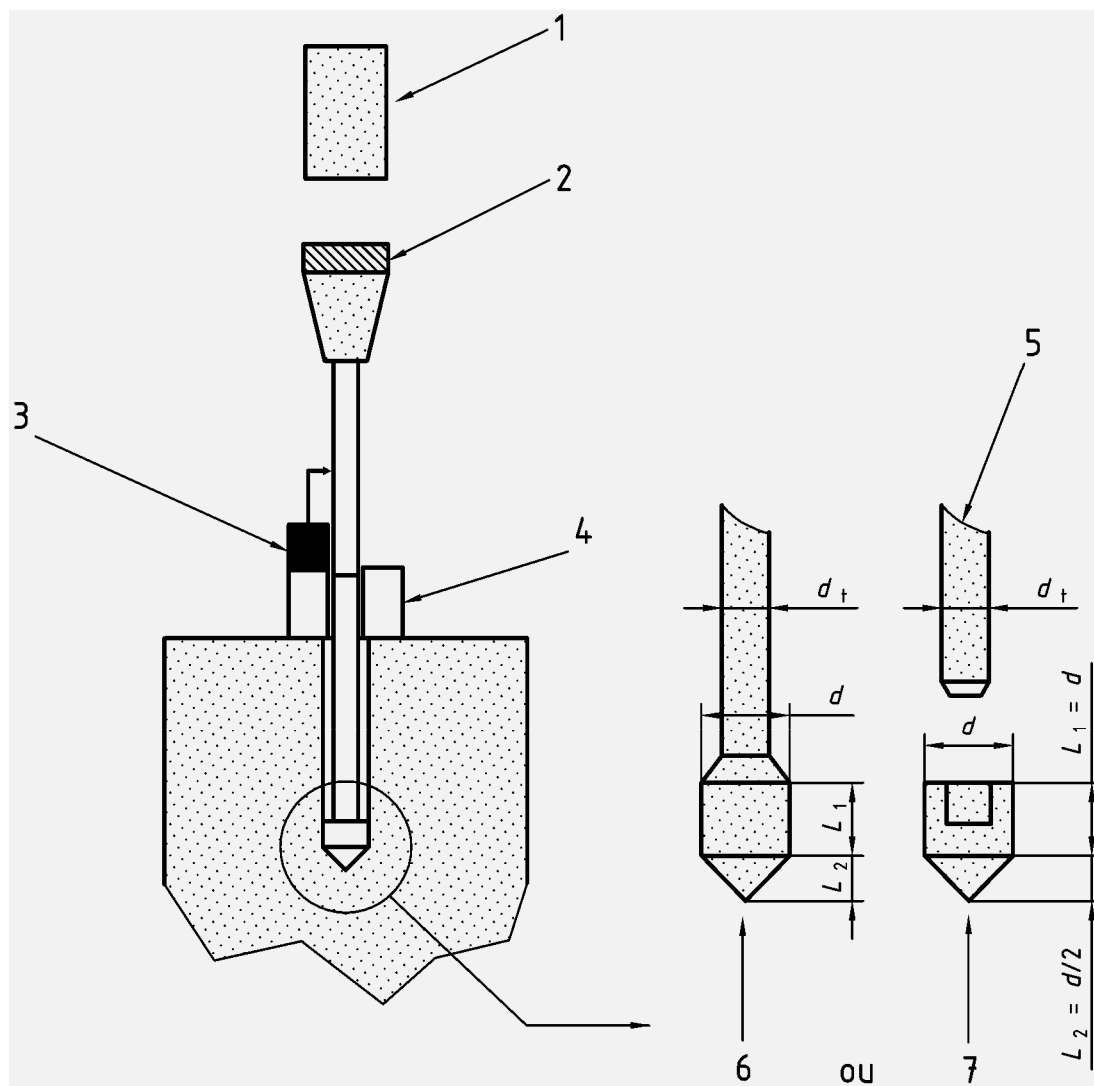
$$\rho = f^{-1}(q)$$

(función B) no contiene la clase del material controlado, o bien no refleja el carácter singular de un material.

5 Equipo y dispositivos de medida

5.1 Esquema de principio del aparato

El esquema de la Figura 2 muestra los distintos elementos que forman el penetrómetro dinámico de energía variable.



- | | | | |
|---|--|---|----------------------|
| 1 | Dispositivo de hinca (martillo) | 4 | Guía de las varillas |
| 2 | Dispositivo de medición d e la energía proporcionada en cada impacto | 5 | Varilla porta-punta |
| 3 | Dispositivo de medición: | 6 | Punta fija |
| — | hundimiento de la punta con cada golpe | o | |
| — | profundidad alcanzada por la punta | 7 | Punta perdida |

Figura 2 — Esquema del aparato

5.2 Descripción

A continuación se presentan las características del aparato, y en el Anexo A se presentan las tolerancias y los límites de utilización.

5.2.1 Descripción y principio del método

La energía variable del penetrómetro dinámico se desprende del choque de un martillo sobre un cabezal de hincas solidario de un tren de varillas equipado con una punta de penetración. El aparato mide con cada golpe, por una parte la energía suministrada al sistema en la dirección del hundimiento, y por otra parte el hundimiento del tren de varillas.

La resistencia a la penetración dinámica se calcula a partir de la “fórmula de los holandeses”:

$$q = E \frac{M}{Ae' (M + P)}$$

La aplicación de esta fórmula de hincas supone:

- que el suelo tiene un comportamiento plástico perfecto durante la penetración;
- que el rozamiento lateral sobre el tren de varillas es despreciable;
- que el conjunto de la energía suministrada es totalmente transmitido a la punta por el dispositivo de hincas, considerando el golpe sin ningún rozamiento

Por último, se debe poder descuidar la presión intersticial en el suelo, por lo que no se debe utilizar el aparato en los suelos sensibles al agua saturados (véase NF P 11-300).

5.2.2 Dispositivo de hincas

El dispositivo de batido forma parte del aparato. En concreto, el martillo tiene una masa fija y es específica en cada aparato.

5.2.3 Varillas de hincas

El diámetro exterior d_t debe ser menor que el diámetro de la punta d dividido por 1,4 para las puntas perdidas, y por 1,1 para las puntas fijas.

Su unión por atornillado da lugar a un tren de varillas rígidamente unido durante la penetración.

5.2.4 Puntas

Las puntas son cónicas (véase Figura 2). Pueden estar fijadas rígidamente a la varilla inferior (puntas fijas) para las auscultaciones de poca profundidad (1 m a 3 m dependiendo de la naturaleza del suelo).

La parte cónica tiene una anchura (L_2) igual a la mitad del diámetro de la punta (véase Figura 2) y está coronada por una parte cilíndrica de una anchura (L_1) igual al diámetro de la punta.

Se utilizan dos tipos de puntas terminadas en una parte cónica (véase Anexo A) :

- las puntas perdidas;
- las puntas fijas.

5.2.5 Dispositivo de medida

El aparato mide con cada golpe:

- la energía de hincas suministrada al sistema en la dirección del hundimiento;
- el hundimiento del tren de varillas.

La documentación técnica del aparato deberá precisar el principio de medición de esos dos tamaños así como las modalidades de calibrado y de verificación periódica de los captadores del dispositivo de medida.

6 Instrucciones de uso

6.1 Realización de la prueba

6.1.1 Preparación de la prueba

6.1.1.1 Verificación del material antes de empezar

En la ficha de prueba se verifican y mencionan los siguientes elementos:

- rectitud de las varillas utilizadas (examen visual);
- elección del diámetro de punta;
- estado de los fileteados del extremo.

6.1.1.2 Marcación del punto de medición

El emplazamiento del sondeo se marca en un plano acotado. Para controlar los terraplenes en proceso de montaje, la cota del cabezal del sondeo también se deberá indicar en el plano.

6.1.1.3 Caso particular de estructura tratada en parte superior

En caso de que exista una estructura muy resistente en la parte superior del terraplén probado, es necesaria la ejecución previa a la prueba de perforación vertical en un diámetro de al menos 1,5 veces el diámetro de punta. Conviene tener en cuenta, en su caso, las posibles perturbaciones provocadas por la perforación del prefijo, en la parte superior de la zona de terraplén a controlar.

6.1.2 Ejecución de la prueba

6.1.2.1 Ejecución de la hinca

Se exige que se verifique que:

- a) en el momento de la instalación y a continuación en cada añadido de varilla, la varilla porta-punta se encuentra en la dirección de sondeo deseada y sigue estándolo durante la hinca. En caso de que la varilla se desvíe del ángulo de sondeo, la prueba se interrumpe y vuelve a empezar en un punto vecino. La inclinación máxima tolerada es de 10° con respecto a la dirección deseada para el sondeo;
- b) las varillas están cuidadosamente atornilladas (y bloqueadas) unas a otras;
- c) la energía de hinca se module de tal forma que el hundimiento por cada golpe oscila entre 0,1 cm y 2 cm;
- d) el rozamiento lateral entre el material y el tren de varillas es admisible. Con cada añadido de varilla a partir de 2 m de profundidad, el tren de varillas instalado se maneja en rotación de 360° a mano o con una llave dinamométrica y en tal caso se anota el valor máximo del par y eventualmente el valor residual. Las condiciones de interrupción de hinca se establecen en 6.1.2.2.

6.1.2.2 Interrupción de la hinca

La hinca se interrumpe cuando se da alguna de las siguientes condiciones:

- se ha alcanzado la profundidad deseada;
- en un punto duro no se ha obtenido ningún hundimiento por golpe de más de 1 mm durante cinco golpes seguidos;
- en caso de que el rozamiento lateral entre el material y el tren de varillas pase a ser excesivo (Imposibilidad de hacer girar el tren de varillas con una sola mano). Si se ha realizado una verificación con la llave dinamométrica, el fabricante del equipo fija los criterios de interrupción.

6.1.3 Control después de cada sondeo

Durante la extracción del tren de varillas, se controla la rectitud de las varillas y el atornillado de unas a otras mediante un examen visual.

6.2 Controles y verificaciones periódicos

Los siguientes elementos se deberán controlar mensualmente en período de utilización, o cada 100 m de penetración:

- rectitud y fileteado de las varillas;
- uso de las puntas;
- estado del cabezal del golpeo;
- prueba del dispositivo de medición de la energía de golpeo y del hundimiento según las instrucciones del fabricante.

Las tolerancias de utilización admisibles se indican en el Anexo A.

Por otra parte, el aparato deberá ser objeto de una verificación anual o especial si se detecta una anomalía o un fallo de funcionamiento durante un control rutinario.

6.3 Resultados

En el Anexo B se presenta un ejemplo de representación de los resultados.

6.3.1 Trazado del penetrógramo

6.3.1.1 Escalas del gráfico

La escala vertical descendente con la profundidad está graduada en metros, con graduaciones intermedias adaptadas a la profundidad máxima de medida.

La escala horizontal de las resistencias a la penetración dinámica q es logarítmica y creciente de izquierda a derecha. Incluye como mínimo un intervalo de valores entre 0,1 MPa y 20 MPa, con graduaciones intermedias de 0,5 MPa, 1 MPa, 5 MPa y 10 MPa.

Salvo instrucción en contra del demandante de las pruebas, se recomienda poner en la misma escala todos los gráficos de una misma zona.

6.3.1.2 Alisado del penetrógramo — Correcciones en función de la profundidad

Las instrucciones del fabricante deberán indicar lo que el calculador del aparato realiza como tratamiento estándar (y eventualmente opcional) en la materia.

7 Informe de prueba

El informe de prueba incluye las siguientes informaciones mínimas:

- la referencia al presente documento;
- el tipo de aparato utilizado y el recordatorio de sus principales características (masa de golpeo, diámetro de la punta, masa y anchura de cada varilla añadida);
- la fecha de la prueba;
- el nombre del organismo que ha realizado la prueba;
- la referencia y las coordenadas de la prueba;
- la profundidad y el ángulo de inclinación deseados para el sondeo;
- la (las) función(es) utilizada(s) (A-B-C);
- el penetrógramo, completado en función B, según el método de calibrado elegido:
 - a) bien por la transcripción de las rectas límite y de referencia (véase en 9.2.1);
 - b) o bien por los perfiles de $q_{Lx\%}$ et q_R (véase Anexo D) que integran las posibles variaciones de material y de estado hídrico en función de la profundidad de la prueba;
- la mención de los espesores de capas prescritos en función A;

— la mención de los objetivos de compactación y de la clase de los materiales atravesados. En función B y C, se mencionan asimismo:

- a) el nombre del organismo que ha suministrado la clasificación de los materiales, así como la fecha de la toma de muestras realizada a tal efecto;
- b) el nombre del organismo que ha determinado el estado hídrico del material, en función de la profundidad y el método utilizado;
- c) en función B, el nombre del organismo u organismos que han realizado el calibrado para el aparato utilizado y el método utilizado: establecimiento de las rectas límite y de referencia (véase en 9.2) o enfoque semi-probabilista (véase Anexo D);
- d) en función B, los tipos de anomalía detectadas:
 - el resultado, a partir de 2 m de profundidad, de las pruebas de control del rozamiento lateral con cada añadido de varilla (véase en 6.1.2.1) y, si se ha medido, el par máximo y eventualmente el par residual de rotación del tren de varillas hundido en el material;
 - las condiciones de interrupción del sondeo (véase en 6.1.2.2).

8 Calibrado del aparato

La función B es la única que necesita un calibrado previo del aparato. Éste se puede realizar:

- bien en el laboratorio (método recomendado ya que explota las pequeñas dimensiones del aparato);
- o bien en las planchas de pruebas (o de calibrado).

El método de calibrado en laboratorio se describe en el Anexo C.

El principio del método de calibrado en plancha de pruebas se describe en la norma XP P 94-063 — Artículo 8 y no se repite aquí.

9 Obtención de los resultados — Interpretación

9.1 Utilización del penetrómetro en función A

La función A sólo es utilizable con sondeos verticales.

La utilización de los resultados se hace únicamente a partir de los penetrógramos y consiste en determinar los valores de espesores reales de las capas (cuando son perceptibles: véase en 9.1.1.2.2 a continuación) para compararlos con los valores prescritos, y en determinar la frecuencia y la localización de las capas no conformes en el conjunto de la obra controlada.

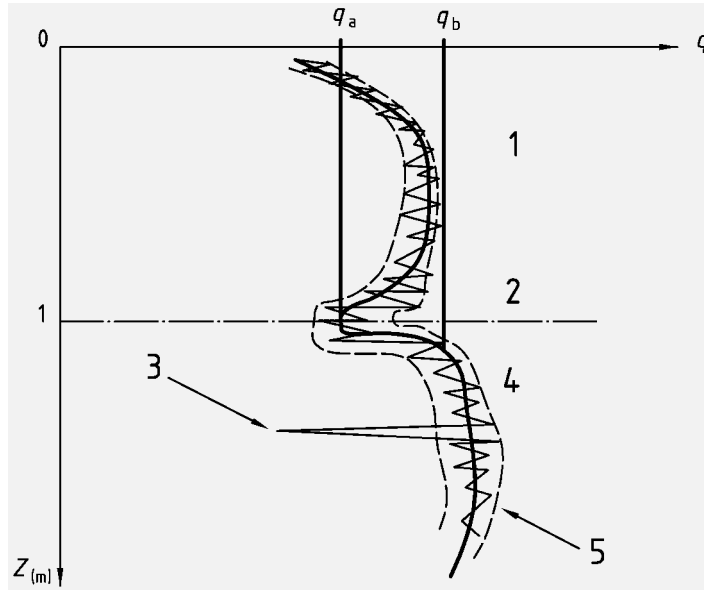
9.1.1 Método

Se calcula un espesor de capa excedentario a partir de las capas intermedias superior e inferior. La determinación de una capa intermedia se realiza a partir del contraste de las resistencias a la penetración dinámica en ambas partes de la misma.

9.1.1.1 Definiciones (Figura 3)

Ruido de fondo de un penetrógramo: cubierta de las fluctuaciones de las resistencias a la penetración dinámica en torno a un penetrógramo alisado, expresado en porcentaje (%) del valor medio de q de la zona considerada.

q_a y q_b se determinan tras el alisado (manual o automático) del penetrógramo sin puntas aberrantes.



- 1 Capa superior
- 2 Fondo de capa
- 3 Punto aberrante
- 4 Capa inferior
- 5 Ruido de fondo

Figura 3 — Penetrógrama con puesta en evidencia de la capa intermedia a 1 m de profundidad.

9.1.1.2 Interpretación

9.1.1.2.1 Determinación de una capa intermedia

Se analiza el valor de la relación q_a/q_b con respecto al ruido del fondo del penetrógrama a nivel de la capa intermedia:

- para un ruido de fondo inferior a $\pm 20\%$, la existencia de la capa intermedia intercapa tiene base si q_a/q_b es inferior a 0,7;
- para un ruido de fondo superior a $\pm 20\%$, la existencia de la capa intermedia tiene base si q_a/q_b es inferior a 0,5.

La validez de la determinación de las capas intermedias se puede reforzar con elementos tales como: penetrógramos vecinos, utilización de la función B ó C.

9.1.1.2.2 Determinación de un espesor perceptible

Se realiza por diferencia entre dos capas intermedias determinadas en 9.1.1.2.1, y entre las cuales el penetrógrama no proporciona señales de existencia de una intercapa intermedia.

9.1.1.2.3 Espesor excedentario de las capas

Es el valor de espesor calculado en 9.1.1.2.2 que excede del espesor prescrito “e” para la puesta en marcha. Para el resto de la interpretación véase en 9.1.2), sólo se utilizan los espesores excedentarios.

9.1.2 Expresión de los resultados

9.1.2.1 Frecuencia de los espesores excedentarios

En una obra, controlada por un número N de pruebas en el penetrómetro, se define por:

$$f_{(\%)} = 100 \cdot \frac{\sum \text{espesores excedentarios } (> e) \text{ en las } N \text{ pruebas}}{\sum \text{profundidades acumuladas de las } N \text{ pruebas}}$$

9.1.2.2 Frecuencia de los espesores excedentarios por niveles de sobreespesores

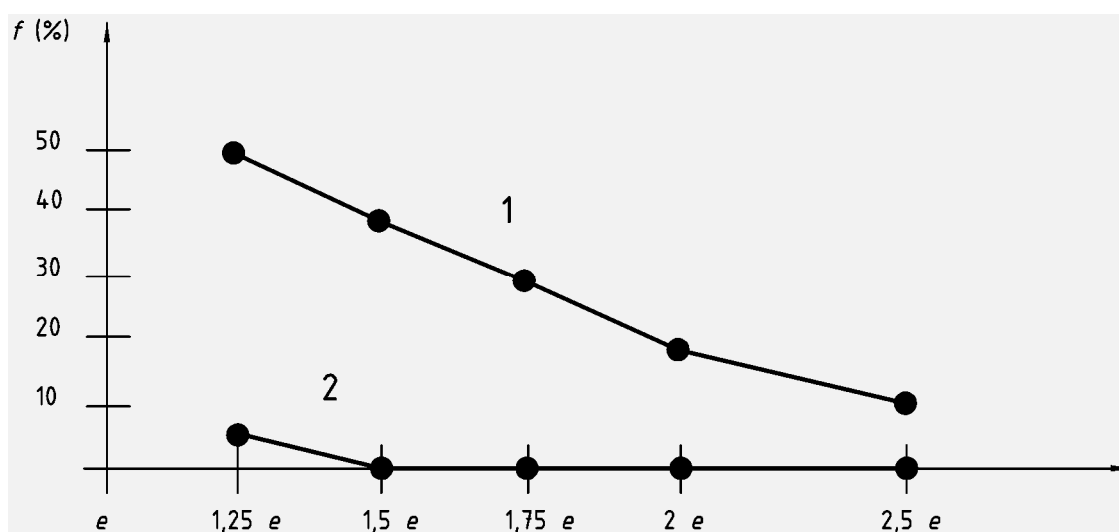
Hay clases de sobreespesores predefinidas en relación al espesor prescrito:

$$e - 1,25.e - 1,5.e - 1,75.e - 2.e - 2,5.e - 3.e$$

La frecuencia de los espesores superiores a uno de los valores predefinidos anteriormente es igual a :

$$f_{(\%)} = 100 \cdot \frac{\sum \text{espesores} > \text{espesores predefinidos (N pruebas)}}{\sum \text{profundidades acumuladas de las N pruebas}}$$

La representación de f' en función de las clases de sobreespesores (Figura 4) permite afinar el resultado global obtenido en 9.1.2.1.



- 1 Caso de terraplén con muchos sobre espesores
- 2 Caso de terraplenes con pocos sobre espesores

Figura 4 — Curvas de frecuencia de los sobre espesores (ofrecida a título de ejemplo)

9.2 Utilización del penetrómetro en función B

El informe de prueba deberá indicar el método utilizado: método por rectas de referencia (véase en 9.2.1) o método semi-probabilista (véase en 9.2.2).

9.2.1 Explotación de los resultados por el método por rectas de referencia

La explotación de los resultados se hace a partir de los penetrógramos y de los valores q_L y q_R correspondientes a los casos tipo encontrados y a las profundidades controladas.

9.2.1.1 Método

9.2.1.1.1 Condiciones a cumplir

La función B es utilizable si:

- se ha realizado la clasificación según la norma NF P 11-300 o en DC_1 , DC_2 , DC_3 . El estado de humedad para los suelos que tengan una subclase de estado es el del momento del control. Para los materiales marginales, la conformidad con respecto al caso de obra modelo deberá quedar probada por un reconocimiento;
- los valores q_L y q_R existen para el caso modelo;
- el rozamiento parásito a lo largo del tren de varilla es aceptable (véase en 6.1.2.2).

Cuando no se dan estas condiciones en toda la profundidad, la interpretación se puede realizar en parte en función B en las zonas en las que se dan las tres condiciones anteriores.

9.2.1.1.2 Interpretación

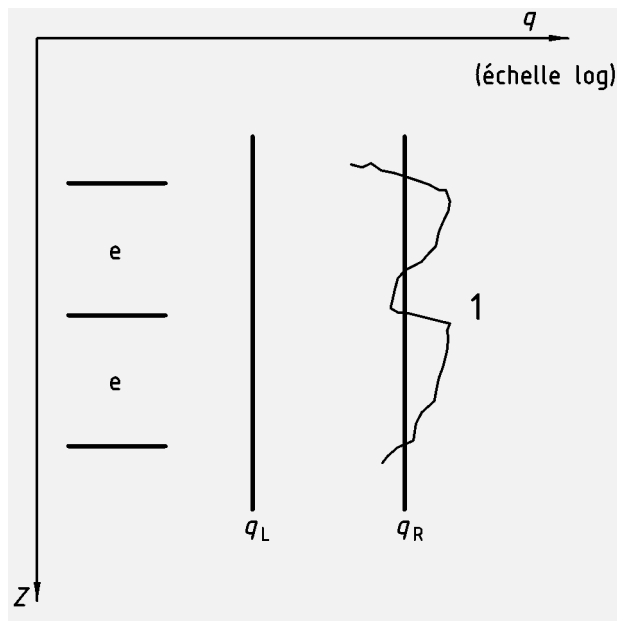
El penetrógramo se compara en la posición de la unión de las partes rectas q_L y q_R concernidas sucesivamente, con el fin de comprobar que el resultado de compactación se ajusta al esperado y, en caso contrario, situar el nivel de gravedad de la anomalía detectada.

A continuación se definen cuatro tipos de anomalía en función de las posiciones relativas del penetrógramo y de q_L y q_R , en sentido creciente del nivel de gravedad.

9.2.1.1.2.1 Resultado sin anomalía

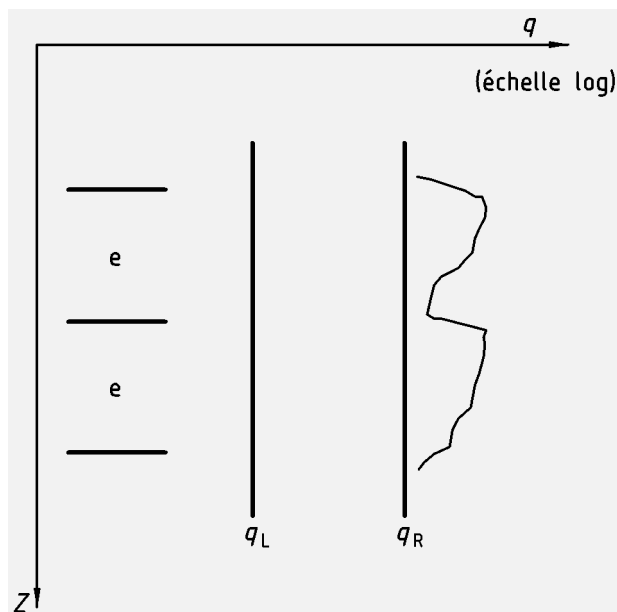
Criterios:

- el penetrógramo está siempre en excedente de q_L ;
- los espesores de capa se ajustan a las prescripciones (véase función A, Artículo 1).



1 Espesores conformes

a) Situación conforme



b) Situación posible pero no necesaria

Figura 5 — Penetrógramos — Resultados sin anomalía

9.2.1.1.2.2 Resultado con anomalía de tipo 1

Criterios:

- el penetrógrama está siempre en excedente de q_L ;
- los espesores de capa son sistemáticamente más de un 20% superiores a los valores prescritos.

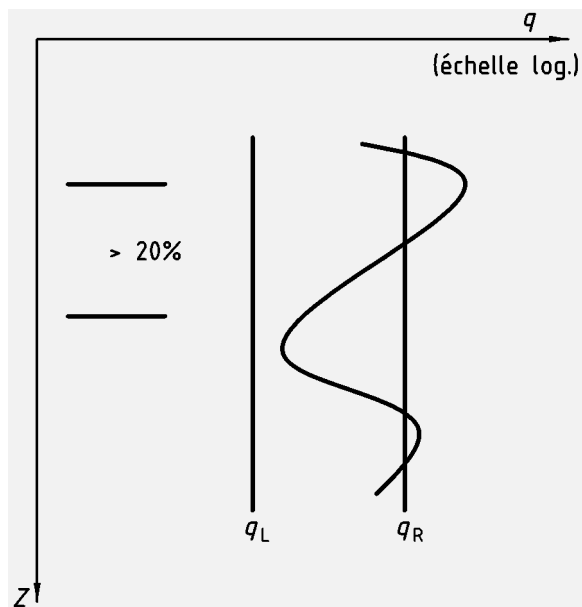


Figura 6 — Penetrógrama — Resultado con anomalía de tipo 1

9.2.1.1.2.3 Resultado con anomalía de tipo 2

Criterios:

- el penetrógrama es una distancia "a" inferior a la distancia "b" entre q_L y q_R y al total sobre una altura de menos de un 30 % de la profundidad controlada "h".

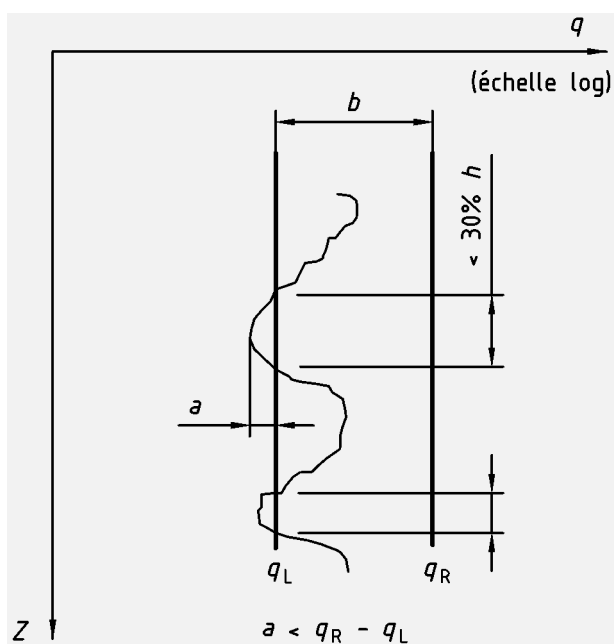


Figura 7 — Penetrógrama — Resultado con anomalía de tipo 2

9.2.1.1.2.4 Resultado con anomalía de tipo 3

Criterios:

- el penetrograma tiene una distancia "a" superior a la distancia "b" entre q_L y q_R o al total sobre una altura de más de un 30% a un 50% de la profundidad controlada "h", independientemente de la importancia del excedente.

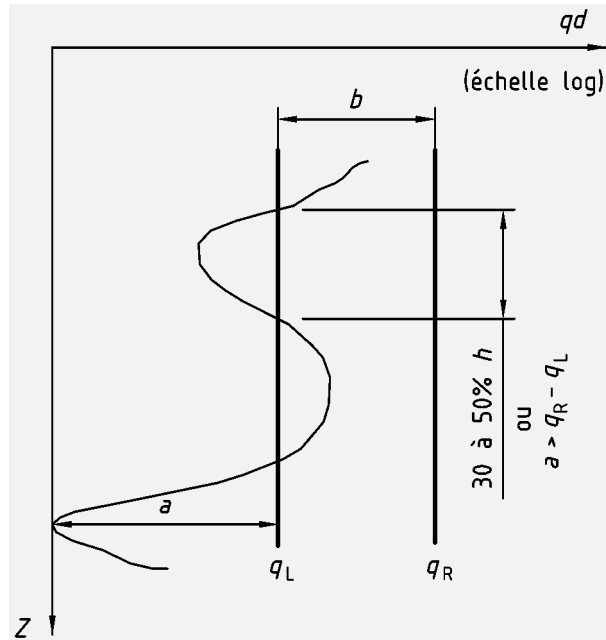


Figura 8 — Penetrógrama — Resultado con anomalía de tipo 3

9.2.1.1.2.5 Resultado con anomalía de tipo 4

Criterios:

- el penetrograma es inferior a q_L en más del 50 % de la profundidad controlada "h".

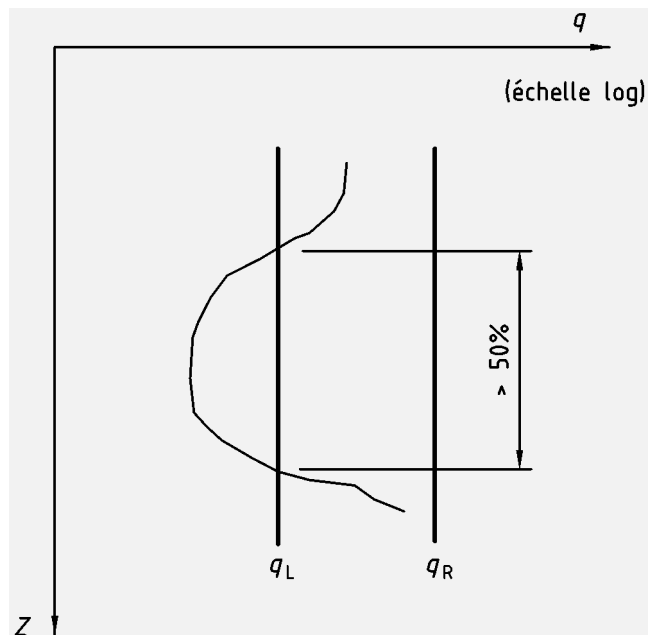


Figura 9 — Penetrógrama — Resultado con anomalía de tipo 4

9.2.1.1.2.6 Observaciones complementarias

- los 10 a 20 cm superiores del terraplén (dependiendo de los materiales) se deberán excluir de las zonas interpretables con los criterios mencionados;
- cuando hay simultáneamente valores q_L y q_R para un material determinado y valores para la clase de material a la que pertenece, la utilización de los valores relativos al material son prioritarios para la interpretación.

9.2.1.2 Expresión de los resultados

En cada penetrógrama se indicará la mención “sin anomalía” o el tipo de anomalía.

9.2.2 Obtención de los resultados para el método semi-probabilista

Este método se presenta en el Anexo D.

9.3 Utilización del penetrómetro en función C

Los penetrogramas de la parte controlada se comparan directamente con una población de penetrogramas sacada de una plancha de referencia específica en la obra en la que se haya buscado la densidad requerida. Éstos se conocen como penetrogramas de referencia.

9.3.1 Método

9.3.1.1 Condiciones a cumplir

La función C es utilizable si:

- el material de la parte controlada se ajusta en naturaleza y estado al de la plancha de referencia;
- se da la condición de rozamiento admisible a lo largo del tren de varillas, explicitada en 6.1.2.2.

Si no se cumplen estas condiciones en toda la profundidad, la interpretación se puede realizar parcialmente en función C en las zonas en las que cumplen las dos condiciones anteriores.

El control de la clase y la subclase de estado de los materiales atravesados se realiza a razón de al menos una toma de muestras para un grupo de pruebas con el penetrómetro en un terraplén o una zanja. El contenido de agua se determina por franjas de 0,50 m, y con cada cambio de material. El método de toma de muestras se precisará en la hoja de pruebas.

Si la heterogeneidad del material compactado lo justifica, el número de tomas de muestras se podrá incrementar para adaptarlo al contexto. En algunos casos se podrá alcanzar e incluso superar la proporción de una toma de muestras para dos sondeos penetrométricos.

9.3.1.2 Plancha de referencia

Se realiza con el mismo material que el de la parte a controlar, con los mismos medios de aplicación y de compactación, y aplicando estrictamente las prescripciones (espesor “e”, número de pases “n”) y el contenido de agua requeridos.

En caso de obras en masa realizadas con distintos materiales, hay tantas planchas de referencia como materiales utilizados.

9.3.1.2.1 Características geométricas mínimas útiles de las planchas de referencia

9.3.1.2.1.1 Terraplén en masa

Para los terraplenes de mucha altura y/o superficie las dimensiones son: al menos 25 m de largo, al menos tres veces el ancho del compactador, sin contar los solapes entre las pasadas de los compactadores, una altura total prescrita de más de 2 m con al menos seis capas elementales de un espesor “e” prescrito.

Para los terraplenes pequeños, la longitud mínima es de 15 m, la anchura y la altura son los de la obra, sin superar tres pases del compactador para la anchura y 3 m para la altura.

9.3.1.2.1.2 Zanjas

Las dimensiones de la zanja de referencia son:

- 15 m de longitud;
- la anchura y la profundidad máxima son las de la zanja a ejecutar con arreglo a la obra.

9.3.1.2.1.3 Material

Se realiza una identificación geotécnica para clasificarlo (clase y subclase de estado). Para los materiales que evolucionan, la identificación se realiza con muestras tomadas tras la aplicación.

En cada capa se controla el contenido de agua con tres extracciones distintas y el espesor se calcula por nivelación (u otro método equivalente) a medida que aumentan las capas.

9.3.1.2.2 Compactación

Se anota el tipo de compactador utilizado y sus condiciones de utilización.

9.3.1.2.3 Número de puntos

Se realizan al menos cinco sondeos con penetrómetro, situados en lugares en los que se comprueba la condición de que los espesores tras la compactación se ajustan a las prescripciones.

9.3.1.3 Interpretación

9.3.1.3.1 Interpretación visual

Cada penetrógrama de la parte controlada se compara por superposición con la población de los penetrógramos de referencia.

La compactación es satisfactoria:

- si el penetrograma se inserta en el huso de los penetrogramas de referencia;
- si, para la parte profunda, ninguna resistencia a la penetración dinámica es inferior al mínimo de q obtenido en todos los penetrogramas de referencia. Para la parte superior (parte oblicua del principio del penetrógrama), los resultados se deben comparar a la misma profundidad.

Cuando un único penetrograma indica una heterogeneidad de compactación, hay que hacer otra prueba en la zona dudosa (a aproximadamente 1 m de la prueba anterior, por ejemplo) y/o asegurarse de que la deriva de la resistencia a la penetración dinámica no se debe a una causa exterior la compactación propiamente dicho (naturaleza o estado de suelo, por ejemplo). Puede ser necesario realizar una nueva toma de muestras para asegurarse de la naturaleza y el estado del suelo atravesado.

9.3.1.3.2 Interpretación estadística

Es posible recurrir a los métodos estadísticos limitando el análisis únicamente a las zonas de la parte profunda (vertical) que planteen algún problema de interpretación y después de haber efectuado, en su caso, las pruebas complementarias necesarias.

Definiendo en la zona en cuestión un penetrograma de control q'_m y q'_a ;
y en la misma zona en profundidad penetrogramas de referencia, q'_m , q_m , $\overline{\sigma(q_m)}$, q_a y $\overline{\sigma(q_a)}$;

la compactación es conforme si:

$$\text{todos } q'_a > \overline{q_a} - 2\sigma(q_a)$$

$$\text{y } q'_m > \overline{q_m} - 2\sigma(q_m)$$

Si, no obstante, se está en el límite de la falta de conformidad con respecto a los criterios anteriores, se recomienda proceder a al menos dos pruebas de control complementarias, y si éstas resultan asimismo satisfactorias, comparar las medias de las tres pruebas de control con las de los penetrógramas de referencia.

9.3.1.3.3 Observaciones complementarias

Los resultados de la plancha de referencia presentan una dispersión aceptable cuando se comprueban estas dos condiciones:

$$\sigma(q_m) < 0,15 \overline{q_m}$$

$$\sigma(q_a) < 0,20 \overline{q_a}$$

Cuando se aplica el método de la función C y existen valores derivados de calibrado en caso-tipo que permiten asimismo una interpretación en función B de los penetrógramos, se da prioridad a la interpretación en función C.

9.3.2 Expresión de resultados

El informe incluye:

- un plan de implantación de los penetrogramas (plancha de referencia y partes controladas) y de las tomas de muestras de materiales;
- los penetrogramas de referencia;
- los penetrogramas de la parte controlada. Éstos tienen las mismas escalas que los penetrogramas de referencia, e incluyen indicaciones: “satisfactorio” o bien “no satisfactorio” en una o más zonas en profundidad. Las zonas que no cumplan las condiciones definidas en 9.3.1.1 se señalan como “zona fuera de control”;
- los perfiles de contenido de agua y la clasificación de los materiales extraídos. Tienen la misma escala de profundidad que los penetrógramos.

Bibliografía

- [1] Guía técnica para la realización de los terraplenes y las capas de forma (1992) — LCPC — SETRA.
- [2] Guía técnica para la realización de las zanjas (1994) — LCPC — SETRA.
- [3] Nota Técnica: seguro de calidad de la aplicación de los materiales de terraplenes. Control exterior de compactación — Utilización del penetrodensitógrafo LPC — (1993) — Centro de Experimentación de Carretera.
- [4] Tesis doctoral presentada por Shuhua Zou en la universidad Blaise Pascal de Clermont-Ferrand: "Caracterización de los suelos de superficie con el penetrómetro dinámico ligero de energía variable, tipo "PANDA" (1997).
- [5] Memoria CUST — Cemagref de L. BUSTILLO "El control de compactación de las zanjas de saneamiento con un penetrómetro dinámico ligero — prueba de correlación con el gamma-densímetro" (1990).
- [6] G. MATHIEU (Cemagref) "Proyecto de recomendaciones para el control de compactación de las zanjas de saneamiento con un penetrómetro dinámico ligero" (1990).
- [7] Memoria CUST — Cemagref de T. FAYOLLE «Control de compactación de los terraplenes de materiales finos con un penetrómetro dinámico ligero — instrucciones en laboratorio" (1995).
- [8] Memoria de Diploma de Investigación Tecnológica LERMES — Cemagref de P. LEBAUPIN "Control de compactación de los terraplenes de materiales finos con un penetrómetro dinámico ligero — construcción, explotación y seguimiento de un terraplén experimental" (1997).
- [9] Colectivo (Coordinación: G. DEGOUTTE) — Guía C.F.G.B. "Presas pequeñas: Recomendaciones para la concepción, la realización y el seguimiento" (1997).

Anexo A

(Informativo)

Principales características de los penetrómetros dinámicos de energía variable

Tabla A.1 — Principales características de los penetrómetros dinámicos de energía variable

	Designación	Símbolo	Unidad	Parámetros		Tolerancias de utilización
				Mín	Máx	
Martillo	Masa	M	kg	1	25	± 1 %
Yunque	Masa del conjunto yunque + varillas al comienzo de la hinca	—	kg	—	1,5 M	± 2 %
Varillas	Longitud	L_t	m	0,25	2	± 0,1 %
	Masa por metro	—	kg	—	2,5	± 1 %
	Diámetro exterior	d_t	mm	—	≤ 0,9 d	± 2 %
Puntas	Diámetro exterior	d	mm	15	62	± 2 %
	Zona de la sección recta	A	cm ²	2	30	
	Longitud de la parte cónica	L_2	mm	d/2		+ 2 % - 10 %
	Longitud de la parte cilíndrica	L_1	mm	d		+ 2 % - 10 %

Las prestaciones del dispositivo de medida son tales que:

— q se conoce por la precisión:

Tabla A.2 — Valores de q

Gama de q	Precisión
>10 Mpa	0,5 Mpa
1 a 10 Mpa	0,2 Mpa
< 1 Mpa	0,1 Mpa

— la profundidad z con respecto al origen de la hinca se conoce con la precisión:

Tabla A.3 — Valores de z

Gama de z	Precisión
< 2 m	± 0,5 %
2 a 5 m	± 0,3 %
> 5 m	± 0,2 %

— la profundidad de búsqueda puede ir de hasta 4 a 5 m en terreno medianamente compactado (véanse las condiciones sobre la interrupción del batido en 6.1.2.2).

— el campo de utilización cubre los suelos finos y medios hasta un diámetro máximo de 50 a 80 mm (falso rechazo posible en piedra aislada).

Por último, la documentación del fabricante precisa si se puede utilizar el aparato para sondeos penetrométricos inclinados y, en caso afirmativo, el ángulo máximo de inclinación con respecto a la vertical.

Anexo B
(informativo)

Presentación de los resultados (ejemplo)

Tabla B.1 — Control de compactacion con penetroméetro dinámico de energía variable

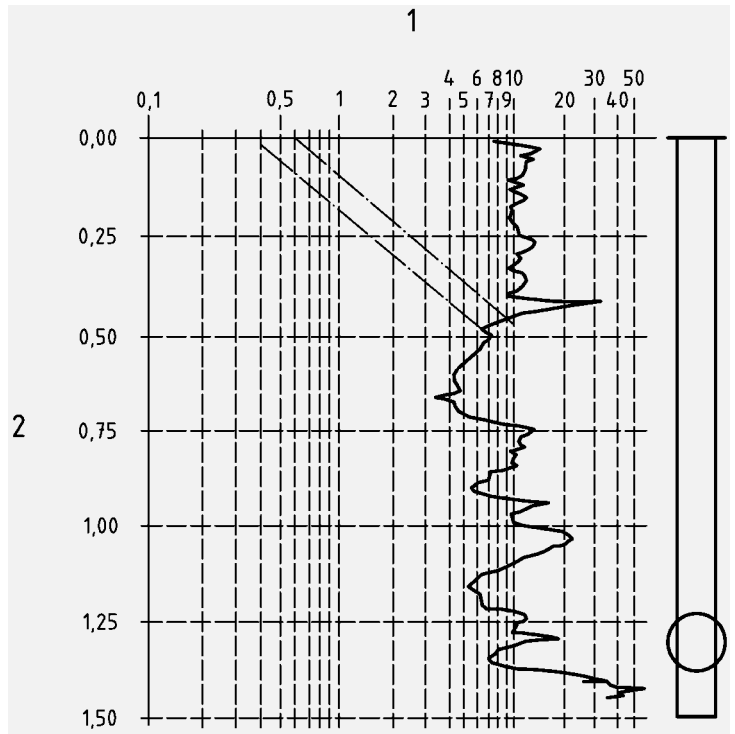
Fecha:	Organismo:
Fichero:	Operador:
Centro:	
Nº prueba:	
Marcación	
X	Y Z

Tipo de aparato:			
Calibrado aparato (método, laboratorio):			
Función: A / B / C			
	Masa	Sección	Longitud
Varilla			
Punta			
Hinca			

Altura terraplén:
Anchura terraplén:
Número de capas compactadas:
Naturaleza de la red:
Profundidad. Generadora complementaria:

PRUEBA		
	Buscada	Alcanzada
Profundidad		
Condiciones de interrupción:		
Antes de agujero		

	Clase material	Objetivos de compactación	Análisis material	Estado hídrico	Espesor prescrito	Espesor real	Tipos de anomalía
Capa 1:							
Capa 2:							
Capa 3:							
Capa 4:							
Capa 5:							
Ángulo buscado		Fecha análisis:					



1 Resistencia (Mpa)
2 Profundidad (m)

Profundidad (m)						
Apreciación del rozamiento						
Comentario:						

CONCLUSIÓN:	
Nombre operador:	Firma:
Nombre responsable:	

Anexo C

(Informativo)

Método de calibrado del penetrómetro dinámico de energía variable en laboratorio

C.1 Recordatorio y generalidades

El objetivo del calibrado del penetrómetro dinámico de energía variable es determinar valores q_L y q_R (tal como se definen en 3.4) o relaciones (tal como se definen D 1) para constituir o completar el catálogo de un aparato de características definidas.

El catálogo de casos, asociado a un aparato de características determinadas, puede incluir:

- casos-tipo en los cuales los valores q_L y q_R , o la relación han sido establecidos de tal manera que sean representativos de un material “medio” de la clase considerada y para distintos estados hídricos. La designación de esos casos se hace mediante la clasificación y la subclasificación (estado hídrico) o el valor del contenido de agua;
- casos-tipo en los cuales los valores q_L y q_R , o la relación $\rho_d = f^{-4}(q)$, sólo han sido establecidos para un material singular y uno o más estados hídricos. Puede tratarse de un subproducto industrial, de un material con carácter específico o bien de un material descentrado con respecto al caso “medio” de la clase.

La designación de estos casos se hace por la denominación particular del material cuya identificación geotécnica se realiza.

Teniendo en cuenta las pequeñas dimensiones del aparato, es posible e interesante proceder al calibrado del mismo en laboratorio: a continuación se describe el método más detalladamente.

C.2 Presentación general del método

Siguiendo el modelo que caracteriza la resistencia a la penetración dinámica durante el hundimiento en un suelo compactado de forma homogénea (Figura 1), se trata de determinar para cada material los valores q_L y q_R , o de obtener las curvas: $\rho - q_0$ y $\rho - q_1$, según un procedimiento experimental realizado en laboratorio y siguiendo las principales etapas que se indica a continuación:

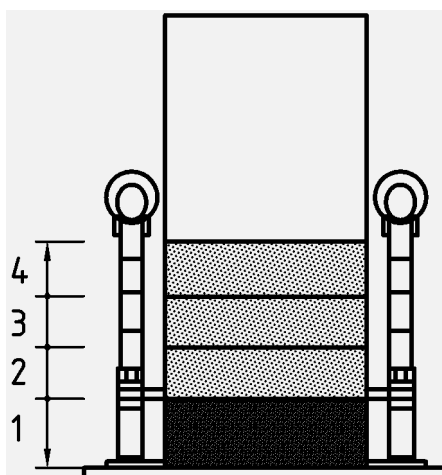
- a) identificación y clasificación del material (NF P 11-300);
- b) realización de un ensayo PROCTOR normal o modificada (NF P 94-093 o NF P 98-231-1);
- c) colocación en un molde de prueba: se preparan cinco series para cinco energías de compactación diferentes y para distintos contenidos de agua;
- d) compactación siguiendo un método que permite obtener una buena homogeneidad;
- e) para cada energía de compactación, esto es, para cada una de las cinco series, se realizan tres pruebas penetrométricas con el aparato a calibrar;
- f) medición directa de la densidad seca (NF P 94-053) y del contenido de agua del material (NF P 94-050);
- g) determinación de z_c . Las curvas se trazan después del análisis y el tratamiento estadístico para cada densidad y contenido de agua;
- h) en ese caso se trazan las rectas de referencia y límite para los valores correspondientes a q_2 , q_3 y q_4 por interpolación entre los resultados anteriores.

Este paso permite obtener curvas de referencia y límite para todos los materiales posibles, y para cualquier valor de compactación q_2 , q_3 , q_4 , o cualquier otro comprendido entre el 80 % y el 110 % de la densidad óptima Proctor Normal.

C.3 Elección del molde de pruebas

Hay que utilizar un molde de dimensiones suficientes para que la prueba penetrométrica se pueda considerar efectuada en un medio semi-acabado. A modo de ejemplo, para la gama de suelos de utilización del aparato y para una punta de superficie $A \leq 4 \text{ cm}^2$ y de diámetro $d \leq 50 \text{ mm}$, el molde de pruebas (véase Figura C.1) deberá tener unas dimensiones superiores o iguales a:

- diámetro: 35 cm;
- altura: 70 cm.



- 1 Capa 1
- 2 Capa 2
- 3 Capa 3
- 4 Capa 4

Figura C.1 — Molde de pruebas en laboratorio

C.4 Clasificación del material

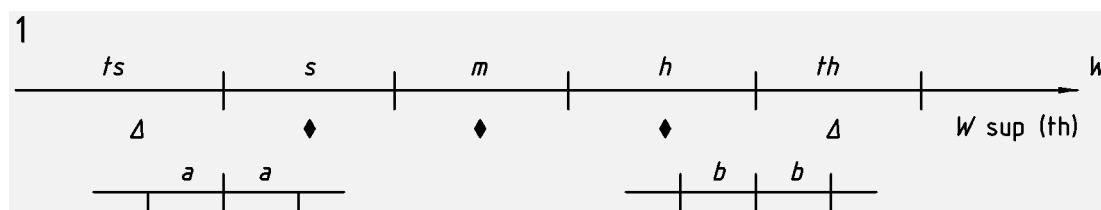
Permite definir el material y está garantizada según los criterios de la norma NF P 11-300: pruebas granulométricas, de determinación de los límites de Atterberg y pruebas Proctor, de Azul y/o equivalente de arena.

C.5 Margen de variación del contenido de agua

El contenido de agua del material en el momento de su aplicación es un parámetro de control habitual.

A tenor de las pruebas de calibrado del penetrómetro con respecto a los suelos sensibles al agua, se ha acordado extender el margen de variación del contenido de agua más allá del intervalo habitual de aceptación del suelo para una compactación de la energía Proctor normal, todo ello, con el fin de asentar bien las curvas de comportamiento del material y de asegurarse de que el dispositivo de control, una vez calibrado, pueda identificar todas las situaciones (incluida la de una compactación realizado mucho más allá de los márgenes admisibles de contenido de agua).

Para el calibrado del aparato con respecto a los suelos sensibles al agua, se recomienda seleccionar las cinco subclases de estados hídricos t_s , s , m , h y t_h , en referencia a la norma NF P 11-300 y por analogía a la norma XP P 94-063 (véase 8.2.2.2).



- ♦ Wmed de una subclase delimitada en la NF P 11-300
- Δ Wmed definidas para las subclases ts, y th (sin perjuicio de las condiciones de saturación)
- 1 subclase de estado

Figura C.2 — Wmed de las subclases
(según la norma XP P 94-063)

Para cada clase de material, estos cinco estados hídricos se expresan asimismo en términos de porcentaje de W_{OPN} .

C.6 Variación de la energía de compactación

Las energías de compactación a aplicar durante las pruebas de calibrado deberán cubrir un amplio espectro, dado que se trata de obtener la variabilidad de densidad necesaria para estudiar la correlación con la resistencia a la penetración dinámica.

Numerosas pruebas experimentales en suelos finos (véase concretamente la referencia bibliográfica [4]) han demostrado que una gama de cinco energías elegidas entre los siguientes principios respondían bien al criterio enunciado:

- primera “energía” correspondiente a un material nivelado, poco o nada compactado;
- las cuatro energías siguientes que conducen a un material homogéneo y cuya densidad seca está comprendida gradualmente entre un 80 y un 110% de ρ_{OPN} .

C.7 Colocación y compactación en el molde

El principio del método se parece al de la prueba Proctor. Se preparan cinco series para cinco energías de compactación diferentes.

Para cada molde se mide un primer contenido de agua antes de realizarlo.

La compactación debe ser homogénea y cuidadosa para desembocar en una homogeneidad de densidad en el molde.

Después de colocarlo, un realce de 15 cm de altura permite realizar la compactación de forma regular hasta lo más alto del molde. A continuación se retira el realce y el material nivelado limpiamente.

Se pesa el molde con el fin de calcular la densidad. Al desmontar el molde se extraen tres o cuatro muestras a distintos niveles y se mide el contenido de agua para cada una de ellas.

C.8 Prueba penetrométrica

Para cada modalidad de compactación (suelo determinado — energía de compactación — estado hídrico), se realizan tres pruebas penetrométricas clásicas, dispuestas en lo más alto de un triángulo. Sólo se tendrán en cuenta si las tres ofrecen la misma indicación (con un índice de variación admitido del 10%). Además, la señal tiene que tener una forma fácil de identificar (q_0 , q_1 y z_c). Si ése no es el caso, se rechaza toda la prueba.

C.9 Tratamiento de datos

Se trabaja con una subclase de estado determinada (en referencia a la clasificación de la norma NF P 11-300): lo que equivale a cinco moldes (un molde por energía de compactación) y un total de 15 pruebas penetrométricas.

En primer lugar se presta interés a los valores q_1 (resistencia en profundidad). Se trazan las curvas que dan la relación $\rho - q_1$ (véase Figura C.3).

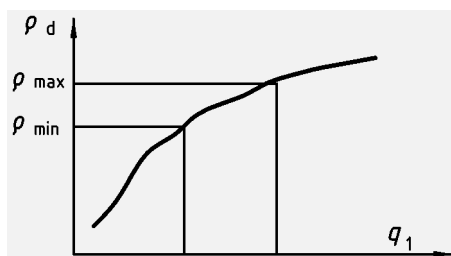


Figura C.3 — Relación entre ρ y q_1
(en profundidad y para un material y un estado de humedad determinados)

C.9.1 Método por establecimiento de las rectas límite y de referencia (determinación de los valores q_L y q_R)

Por interpolación, es posible definir los valores q_1 que corresponden, para el material en cuestión, a las referencias de objetivo de compactación q_2 , q_3 y q_4 de la guía LCPC-SETRA [1] o a cualquier otra referencia o, incluso, a cualquier otro valor comprendido entre un 80 y un 110% de la O.P.N.

Los valores q_0 y z_c dependen concretamente del diámetro de la punta. Se obtienen por interpolación análoga (z_c a partir de la media de las 15 pruebas). La curva límite corresponde al valor q_1 / k , valiendo k respectivamente 1,3 — 1,4 — 1,6 para las subclases mH (muy humedo) — H (humedo) — M (medio), S (seco), mS (muy seco) (lo que equivale a aproximadamente un 98 % ρ_{ref} , o lo que es lo mismo, densidad seca de referencia menos 2%).

Para el resto, el detalle del método es una simple adaptación del método de calibrado prescrito por la norma experimental XP P 94-063 aplicable a los penetrodensitógrafos.

C.10 Método semi-probabilista

Este método tiende a establecer, a partir de los resultados de las pruebas de calibrado y por regresión estadística, relaciones $\rho = f^{-1}(q)$ con un estado hídrico constante, combinadas con husos de confianza. Se describe, a título informativo, en el Anexo D.

Anexo D

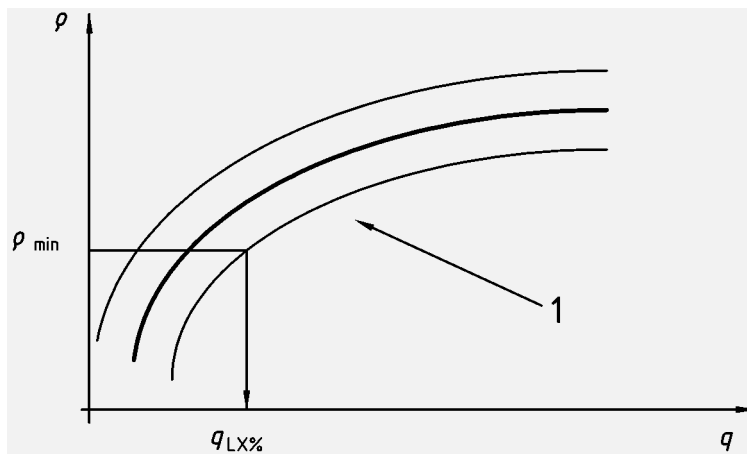
(Informativo)

Explotación en función B de los resultados del penetrómetro dinámico de energía variable según el método semi-probabilista

D.1 Definiciones y terminología específicas del método

D.1.1 Resistencia a la penetración dinámica: valor límite (para un material clasificado)

El valor límite $q_{Lx\%}$ de la resistencia a la penetración dinámica (véase Figura D.1) es, a una profundidad determinada z , el valor mínimo por debajo del cual q no deberá descender para traducir, con un nivel de confianza de $x\%$, que se ha alcanzado el nivel de la densidad ρ_{\min} (función B). Ese valor se deduce de la curva cubierta inferior correspondiente al material probado y derivado del catálogo de las relaciones $\rho_d = f^{-1}(\bar{q})$ combinadas con sus husos de confianza (véase definición en D.1.3).

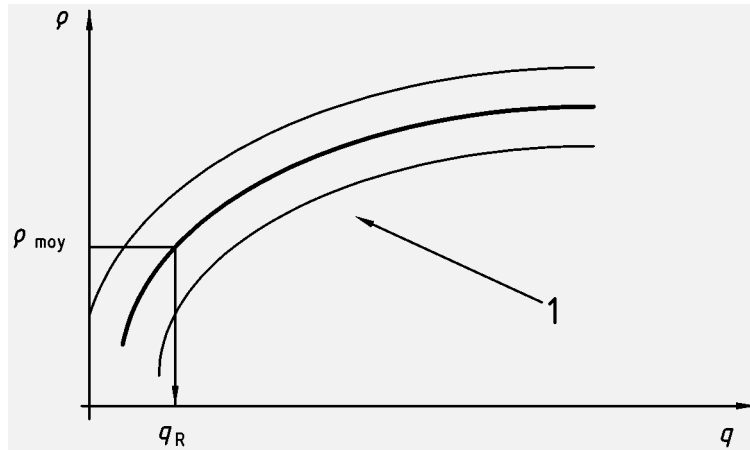


1 Huso de confianza de X %

Figura D.1 — Definición del valor límite $q_{Lx\%}$

D.1.2 Resistencia a la penetración dinámica: valor de referencia (para un material clasificado)

El valor de referencia q_R de la resistencia a la penetración dinámica (véase Figura D.2) es, a una profundidad determinada z , el valor medio en torno al cual se sitúa q cuando la densidad corresponde a un valor medio prescrito ρ_{med} (función B). Ese valor se deduce de la curva media correspondiente al material probado y derivado del catálogo de las relaciones $\rho_d = f^{-1}(\bar{q})$ (véase definición D.1.3).



1 Huso de confianza de X %

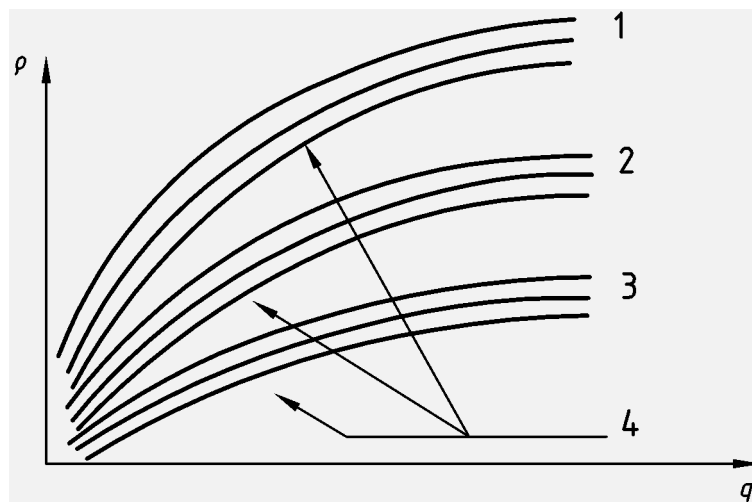
Figura D.2 — Definición del valor de referencia q_R

La utilización de q_R es una ayuda a la interpretación. Completa la utilización de $q_{LX\%}$.

D.1.3 Catálogo de relaciones $\rho_d = f^{-1}(q)$

D.1.3.1 Definición

Se trata del catálogo de relaciones $\rho_d = \bar{f}^{-1}(q)$, obtenidas por regresión en laboratorio o sobre baterías de pruebas combinadas con sus husos de confianza de un 80 y un 90% (véase Figura D.3), teniendo como entradas: la clase del material y su estado hídrico en el momento de la prueba penetrométrica. Se supone que estas relaciones se aplican independientemente de cuál sea la profundidad de prueba (más allá de la profundidad crítica) siempre que se siga estando en el ámbito de utilización del penetrómetro dinámico y los rozamientos no sean significativos.



- 1 W_{OPN+2} (o subclase h)
- 2 W_{OPN} (subclase m)
- 3 W_{OPN-2} (o subclase s)
- 4 Husos de confianza

Figura D.3 — Haz de curvas para un material de clase determinada

D.1.3.2 Establecimiento del catálogo en el laboratorio

Las modalidades de las pruebas de calibrado a realizar en el laboratorio se describen en el Anexo C.

Para cada clase de material y estado hídrico probados en los moldes de laboratorio, se procede a:

- la extracción de los pares (ρ_i, q_i) ;
- la construcción de las curvas $\rho_d = f^{-1}(q)$, por regresión sobre los puntos de coordenadas (ρ_i, q_i) : elección de los tipos de relación (curva de regresión, regresión lineal sobre los logaritmos de las variables, etc.), ámbito de validez física de las relaciones y valores en los límites;
- la realización de pruebas estadísticas en las curvas o rectas de regresión (resultados de las relaciones): establecimiento de los husos de confianza de un 80 y un 90%.

El número mínimo de pares (ρ_i, q_i) para establecer las regresiones es de 20 por material y valor de estado hídrico. Los criterios de rechazo/aceptación de las regresiones se deben definir según el método de regresión empleado.

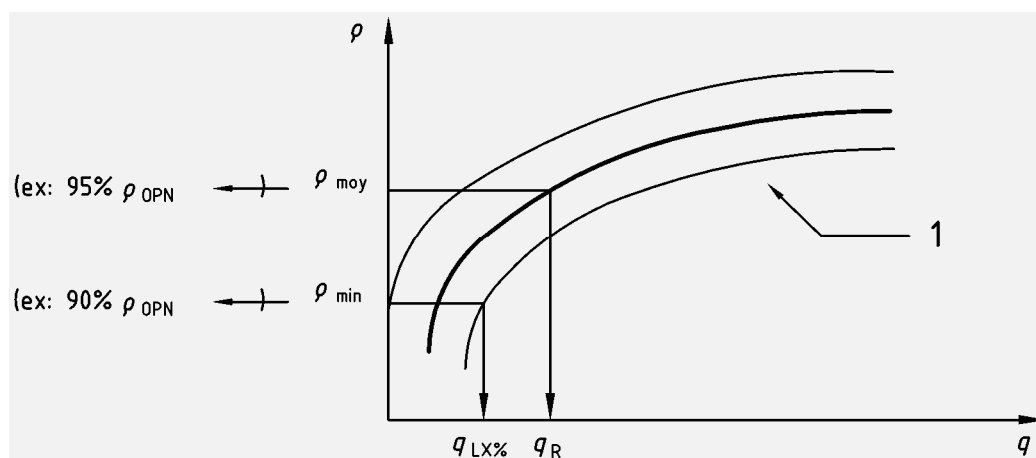
El método permite desembocar en la elaboración de un catálogo de relaciones $\rho_d = f^{-1}(q)$ de dos entradas: clase del material y estado hídrico (subclase).

D.2 Explotación de los resultados e interpretación

D.2.1 Principio

Se compara el penetrógrama con los valores $q_{Lx\%}$ (con intervalo de confianza de $x\%$) y q_R deducidos del catálogo De las relaciones $\rho_d = f^{-1}(q)$ del mismo aparato, para los valores requeridos de la masa volúmica seca = f respectivamente

mínima ρ_{\min} y media ρ_{med} (véase Figura D.4). Hace falta identificar los materiales realmente utilizados (según la norma NF P 11-300) así como conocer su estado hídrico en el momento de la prueba.



1 Huso de confianza à X %

Figura D.4 — Principio de explotación de una curva del catálogo

D.2.2 Método

D.2.2.1 Condiciones a cumplir

La función B es utilizable si:

- se realiza la clasificación según las normas NF P 11-300 o NF P 98-231-3;
- se han determinado los contenidos de agua en el momento del control en el perfil del sondeo;
- los valores $q_{Lx\%}$ existen en el catálogo de relaciones $\rho_d = f^{-1}(q)$ y para los estados hídricos observados;
- el rozamiento parásito a lo largo del tren de varillas es admisible.

Cuando no se cumplen esas condiciones en toda la profundidad, la interpretación se puede realizar en parte en función B en las zonas en las que se cumplen las cuatro condiciones anteriores.

D.2.2.2 Interpretación

Para el control de compactación de los terraplenes de presa o de dique, sólo se distingue un nivel de anomalía tal como se define a continuación (en D.2.2.2.2). Para el control de compactación de los terraplenes de carretera o de zanja, se puede retomar el principio de cuatro niveles de anomalía tal como se define en la norma XP P 94-063.

El penetrograma se compara, capa por capa, con los valores de intervalo de confianza de $x\%$ y q_R sucesivamente concernidos, con el fin de verificar que el resultado de la compactación se ajusta a lo esperado.

D.2.2.2.1 Resultado sin anomalía

Se considera que la prueba no tiene anomalía para la capa o capas en cuestión si se cumplen al mismo tiempo los tres criterios siguientes en la capa o capas:

- los espesores de capa se ajustan siempre a las prescripciones (véase función A del presente documento);
- el penetrograma está siempre en excedente de $q_{Lx\%}$ sobre la capa o capas en cuestión (incluso en la parte inferior de la capa);
- la media, en el espesor de la capa o capas en cuestión, de las resistencias a la penetración dinámica es superior o igual a q_R .

Los criterios de aceptación y de rechazo en cuanto al contenido de agua, particularmente importantes para las obras hidráulicas (presas y diques), se deben especificar por otra parte.

D.2.2.2.2 Resultado con anomalía

Se detecta una anomalía para una o más capas si al menos uno de los tres criterios anteriores no se cumple para la capa o capas en cuestión.

D.2.2.3 Observaciones complementarias

Los 10 a 20 cm superiores (dependiendo de los materiales), que corresponde a la zona de formación de la señal, se deberán excluir de las zonas interpretables con los criterios anteriores.

D.2.2.4 Expresión de los resultados: criterios de aceptación / rechazo de una capa compactada

Esos criterios se deben precisar en el documento técnico contractual que se aplica a los trabajos (pliego de condiciones, pliego de prescripciones técnicas particulares o generales...).