

Febrero 2011

TÍTULO

Ejecución de trabajos geotécnicos especiales

Drenaje vertical

Execution of special geotechnical works. Vertical drainage.

Exécution des travaux géotechniques spéciaux. Drains verticaux.

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 15237:2007.

OBSERVACIONES

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 103 *Geotecnia* cuya Secretaría desempeña AENOR.

Editada e impresa por AENOR
Depósito legal: M 5177:2011

© AENOR 2011
Reproducción prohibida

LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

AENOR

Asociación Española de
Normalización y Certificación

Génova, 6
28004 MADRID-España

info@aenor.es
www.aenor.es

Tel.: 902 102 201
Fax: 913 104 032

59 Páginas

Grupo 35

Versión en español

Ejecución de trabajos geotécnicos especiales Drenaje vertical

Execution of special geotechnical works.
Vertical drainage.

Exécution des travaux géotechniques
spéciaux. Drains verticaux.

Ausführung von besonderen geotechnischen
Arbeiten (Spezialtiefbau). Vertikaldräns.

Esta norma europea ha sido aprobada por CEN el 2007-01-07.

Los miembros de CEN están sometidos al Reglamento Interior de CEN/CENELEC que define las condiciones dentro de las cuales debe adoptarse, sin modificación, la norma europea como norma nacional. Las correspondientes listas actualizadas y las referencias bibliográficas relativas a estas normas nacionales pueden obtenerse en el Centro de Gestión de CEN, o a través de sus miembros.

Esta norma europea existe en tres versiones oficiales (alemán, francés e inglés). Una versión en otra lengua realizada bajo la responsabilidad de un miembro de CEN en su idioma nacional, y notificada al Centro de Gestión, tiene el mismo rango que aquéllas.

Los miembros de CEN son los organismos nacionales de normalización de los países siguientes: Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chipre, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Rumanía, Suecia y Suiza.

CEN
COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN
European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung
CENTRO DE GESTIÓN: Avenue Marnix, 17-1000 Bruxelles

ÍNDICE

	Página
PRÓLOGO	5
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN.....	6
2 NORMAS PARA CONSULTA.....	6
3 TÉRMINOS Y DEFINICIONES	7
4 INFORMACIÓN NECESARIA PARA LA EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS	9
5 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA	10
5.1 Generalidades	10
5.2 Requisitos específicos	10
6 MATERIALES Y PRODUCTOS	11
6.1 Aspectos generales.....	11
6.2 Materias primas de los drenes prefabricados	11
6.3 Drenes banda	12
6.4 Dren prefabricado cilíndrico	15
6.5 Drenes de arena	17
7 CONSIDERACIONES RELACIONADAS CON EL DISEÑO	17
7.1 Ensayos de campo.....	17
8 EJECUCIÓN	17
8.1 Procedimiento	17
8.2 Preparación del emplazamiento.....	18
8.3 Instalación del dren	18
8.4 Aspectos especiales	19
9 SUPERVISIÓN Y SEGUIMIENTO	20
9.1 Supervisión.....	20
9.2 Seguimiento.....	20
10 Registros.....	20
10.1 Registros durante la construcción.....	20
10.2 Registros a la finalización de los trabajos	21
11 REQUISITOS ESPECIALES	21
11.1 Generalidades	21
11.2 Seguridad	21
11.3 Protección del medioambiente.....	21
11.4 Impacto sobre estructuras adyacentes.....	22
ANEXO A (Informativo) ASPECTOS PRÁCTICOS DEL DRENAJE VERTICAL	23
ANEXO B (Informativo) ASPECTOS DE DISEÑO.....	44
ANEXO C (Informativo) GRADO DE OBLIGACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES	55
BIBLIOGRAFÍA.....	56

PRÓLOGO

Esta Norma EN 15237:2007 ha sido elaborada por el Comité Técnico CEN/TC 288 Ejecución de trabajos geotécnicos especiales, cuya Secretaría desempeña AFNOR.

Esta norma europea debe recibir el rango de norma nacional mediante la publicación de un texto idéntico a ella o mediante ratificación antes de finales de agosto de 2007, y todas las normas nacionales técnicamente divergentes deben anularse antes de finales de agosto de 2007.

Esta norma se ha elaborado para estar junto a la Norma EN 1997-1, *Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales*, y junto a la Norma EN 1997-2, *Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 2: Investigación y ensayos del terreno*. Esta norma amplía la información de proyecto solo cuando es necesario, pero proporciona todos los requisitos de construcción y supervisión.

Esta norma fue preparada por un grupo de trabajo compuesto por delegados de 10 países europeos. En las reuniones del grupo de trabajo participaron expertos de Japón y contribuyeron a la formulación del proyecto final. El grupo de trabajo inició su actividad en marzo de 2002.

De acuerdo con el Reglamento Interior de CEN/CENELEC, están obligados a adoptar esta norma europea los organismos de normalización de los siguientes países: Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chipre, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Rumanía, Suecia y Suiza.

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma europea establece principios generales para la ejecución, ensayo, supervisión y seguimiento de proyectos de drenes verticales.

Esta norma europea incluye la aplicación de drenes verticales prefabricados y drenes de arena, y trata de los requisitos a tener en cuenta en el diseño, el material del dren y los métodos de instalación. Esta norma europea se aplica para la mejora de suelos de baja permeabilidad y altamente compresibles mediante drenaje vertical y precarga. La información con respecto de la carga (terraplén, vacío o rebajamiento del nivel freático) y precarga se da en los anexos informativos A y B.

El drenaje vertical se usa tanto en construcciones terrestres como marinas para los siguientes propósitos:

- (pre)consolidación y reducción de los asientos postconstructivos;
- aceleración del proceso de consolidación por reducción de la longitud de los trayectos de disipación del agua por los poros;
- incremento de la estabilidad (incrementando la tensión efectiva del suelo);
- rebajamiento del nivel freático;
- atenuación de los efectos de la licuefacción.

En cada caso hay un tratamiento general del suelo (el volumen de los drenes es pequeño en relación con el volumen de suelo tratado).

Esta norma europea no incluye la mejora del terreno mediante pozos, columnas de grava y piedra, columnas encapsuladas geotextiles de gran diámetro o elementos de refuerzo.

El drenaje vertical también se puede combinar con otros métodos de cimentación o de mejora del terreno, por ejemplo, la electro-osmosis, pilotes y pilotes de arena compactada, la compactación dinámica y estabilización en masa.

En el anexo A se dan indicaciones sobre los aspectos prácticos del drenaje vertical, tales como la determinación de las propiedades del dren y los procedimientos equipos de ejecución. El anexo B proporciona información sobre la determinación de las características del suelo y la evaluación de los parámetros de diseño, a los cuales afectan tanto las propiedades del dren como su ejecución.

2 NORMAS PARA CONSULTA

Las normas que a continuación se indican son indispensables para la aplicación de esta norma. Para las referencias con fecha, sólo se aplica la edición citada. Para las referencias sin fecha se aplica la última edición de la norma (incluyendo cualquier modificación de ésta).

EN 1997-1 *Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales.*

EN 1997-2 *Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 2: Investigación y ensayos del terreno.*

EN 13252:2000 *Geotextiles y productos relacionados. Requisitos para su uso en sistemas de drenaje.*

EN ISO 9862 *Geosintéticos. Toma de muestras y preparación de probetas (ISO 9862:2005).*

EN ISO 10319 *Geosintéticos. Ensayo de tracción de bandas anchas. (ISO 10319:1993).*

EN ISO 10320 *Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Identificación in situ. (ISO 10320:1999).*

EN ISO 10321 *Geosintéticos. Ensayo de tracción de juntas/costuras por el método de la banda ancha. (ISO 10321:1992).*

EN ISO 11058 *Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Determinación de las características de permeabilidad al agua perpendicularmente al plano sin carga. (ISO 11058:1999).*

EN ISO 12956 *Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Determinación de la medida de abertura característica. (ISO 12956:1999).*

EN ISO 12958:1999 *Geotextiles y productos relacionados. Determinación de la capacidad de flujo de agua en su plano. (ISO 12958:1999).*

EN ISO 14688 (todas las partes) *Ingeniería geotécnica. Identificación y clasificación de suelos.*

3 TÉRMINOS Y DEFINICIONES

Para los fines de este documento, se aplican los términos y definiciones siguientes:

3.1 método de instalación con barrena:

en: auger instalation method

fr: instalation à la tarière

de: Schneckeneinbauverfahren

Método de instalación de drenes de arena por medio de una barrena helicoidal o de una barrena continua hueca.

3.2 dren banda¹⁾:

en: band drain

fr: drain plat

de: Streifendrän

Dren prefabricado de una sección rectangular, que normalmente está formado por un núcleo central con un sistema acañalado rodeado de una funda filtrante.

3.3 dren prefabricado cilíndrico:

en: cylindrical prefabricated drain

fr: drain tubulaire

de: zylindrischer Drän

Dren consistente en un núcleo anular corrugado y perforado, rodeado por una funda filtrante.

3.4 capacidad de descarga, q_w :

en: discharge capacity

fr: capacité de décharge

de: Durchflussskapazität

La capacidad de descarga de un pozo de drenaje es igual al área de la sección del dren multiplicada por su permeabilidad total en la dirección longitudinal (el volumen de agua que fluye fuera del dren por unidad de tiempo bajo un gradiente hidráulico igual a la unidad).

3.5 método de instalación de desplazamiento:

en: displacement installation method

fr: installation par fonçage refoulant

de: Verdrängungseinbauverfahren

Método de instalación de drenes por medio de un tubo de acero o mandril cerrado en la base.

1) También se usan los términos “drenes mecha” y “drenes verticales prefabricados” (DVP).

3.6 anclaje del dren:**en: drain anchor****fr: sabot d'ancrage****de: Dränschuh**

Anclaje fijado al final de las bandas drenantes antes de la instalación y que impiden que el suelo entre en el mandril durante la instalación y que se saque la banda drenante cuando se está retirando el mandril.

3.7 manto drenante:**en: drainage blanket****fr: tapis drainant****de: Drändecke**

Capa superior drenante de alta permeabilidad, la cual tiene un buen contacto con los drenes y previene que se creen presiones en los drenes.

3.8 método de instalación dinámica:**en: dynamic installation method****fr: méthode d'installation par battage ou vibrofonçage****de: dynamische Dräneinbauweise**

Método de instalación de drenes que usa acción dinámica (martillos de impacto o vibratorios).

3.9 dren de arena encapsulado en geotextil:**en: geotextile enclosed sand drain****fr: drains de sable dans une gaine de géotextile****de: geotextilumschlossener Sanddrän**

Drenes de arena encapsulados en algún tipo de tejido filtrante de geotextil.

3.10 método de instalación por chorro:**en: jet installation method****fr: méthode d'installation par lançage****de: Einbau mittels Hochdruckinjektion**

Método de instalación de drenes de arena por medio de chorreado interno o chorro rotatorio.

3.11 dren de arena:**en: sand drain****fr: drain de sable****de: Sanddrän**

Dren de sección circular hecho de material granular (arena, grava) con alta permeabilidad.

3.12 método de instalación estática:**en: static installation method****fr: méthode d'installation par fonçage****de: statisches Einbauverfahren**

Método de instalación por medio de carga estática (empuje).

3.13 método de instalación vibratoria:**en: vibro installation method****fr: méthode d'installation par vibrofonçage****de: Vibrationseinbauverfahren**

Método de instalación de drenes de arena por medio de un vibrador superior montado en un mandril hueco o por medio de un vibrador de profundidad.

3.14 plataforma de trabajo:**en: working platform****fr: plateforme de travail****de: Arbeitsbene**

Plataforma creada para el acceso de las máquinas de instalación de drenes hasta el emplazamiento de los drenes verticales.

4 INFORMACIÓN NECESARIA PARA LA EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS

4.1 Antes del comienzo de la obra debe estar disponible toda la información necesaria.

4.2 Esta información debe incluir:

- a) información relevante acerca de las condiciones del emplazamiento;
- b) ubicación de las principales líneas de la malla para el replanteo;
- c) planos que indiquen la localización y longitud de los drenes;
- d) cualquier restricción legal o normativa;
- e) procedimiento constructivo para la instalación de los drenes verticales (véase 8.1);
- f) características de los drenes (físicas e hidráulicas), con los documentos del marcado CE;
- g) especificaciones de los drenes y otros materiales a utilizar (véase el capítulo 6) y el programa de todos los ensayos y procedimientos de aceptación para los materiales incorporados a la obra.
- h) descripción de un sistema de gestión de la calidad adecuado, que incluya supervisión y seguimiento.

4.3 La información con respecto de las condiciones del terreno debe contener, cuando corresponda:

- a) la geometría del emplazamiento (condiciones de contorno, topografía, accesos, pendientes, restricciones de gálibo, etc.);
- b) las propiedades del terreno del emplazamiento que puedan influir en la ejecución de los drenes verticales:
 - descripción del suelo (tipo de suelo, estratificación, existencia y frecuencia de capas de arena y limo, capas duras);
 - resistencia a la penetración (por ejemplo resultados de los ensayos de penetración);
 - composición, alcance lateral, espesor y firmeza del estrato superficial, raíces de árboles, rellenos, etc.;
 - presencia de adoquines, rocas o capas cementadas que puedan causar dificultades para la ejecución o que puedan requerir la instalación de equipos especiales;
- c) la siguiente información ambiental y climática:
 - información del tiempo en áreas con condiciones climáticas extremas;
 - condiciones marinas (corrientes, movimientos de mareas, altura de las olas, etc.);
 - peligros ambientales (toda contaminación del agua o del subsuelo que pueda afectar al método de ejecución, la seguridad del trabajo o la descarga del material de excavación del emplazamiento, incluyendo la presencia de gas peligroso y el encuentro de munición sin explotar);
- d) las estructuras enterradas, servicios, contaminación conocida y restricciones arqueológicas existentes;

- e) las restricciones ambientales, incluyendo ruido, polución y vibración;
- f) actividades de construcción planeadas o en curso tales como el rebajamiento del nivel freático, construcción de túneles y excavaciones profundas;
- g) experiencias previas de trabajos de instalación de drenes adyacentes a la obra;
- h) las características de la plataforma de trabajo y de la capa drenante (propiedades físicas e hidráulicas);
- i) las condiciones de las estructuras, carreteras, servicios, etc. adyacentes a la obra.

4.4 La siguiente información debe estar disponible para la operación de carga:

- a) programa de realización de la carga;
- b) precarga (carga temporal o permanente);
- c) programación de la carga y posible precarga;
- d) peso unitario del relleno utilizado en la precarga;
- e) notificación de cualquier restricción tales como las fases constructivas requeridas en el diseño;
- f) programa de seguimiento.

4.5 Se deben también dar las siguientes instrucciones:

- a) procedimiento de informe ante cualquier circunstancia imprevista, o condiciones manifestadas que sean diferentes a aquellas asumidas en el diseño;
- b) procedimiento de informe si se adopta un método observacional de diseño.

4.6 Antes del comienzo de los trabajos debe establecerse y acordarse todo requisito adicional o de desviación dentro de las cláusulas de consentimiento dadas en esta norma europea.

5 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA

5.1 Generalidades

5.1.1 Las investigaciones geotécnicas realizadas para el diseño de obras de drenajes verticales que cumpla con los requisitos de la Norma EN 1997-1 debe dar información para la instalación de los drenes verticales (véase el punto b) de 4.3).

5.1.2 El informe de investigación geotécnico debe estar disponible en el tiempo suficiente para permitir planear y ejecutar los trabajos de drenaje vertical.

5.1.3 Si las investigaciones geotécnicas realizadas se consideran insuficientes, se debería realizar una investigación adicional.

5.2 Requisitos específicos

5.2.1 Además de la descripción geológica general y los detalles enumerados en la Norma EN 1997-1, el informe geotécnico del emplazamiento debe contener información con respecto de las condiciones del terreno para la ejecución de instalaciones de drenes verticales y para la carga (véanse los anexos A y B).

5.2.2 La información sobre las condiciones del terreno debe constar de:

- a) niveles piezométricos de las capas subterráneas, su variación y posible desviación de las condiciones de presión hidrostática;
- b) resistencia al corte sin drenaje.

5.2.3 Se debería establecer el nivel del terreno y la localización en cualquier punto de investigación o ensayo relativo al datum nacional reconocido o a un punto de referencia fijo.

6 MATERIALES Y PRODUCTOS

6.1 Aspectos generales

6.1.1 El drenaje vertical incluye el uso de drenes prefabricados y/o drenes de arena.

NOTA En el mercado existen varios drenes prefabricados. La mayoría de ellos están compuestos por el núcleo y un filtro de geotextil.

6.1.2 Los drenes prefabricados compuestos por un núcleo y un filtro de geotextil son objeto del marcado CE. Se deben indicar las siguientes propiedades específicas:

- a) resistencia a tracción, en kN, de acuerdo con la Norma EN ISO 10319;
- b) alargamiento a la fuerza de tracción máxima, en %, de acuerdo con la Norma EN ISO 10319;
- c) resistencia a tracción del filtro, en kN/m, de acuerdo con la Norma EN ISO 10319;
- d) resistencia a tracción de las costuras y juntas, en kN/m, de acuerdo con la Norma EN ISO 10321;
- e) índice de velocidad del filtro (v_{h50}), en mm/s, de acuerdo con la Norma EN ISO 11058;
- f) tamaño de abertura característico del filtro (O_{90}), en μm , de acuerdo con la Norma EN ISO 12956;
- g) capacidad de descarga del dren, en $\text{m}^3/\text{año}$, de acuerdo con la Norma EN ISO 12958 (véase también el anexo A);
- h) durabilidad, en años (véase el anexo B de la Norma 13252:2000).

NOTA Tal como se menciona en la Norma EN 13252, para esta aplicación no es obligatoria la resistencia a la perforación dinámica (ensayo de caída de cono, Norma EN 918).

6.2 Materias primas de los drenes prefabricados

6.2.1 Un dren prefabricado normalmente está compuesto de un geotextil o un producto relacionado con geotextiles.

6.2.2 El producto se usa en aplicaciones que no implican el refuerzo del terreno y cuando la resistencia a largo plazo no es un parámetro significativo, y en suelos naturales con un valor de pH entre 4 y 9 y a una temperatura del suelo menor de 25 °C de acuerdo con la Norma EN 13252. Se aplica una vida útil de cinco años.

6.2.3 Para la fabricación del núcleo se permite el uso de un 5% de material regenerado (por ejemplo, materia prima a partir de núcleo sin usar). La composición se debería conocer y el material se debería procesar del mismo modo que su producto original. Solamente se permite el uso de material reciclado si se puede verificar que no contamina el suelo o las aguas subterráneas.

6.2.4 Los materiales que se usan para fabricar los drenes no deben contaminar ni el suelo ni las aguas subterráneas.

6.2.5 Los drenes biodegradables se pueden usar si cumplen los requisitos de drenaje durante la vida útil del proyecto.

6.3 Drenes banda

6.3.1 Forma y estructura de los drenes banda

6.3.1.1 El dren banda es un dren prefabricado de sección rectangular, normalmente compuesto por un núcleo central con un sistema de acanaladuras rodeado por un filtro. El ancho del núcleo de los drenes banda suele ser 100 mm y el espesor está entre 2 mm y 10 mm.

6.3.1.2 El núcleo debería estar formado por una tira perfilada, con o sin perforación, o una capa perfilada de estructura abierta o cerrada. Debería tener una estructura que proporcionara una capacidad de flujo hidráulico regular.

6.3.1.3 No se debe permitir que se produzcan roturas y/o otros defectos. Se deben hacer regularmente inspecciones visuales en busca de daños como parte del control de calidad de producción.

6.3.2 Medidas

6.3.2.1 La longitud del rollo, la anchura y el espesor del núcleo deberían cumplir con las dimensiones dadas por el fabricante en cualquier parte del mismo (dentro de desviaciones permitidas dadas también por el fabricante). Véase el documento que lo acompaña para el marcado CE (Norma EN 13252).

6.3.2.2 Las medidas deberían cumplir con la Norma EN ISO 9863-1.

6.3.3 Durabilidad

6.3.3.1 La durabilidad del dren debe cumplir con los aspectos de durabilidad indicados en la Norma EN 13252 (deterioro, vidas de servicio requeridas hasta cinco años o más cuando los drenes se colocan para mitigar los problemas de licuefacción de suelos).

6.3.3.2 Los drenes se deberían proteger del deterioro durante su almacenaje a pie de obra.

6.3.3.3 El producto no debe estar expuesto más tiempo que el indicado por el fabricante para el marcado CE (Norma EN 13252) a menos que el producto se proteja por un envoltorio o se almacene a cubierto. Se deben seguir las recomendaciones del suministrador.

6.3.4 Resistencia a tracción y elongación

6.3.4.1 La resistencia a tracción requerida para el dren banda depende mucho del tipo de máquina de instalación, de la técnica de instalación y de la profundidad del dren. La resistencia a tracción de los drenes banda en la dirección longitudinal debe ser lo suficientemente grande para evitar que se rompa durante y después de su instalación.

6.3.4.2 Se debería ensayar la resistencia a la tracción y el alargamiento del dren banda de acuerdo con la Norma EN ISO 10319 (modificada según la anchura del producto).

6.3.4.3 Se recomiendan las siguientes características de un dren banda:

- a) alargamiento $\geq 2\%$ en la rotura del elemento más débil;
- b) alargamiento $\leq 10\%$ a una fuerza de tracción de 0,5 kN (20% si está expuesto a heladas);
- c) fuerza de tracción mínima $> 1,5$ kN en la rotura del elemento más débil. La junta no debería fallar durante el ensayo.

NOTA Estos valores dependen del equipo y procedimiento de instalación, y puede que necesiten ajustarse en consecuencia.

6.3.4.4 La resistencia de la junta, medida de acuerdo con la Norma EN ISO 10321 en un rango de temperaturas aplicable al del emplazamiento del proyecto, debe ser al menos de 1 kN/m.

6.3.5 Capacidad de descarga

6.3.5.1 Las propiedades más importantes son la capacidad de descarga y las características de filtración. Los siguientes factores influyen en la capacidad de descarga:

- a) debido al incremento de presión efectiva lateral durante el proceso de consolidación, el filtro se comprime dentro del sistema acanalado del núcleo, el cual reduce el área de los canales;
- b) la compresión vertical del suelo que se produce durante el proceso de consolidación puede hacer pandear los drenes banda relativamente incompresibles, pudiendo reducir el área de los canales;
- c) los finos pueden introducirse en el núcleo a través del filtro y bloquear el sistema acanalado;
- d) la temperatura del suelo influye en la resistencia a la compresión y fluencia de los drenes y por tanto en la capacidad de descarga.

6.3.5.2 La capacidad de descarga requerida del dren banda depende mucho de la intención de la mejora del terreno, los parámetros de consolidación del suelo, el espaciamiento de los drenes y la profundidad de instalación de los drenes (véase el anexo B).

6.3.5.3 La capacidad de descarga debe ser suficiente para cumplir los requisitos de diseño.

6.3.5.4 El valor recomendado de capacidad de descarga se da en el anexo B.

6.3.5.5 El ensayo de capacidad de descarga se debería realizar de acuerdo con la Norma EN 12958 con las modificaciones dadas en el apartado A.4.1.2 del anexo A.

6.3.5.6 Para aplicaciones habituales, el ensayo de capacidad de descarga se debería realizar a la temperatura de laboratorio y por tanto el informe del ensayo debería hacer referencia a una temperatura de 20 °C. Para aplicaciones en ambientes tropicales, el ensayo de capacidad de descarga se debería realizar a una temperatura correspondiente a la temperatura del suelo del lugar de instalación del dren y por tanto el informe del ensayo debería hacer referencia a dicha temperatura específica.

6.3.5.7 El periodo de ensayo debería ser lo suficientemente largo como para llegar a un valor de capacidad de descarga constante, preferiblemente de al menos dos días a la presión estática máxima estipulada por el proyectista.

6.3.6 Filtro de los drenes banda

6.3.6.1 La funda del filtro debería estar compuesta por un material no tejido consistente en fibras que estén unidas mecánica, química o térmicamente.

6.3.6.2 La funda del filtro debería tener una estructura regular.

6.3.6.3 No se debe permitir la formación de arrugas, roturas, agujeros y/o otros defectos. Las juntas de la funda del filtro se deben construir de tal modo que los finos no puedan introducirse en el núcleo del dren banda.

6.3.6.4 Las inspecciones visuales para encontrar daños se deben hacer regularmente durante la producción de acuerdo con el plan de control de producción en fábrica.

6.3.7 Resistencia a tracción por unidad de anchura del filtro

6.3.7.1 La resistencia a tracción del filtro debe ser suficiente para evitar la rotura durante y después de la instalación.

6.3.7.2 Los ensayos se deberían realizar de acuerdo con la Norma EN ISO 10319. La media de los valores medidos individualmente para la resistencia a tracción no debería ser menor de 3 kN/m en la dirección longitudinal. Para las instalaciones más profundas de 25 m o en condiciones de suelo difíciles se recomienda una resistencia a tracción mínima de 6 kN/m en la dirección longitudinal.

6.3.8 Índice de velocidad del filtro

Los ensayos se deberían realizar de acuerdo con la Norma EN ISO 11058. La media de los valores medidos individualmente del índice de velocidad (v_{h50}) debería ser mayor de 1 mm/s. En caso de la instalación de drenes para problemas de licuefacción, el tamaño de poros del filtro se debería adaptar para asegurar la permeabilidad adecuada del filtro para esta aplicación, véase el apartado 6.4.

6.3.9 Tamaño de poro del filtro

6.3.9.1 El tamaño de poro del filtro se debe seleccionar para asegurar suficiente capacidad de descarga y evitar pérdidas grandes de capacidad de descarga debido a la obstrucción del filtro y/o del núcleo por partículas de suelo. Las juntas del filtro no deben tener un tamaño de abertura mayor que el del filtro del geotextil .

6.3.9.2 Principalmente, en el proyecto se deben dar los requisitos para las características de las funda del filtro, considerando las propiedades del suelo en el emplazamiento y las condiciones de instalación (suelo seco o húmedo, marino).

6.3.9.3 El valor del tamaño de abertura característico O_{90} , medido de acuerdo con la Norma EN ISO 12956 no debería ser mayor de 80 μm .

NOTA El valor de O_{90} puede estar influenciado por los requisitos específicos de proyecto y se pueden aceptar valores mayores.

6.3.9.4 En suelos limosos y limos el tamaño de abertura característico O_{90} del filtro se debería adaptar a las condiciones del suelo de acuerdo con los siguientes criterios:

- a) $< d_{85, \text{suelo}}$ en suelos limosos, que son problemáticos desde el punto de vista de la técnica de filtrado;
- b) $< 1,5 d_{50, \text{suelo}}$ a $2,8 d_{50, \text{suelo}}$ en suelos, que son difíciles desde el punto de vista de la técnica de filtrado, principalmente limos medios y gruesos.

6.3.10 Control de calidad

6.3.10.1 El dren banda debe cumplir con todos los requisitos europeos y los procedimientos de evaluación de conformidad que le aplican. Las propiedades deben estar dentro de los límites indicados en el documento acompañante acreditado por un organismo notificado.

6.3.10.2 En la tabla 1 se indican las características del filtro y del dren, y los métodos de ensayo correspondientes, así como la frecuencia de ensayo propuesta, adaptadas de la Norma EN 13252. El procedimiento de toma de muestras para los diferentes métodos de ensayo deben cumplir con la Norma EN ISO 9862.

NOTA La frecuencia de ensayos in situ se debería acordar entre las partes implicadas.

Tabla 1 – Frecuencia de ensayo propuesta para el control de fabricación

Propiedad	Frecuencia de ensayo propuesta	Norma requerida
Filtro:		
Espesor	25 000 m ²	EN 9863-1
Masa por unidad de área	25 000 m ²	EN 9864
Tamaño de poro	200 000 m ²	EN 12956
Índice de velocidad	200 000 m ²	EN 11058
Resistencia a tracción en la dirección longitudinal	200 000 m ²	EN 10319
Resistencia a tracción en la dirección transversal	200 000 m ²	EN 10319
Composición del dren:		
Anchura y espesor	25 000 m ²	EN 9863-1
Masa por unidad de longitud	25 000 m ²	EN 9864
Resistencia a tracción en la dirección longitudinal	100 000 m ²	EN 10319
Alargamiento a la fuerza de tracción máxima	100 000 m ²	EN 10319
Capacidad de descarga derecho	500 000 m ²	Anexo A
Capacidad de descarga torcido	500 000 m ²	Anexo A
Resistencia a tracción de las juntas del filtro	100 000 m ²	EN 10321
Durabilidad	500 000 m ²	EN 13252

6.4 Dren prefabricado cilíndrico

6.4.1 Forma y estructura de los drenes cilíndricos

6.4.1.1 Un dren cilíndrico consiste en un núcleo abierto anular, corrugado y perforado, rodeado de un filtro. El diámetro del dren es normalmente de 50 mm exterior y 45 mm interior.

6.4.1.2 No se debe permitir que se produzcan roturas y/o otros defectos. Se deben hacer regularmente inspecciones visuales en busca de daños como parte del control de calidad de producción.

6.4.2 Medidas

El diámetro y el espesor del núcleo deberían cumplir con las dimensiones dadas por el fabricante (dentro de las desviaciones admisibles dadas por el fabricante).

6.4.3 Durabilidad

6.4.3.1 La durabilidad del dren debe cumplir con los aspectos de durabilidad dados en la Norma EN 13252 (Anexo B, capítulo B.1 deterioro, y capítulo B.2 vidas de servicio requeridas hasta cinco años o más cuando los drenes se colocan para mitigar los problemas de licuefacción de suelos).

6.4.3.2 Los drenes se deberían proteger del deterioro durante su almacenaje a pie de obra.

6.4.3.3 El producto no debe estar expuesto más tiempo que el indicado por el fabricante para el marcado CE (Norma EN 13252) a menos que el producto se proteja por un envoltorio o se almacene a cubierto. Se deben seguir las recomendaciones del suministrador.

6.4.4 Resistencia a tracción y alargamiento

6.4.4.1 La resistencia a tracción requerida para el dren cilíndrico depende mucho del tipo de máquina de instalación, de la técnica de instalación y de la profundidad del dren. La resistencia a tracción de los drenes en la dirección longitudinal debe ser lo suficientemente grande para evitar que se rompa durante y después de su instalación.

6.4.4.2 Se debería ensayar la resistencia a la tracción y el alargamiento del dren cilíndrico de acuerdo con el ensayo de tracción normalizado con pinzas modificadas.

6.4.4.3 La resistencia de la junta, medida de acuerdo con la Norma EN ISO 10321 en un rango de temperaturas aplicable al del emplazamiento del proyecto, debe ser al menos de 1 kN/m.

6.4.5 Capacidad de descarga y características de filtración

6.4.5.1 La capacidad de descarga de los drenes cilíndricos es normalmente mucho mayor que la requerida para la consolidación del suelo. Puede disminuir si el núcleo cilíndrico se aplasta debido a un incremento de la presión efectiva lateral durante el proceso de consolidación y/o pandeo.

6.4.5.2 La perforación de la tubería (núcleo) no debe cerrarse debido a la compresión de la funda filtrante.

6.4.5.3 La tubería y el filtro de los drenes utilizados para la mitigación de la licuefacción deben resistir el efecto del envejecimiento durante la vida útil de diseño de la estructura.

6.4.6 Filtro de los drenes cilíndricos

6.4.6.1 La funda del filtro debería estar compuesta por una disposición de fibras unidas mecánica, química o térmicamente.

6.4.6.2 La funda del filtro debería tener una estructura regular.

6.4.6.3 No se debe permitir la formación de arrugas, roturas, agujeros y/o otros defectos. Las juntas de la funda de filtro se deben construir de tal modo que los finos no puedan introducirse en el núcleo del dren cilíndrico.

6.4.6.4 Se deben hacer regularmente inspecciones visuales en busca de daños durante la producción de acuerdo con el plan de control de producción en fábrica.

6.4.7 Resistencia a tracción por unidad de anchura del filtro

6.4.7.1 La resistencia a tracción del filtro debe ser la suficiente para evitar la rotura durante y después de la instalación.

6.4.7.2 Los ensayos se deberían realizar de acuerdo con la Norma EN ISO 10319. La media de los valores medidos individualmente para la resistencia a tracción no debería ser menor de 3 kN/m en la dirección longitudinal. Para las instalaciones más profundas de 25 m o en condiciones de suelo difíciles, se recomienda una resistencia a tracción mínima de 6 kN/m en la dirección longitudinal.

6.4.8 Índice de velocidad del filtro

Los ensayos se deberían realizar de acuerdo con la Norma EN ISO 11058. La media de los valores medidos individualmente del índice de velocidad (v_{h50}) debería ser mayor de 1 mm/s. En caso de la instalación de drenes para problemas de licuefacción, el tamaño de poros del filtro se debería adaptar para asegurar la permeabilidad adecuada del filtro para esta aplicación.

6.4.9 Tamaño de poro del filtro

Los requisitos son idénticos a los del apartado 6.3.9.

6.4.10 Control de calidad

El dren prefabricado debe cumplir con todos los requisitos europeos y los procedimientos de evaluación de conformidad que le aplican. Las propiedades deben estar dentro de los límites indicados en el documento acompañante acreditado por un organismo notificado.

6.5 Drenes de arena

6.5.1 El dren de arena tiene una sección circular y está construido de un material granular de alta permeabilidad. El diámetro del dren de arena puede variar de 150 mm a 500 mm.

6.5.2 La distribución de tamaños de grano del material utilizado en los drenes de arena debería preferiblemente estar dentro de los límites indicados en el anexo A.

6.5.3 La permeabilidad de la arena debería ser suficientemente alta para evitar todo problema de drenaje. Los requisitos de permeabilidad dependen de la permeabilidad del terreno circundante y de la profundidad de la instalación del dren (véase el anexo B), y deberían ante todo ser definidos por el diseñador.

6.5.4 El material utilizado para los drenes de arena no debe contaminar el suelo o las aguas subterráneas cuando se instale.

7 CONSIDERACIONES RELACIONADAS CON EL DISEÑO

7.1 Ensayos de campo

7.1.1 Como base para el diseño final de la instalación del dren pueden requerirse áreas de ensayo con varios espaciados de dren y/o varios tipos de dren.

7.1.2 El proceso de consolidación en las áreas de ensayo debería controlarse midiendo los asentos en combinación con la medida de la presión intersticial, preferiblemente por medio de calibres de asentos y piezómetros colocados a varias profundidades. El incremento de la resistencia debido a la consolidación se puede evaluar por ensayos de laboratorio y/o ensayos *in-situ*.

7.1.3 Cuando sea pertinente, se pueden medir los desplazamientos horizontales a lo largo del perímetro del área de ensayo por medio de un inclinómetro.

7.1.4 En caso de áreas de prueba con drenes introducidos parcialmente, se debería tener en cuenta en la influencia del proceso de consolidación de capas subyacentes de suelo sin tratar.

8 EJECUCIÓN

8.1 Procedimiento

8.1.1 Se debe preparar un procedimiento constructivo que detalle los trabajos de drenaje vertical. El procedimiento constructivo debe detallar la localización, la malla de drenes, el equipo y el método de instalación, las posibles restricciones durante la fase constructiva y cualquier peligro asociado a la ejecución de los trabajos.

8.1.2 Se debe evaluar y aprobar el equipo y el método de instalación elegidos por el contratista.

8.1.3 Se debe proporcionar un procedimiento constructivo con la siguiente información como mínimo (véase el capítulo 4):

- a) objetivo y campo de aplicación de la instalación de los drenes;
- b) instalación del emplazamiento y áreas de trabajo;

- c) planta y equipos;
- d) procedimientos de control;
- e) procedimientos con respecto a posibles paradas durante la instalación de los drenes y/o precarga;
- f) verificación de los métodos de ensayo;
- g) documentos de trabajo (replanteo, planos, informes);
- h) medidas para evitar el punzonamiento de agua subterráneas artesianas;
- i) evaluación de la seguridad y riesgo ambiental.

8.1.4 Si se cree conveniente, se deberían realizar instalaciones de prueba para confirmar la idoneidad de la máquina de instalación para las condiciones del emplazamiento y el material de drenante utilizado.

8.2 Preparación del emplazamiento

8.2.1 La preparación debe realizarse de acuerdo con las especificaciones de diseño y con las condiciones específicas del emplazamiento. La preparación debe incluir un acceso adecuado a las instalaciones y para la maquinaria, la nivelación de la plataforma de trabajo, que proporcione una capacidad portante adecuada para los equipos y la instalación de un manto drenante. El manto drenante se puede instalar después de la colocación de los drenes verticales en construcciones en tierra.

8.2.2 Se deben identificar y comprobar las especificaciones de todos los materiales y productos para el drenaje vertical suministrados en el emplazamiento.

8.2.3 Cuando el manto drenante sirva de plataforma de trabajo y se coloque directamente sobre la superficie del terreno, debería tener un espesor mínimo de 0,5 m con una superficie superior inicialmente horizontal. Cuando la capa drenante se coloca sobre la plataforma de trabajo, hecha con un material de relleno ordinario, el espesor de la plataforma de trabajo es normalmente de 0,5 m para una construcción en tierra. El manto drenante tiene entonces al menos 0,3 m de espesor. Éste debería estar formado por arena con gravas o grava arenosa, con un contenido menor del 5% de material con un tamaño de grano $< 0,06$ mm. Se debería proteger de la entrada de material de grano fino y heladas que puedan afectar negativamente a su permeabilidad. También puede consistir en un sistema adecuado de drenaje de geotextil o productos afines con los geotextiles.

8.2.4 Cuando el manto drenante esté formado por una capa de material granular, se deberían dar indicaciones con respecto a los métodos y la frecuencia de comprobación de la distribución de tamaños de grano y la permeabilidad del material del manto del drenaje.

8.2.5 El manto drenante se debería proteger de las heladas para asegurar que su permeabilidad no se reduce considerablemente.

8.2.6 En el caso de instalación de drenes marinos, el manto drenante debería estar formado de material granular, preferiblemente grava arenosa, con un espesor mínimo de 0,5 m. El manto drenante debería colocarse antes de la instalación de los drenes.

8.3 Instalación del dren

8.3.1 La situación de cada dren se debe desviar menos de 0,15 m de la especificada. La verticalidad de la guía no debe ser menor de 50 (vertical):1 (horizontal), a menos que los obstáculos lo hagan imposible.

8.3.2 Cuando sea imposible instalar un dren como consecuencia de obstáculos, otro dren debe instalarse tan cerca como sea posible.

8.3.3 Si la presencia de rellenos o suelo denso en la superficie hace difícil la instalación de los drenes por medios convencionales, las capas duras deberían pretaladrarse o utilizarse otros métodos adecuados antes de la instalación de los drenes.

8.3.4 Los drenes se deben instalar hasta la profundidad especificada en el diseño (dentro de una tolerancia de 0,15 m). En depósitos de suelos blandos con espesores variables, esta profundidad se puede definir como aquella de la capa inferior más resistente.

8.3.5 Se debe proporcionar información con respecto de la fecha y profundidad instalación para cada dren instalado.

8.3.6 Durante la instalación de drenes de arena se debe controlar la cantidad de arena vertida dentro de los drenes para comprobar si se produce estrangulamiento o fallo en los drenes.

8.3.7 Para la instalación de drenes banda, el mandril debería dejar un espacio interior libre para el dren y se debería construir de modo que limite la perturbación del suelo. En el anexo A se da más información.

8.3.8 El equipo de colocación de drenes banda se debería proveer preferiblemente con un registrador totalmente automático. Se deberían registrar los siguientes parámetros:

- a) número de identificación del dren;
- b) fecha y hora;
- c) profundidad de instalación;
- d) cantidad acumulada de longitud de dren instalado;
- e) verticalidad y localización.

8.3.9 Se pueden empalmar los drenes siempre y cuando el camino de drenaje no se obstruya y la resistencia a tracción del empalme cumpla con los requisitos de los apartados 6.3.4 y 6.3.7.

8.4 Aspectos especiales

8.4.1 El método de instalación de drenes no debería poner en peligro la estabilidad del emplazamiento. En particular, se debe prestar atención al exceso de presión intersticial generada durante el proceso de instalación por métodos dinámicos y en arcillas sensibles a la deformación (arcillas sensibles o quick clays) por métodos de desplazamiento.

8.4.2 La ejecución de drenes de arena se debe realizar por personal con experiencia previa en métodos de instalación de drenes (instalación de camisas cerradas, instalación de mandriles abiertos, instalación a chorro, etc.).

8.4.3 Antes de la instalación de los drenes banda en el suelo, se les debería añadir un anclaje que mantenga al dren en el lugar cuando el mandril se saque del suelo. Se debería evitar que el suelo entre en el mandril durante la instalación (mandril cerrado) (véase el anexo A).

8.4.4 Después de que el mandril se saque del suelo, se deben cortar los drenes banda de modo que los drenes estén hidráulicamente conectados de manera correcta con el manto drenante, preferiblemente de 0,2 a 0,25 m sobre la superficie de la plataforma de trabajo.

8.4.5 Para drenes con penetración completa conectados a una capa inferior de alta permeabilidad, la penetración en esta capa debe ser lo suficiente como para asegurar que los drenes estén conectados hidráulicamente de manera correcta con ella.

9 SUPERVISIÓN Y SEGUIMIENTO

9.1 Supervisión

9.1.1 Para comprobar que la construcción cumple con el diseño y otros documentos contractuales, personal cualificado y experimentado en la técnica debe estar a cargo de supervisar la ejecución de los trabajos.

9.1.2 Cuando se den condiciones imprevistas o se disponga de nueva información sobre las condiciones del terreno, se deben comunicar inmediatamente a los responsables del diseño.

9.1.3 Antes del comienzo de los trabajos se deberían establecer los procedimientos específicos para la verificación, control y aceptación.

9.1.4 Se debería establecer la frecuencia real y el método de control.

9.1.5 La identificación en el emplazamiento de drenes prefabricados se debe llevar a cabo de acuerdo con la Norma EN ISO 10320, o de acuerdo con procedimientos similares en caso de drenes con características específicas.

9.2 Seguimiento

9.2.1 El diseño deben especificar el alcance y los procedimientos de seguimiento.

9.2.2 El alcance del sistema de seguimiento debería contar para el tipo de carga (por ejemplo, cargas por tongadas, vacío, rebajamiento del nivel freático), para la elección del tipo de dren y para la experiencia previa de resultados alcanzados bajo suelos, condiciones de carga y tipos de drenes similares.

9.2.3 El proceso constructivo se debe controlar y la información con respecto de las condiciones del terreno y tolerancias constructivas se deben seguir durante la ejecución.

9.2.4 El proceso de consolidación se debe controlar mediante observaciones de asientos adecuadas. El asiento final debido a la consolidación primaria se puede estimar con buena precisión a partir de las observaciones del asiento en relación al tiempo (véase el anexo A).

9.2.5 El proceso de consolidación debería verificarse también por métodos adecuados de observaciones de la presión intersticial, especialmente en el caso de problemas de estabilidad o cuando se use el método observacional del diseño.

9.2.6 Cuando sea pertinente, se deben controlar los movimientos laterales en relación al tiempo a lo largo de los límites exteriores del área cargada. Se deben usar métodos adecuados para evaluar estos movimientos, por ejemplo, con inclinómetros.

9.2.7 La frecuencia de observaciones de asientos y de presión intersticial se debería ajustar para hacer una interpretación real del posible proceso de consolidación.

9.2.8 Los instrumentos de control se deberían instalar con suficiente antelación como para tener valores de referencia estables antes del comienzo del proceso de carga.

9.2.9 Cuando sea pertinente, se debería confirmar el aumento de resistencia del terreno por medio de ensayos de laboratorio sobre probetas y/o ensayos *in situ*.

10 REGISTROS

10.1 Registros durante la construcción

Se deben hacer registros de los aspectos relevantes de la instalación de drenes, ensayos y observaciones tal como se describe en los capítulos 8 y 9, y éstos deben estar disponibles en la obra.

10.2 Registros a la finalización de los trabajos

Se deben realizar registros de los trabajos terminados que incluyan:

- a) registros como los del apartado 10.1;
- b) información que detalle la instalación de los drenes, incluyendo resultados de los ensayos y cualquier cambio de los planos y especificaciones;
- c) detalles de los materiales y productos usados;
- d) detalles de las condiciones geotécnicas del suelo relevantes.

11 REQUISITOS ESPECIALES

11.1 Generalidades

11.1.1 Solamente se consideran en este capítulo aquellos aspectos de la seguridad del emplazamiento y protección del medioambiente que son específicos del drenaje vertical.

11.1.2 Durante la ejecución de los trabajos se deben respetar todas las normas europeas y nacionales, especificaciones y requisitos legales pertinentes con respecto a la seguridad y el medioambiente.

11.1.3 La instalación de los drenes no debe dañar ningún servicio enterrado existente.

11.2 Seguridad

11.2.1 Los equipos de instalación deben cumplir con las reglas de seguridad europeas y/o nacionales con respecto a la construcción y estabilidad. Los documentos con respecto a la operación, mantenimiento y seguridad deben estar presentes en los equipos de instalación. Se debe entrenar a los trabajadores de acuerdo con las leyes de seguridad nacionales con respecto a grúas e instalaciones altas.

11.2.2 El equipo de instalación de drenes se debería equipar con una barra para proteger a la cabina en caso de que ésta vuelque, debido a un fallo local de insuficiente capacidad portante en la plataforma de trabajo.

11.2.3 La plataforma de trabajo debe tener suficiente capacidad portante como para soportar la carga del equipo de instalación de drenes.

11.2.4 Para verificar que la plataforma de trabajo tiene suficiente capacidad portante para soportar la carga del equipo, toda el área se debería ensayar con una pala llena o con un dúmper para localizar puntos débiles en la plataforma de trabajo.

11.2.5 Durante los trabajos de instalación de drenes, en caso de que dos o más equipos de instalación estén trabajando en la misma plataforma de trabajo, éstas deberían estar separadas una distancia en horizontal mayor que la altura total de los equipos.

11.2.6 En el caso de que los trabajos de instalación de drenes estén cerca de líneas de tensión o servicios enterrados, se debería prestar atención a las leyes de seguridad pertinentes.

11.3 Protección del medioambiente

11.3.1 La construcción debe identificar y tener en cuenta las restricciones ambientales tales como el ruido, vibraciones, contaminación de agua e impacto sobre estructuras adyacentes.

11.3.2 Si durante el proceso de consolidación del suelo sale agua subterránea contaminada a través de los drenes, ésta se debe tratar.

11.3.3 En ciertos lugares, la instalación de drenes puede conectar acuíferos que puedan afectar negativamente al medio. Esto se debería evaluar en el diseño y modificarse si es necesario.

11.4 Impacto sobre estructuras adyacentes

Cuando existan estructuras sensibles o taludes inestables cercanos al emplazamiento o a la posible esfera de influencia de los trabajos, se debería observar y documentar su estado cuidadosamente antes y durante los trabajos.

ANEXO A (Informativo)**ASPECTOS PRÁCTICOS DEL DRENAJE VERTICAL****A.1 Introducción**

En los casos en los que la carga externa de suelos de baja permeabilidad, tales como arcillas, turba limosa²⁾, turbas descompuestas, etc., produzcan un incremento en las tensiones que excedan la presión de pre-consolidación del suelo, se inducirá el exceso de presión intersticial, seguida de un proceso de consolidación en el que el agua de los poros se extrae del suelo. La disminución del volumen del suelo que se produce está acompañada de un incremento gradual de la tensión efectiva y una correspondiente disminución en el exceso de presión intersticial. El proceso de consolidación continuará hasta que se haya disipado completamente el exceso de presión intersticial y la carga sea soportada por tensiones efectivas, un proceso cuya duración depende de las características de consolidación del suelo y de las vías de drenaje (cuanto mayor sean estas vías de drenaje, más durará el proceso de consolidación). El objetivo de la instalación de drenes verticales es acortar las vías de drenaje y el tiempo requerido para disipar el exceso presión intersticial, inducida por la operación de carga. El tiempo de disipación del exceso de presión intersticial (el tiempo de consolidación) será más corto cuanto más cerca se instalen los drenes.

A.2 Campos de aplicación

Tal y como se menciona en el capítulo A.1, la instalación de drenes verticales se realiza como un medio de acelerar los asientos de consolidación a largo plazo causados por la carga. Otro objetivo es improvisar las condiciones de estabilidad incrementando la resistencia a cortante general. En zonas sísmicas, el drenaje vertical también se puede usar con el fin de mitigar el fenómeno de licuefacción.

Ejemplos de áreas donde generalmente se ha empleado esta técnica son:

- terraplenes de carreteras y ferrocarriles;
- construcción y refuerzos de diques;
- terraplenes para construcción de urbanizaciones, polígonos industriales, terminales, etc.
- precarga de rellenos;
- construcciones marinas y aplicaciones cercanas a la costa;
- recuperación de tierra, puertos y aeropuertos.

Los drenes verticales también se han usado como un medio electro-osmótico de disminución de agua. En este caso se introducen electrodos dentro de los drenes banda prefabricados y se conectan a un gradiente de voltaje [5] y [27]. El rango de consolidación alcanzado estará influenciado por el gradiente de voltaje y el coeficiente de permeabilidad electro-osmótica.

Un área de creciente aplicación es, dentro del campo ambiental, la rehabilitación de suelos contaminados. El agua contaminada sacada a través de los drenes puede necesitar tratamiento antes de verterla.

La vida útil requerida de drenes verticales se limita normalmente a un máximo de 5 años, con la excepción de drenes que se usen para mitigar la licuefacción, para los que la vida útil necesita ser significativamente mayor.

2) Restos de plantas y animales descompuestos; pueden contener compuestos inorgánicos (Norma EN ISO 14688-1).

A.3 Ejecución del drenaje vertical

Los requisitos funcionales del proyecto forman la base para el diseño geotécnico de un drenaje vertical. La ejecución de un sistema de drenaje vertical se muestra en la figura A.1. Incluye la creación de una plataforma de trabajo, la colocación de un manto drenante, el replanteo de la malla de drenes y la instalación de drenes, seguidos de las operaciones de carga y seguimiento.

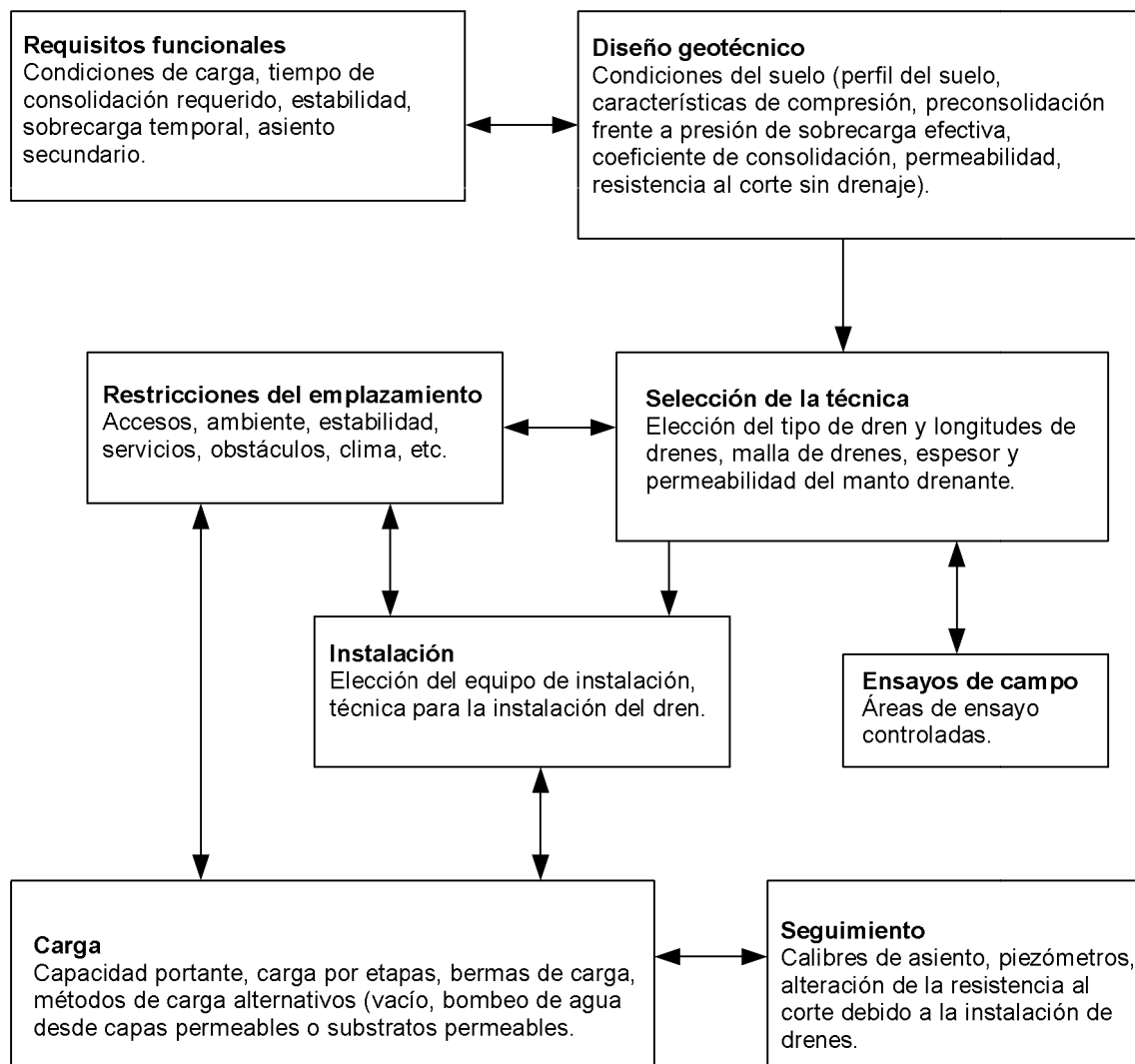
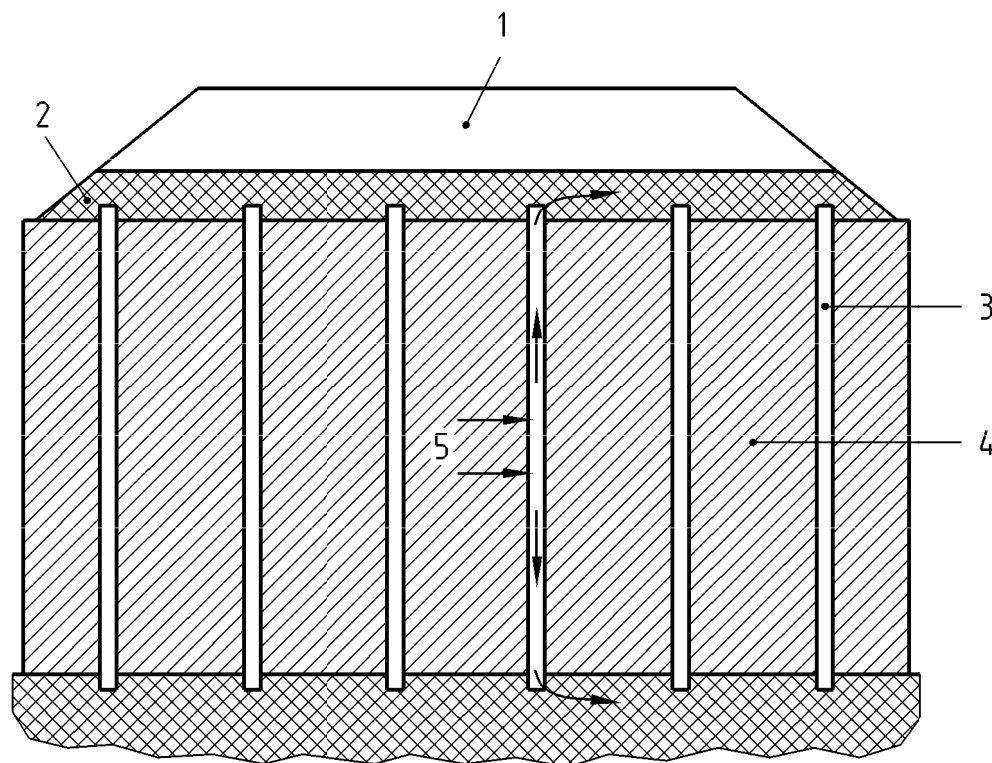


Figura A.1 – Diagrama de ejecución de un drenaje vertical

Los drenes del tipo prefabricado han sustituido gradualmente a los drenes de arena, que anteriormente se usaron con mucha frecuencia. La instalación de drenes verticales puede afectar negativamente a las propiedades originales del suelo (por ejemplo, la disminución de la resistencia al corte y el coeficiente de consolidación). Se debe tener en cuenta una posible disminución de la resistencia al corte en los casos donde se vea amenazada la estabilidad bajo las condiciones de carga. El drenaje vertical y la precarga se muestran en la figura A.2. Debido al exceso de presión intersticial creada por la carga, el agua sale del suelo en la dirección horizontal hacia los drenes y después en la dirección vertical a través de los drenes. Una cantidad de agua menor también sale del suelo en la dirección vertical entre los drenes (efecto contributivo de la consolidación unidimensional).

**Leyenda**

- 1 Sobrecarga
- 2 Manto drenante
- 3 Drenes verticales
- 4 Capa de arcilla
- 5 Flujo del agua intersticial

Figura A.2 – Esquema que muestra los drenes con penetración total (drenes en contacto con las capas drenantes superior e inferior), manto drenante y sobrecarga

Dependiendo del método de instalación y el procedimiento utilizado, la instalación de los drenes verticales puede afectar a las propiedades originales del suelo (por ejemplo, la disminución de la resistencia al corte y del coeficiente de consolidación). Esto se debería tener en cuenta en el diseño.

A.4 Tipos de drenes

A.4.1 Drenes banda

A.4.1.1 Generalidades

Los drenes banda prefabricados están normalmente formados por un núcleo central rodeado de una funda filtrante (véase la figura A.3). El ancho de los drenes banda normalmente es de 100 mm.

A.4.1.2 Tipos de drenes



a) Núcleo acanalado con filtro pegado



b) Núcleo acanalado con filtro envuelto



c) Geomalla con filtro soldado en los bordes



d) Núcleo en forma de panal de abejas con filtro envuelto

Figura A.3 – Ejemplos de drenes banda

A.4.1.3 Métodos de instalación

Los drenes banda se instalan dentro de un mandril hueco con sección rectangular, romboidal o circular. El tamaño del mandril normalmente se adapta para dejar un espacio interior libre para el dren banda durante su instalación. Además, la rigidez a flexión del mandril necesita ser lo suficientemente grande para asegurar la verticalidad del dren instalado.

Un anclaje fijado a la punta del dren antes de la instalación, evita que el mandril arrastre con él al dren cuando éste se saca (véase la figura A.4). Durante la instalación se debería evitar que el suelo penetre entre la superficie interior del mandril y el dren. Si no, el dren estará sometido a tracciones muy altas en el momento que se extraiga el mandril. La forma del mandril y del anclaje tiene que encajar para evitar la intrusión del suelo en el mandril.

La introducción del mandril se realiza bien por medio de una carga estática o bien por una acción dinámica, usando un vibrador o un martillo. Es preferible la instalación estática en suelos sensibles a las alteraciones.

Después de extraer el mandril, los drenes deberían cortarse de modo que se asegure un buen contacto con el manto drenante, preferiblemente unos 25 cm, por encima de la plataforma de trabajo.

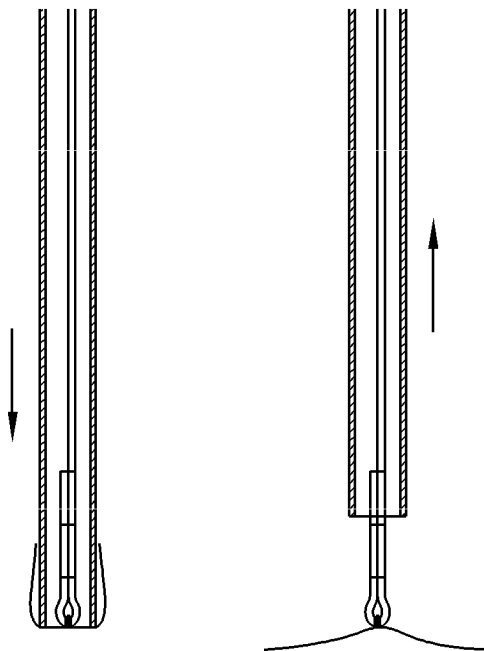


Figura A.4 – Ejemplo de anclajes de dren banda

A.4.1.4 Precauciones para la instalación de drenes

La resistencia a tracción del dren banda necesita ser lo suficientemente alta como para evitar que los drenes se rompan durante y después de la instalación. La resistencia a tracción requerida depende del tipo de equipo de ejecución, de la técnica de instalación, de las condiciones del suelo y profundidad del dren.

Si es posible, el mandril se debería llenar con agua durante la instalación para evitar que el dren banda se rodee de aire cuando el mandril se extraiga. La presencia de aire reduce la permeabilidad del filtro y la permeabilidad horizontal del suelo que rodea al dren, así como la capacidad de descarga. Un acabado hidrófilo en la superficie del filtro mejora la afinidad al agua.

Es preferible una instalación estática a una dinámica en suelos sensibles a las alteraciones.

La instalación del dren produce una zona alterada o remodelada alrededor del mandril en la cual se puede reducir considerablemente la permeabilidad en la dirección horizontal de ciertos tipos de suelo, particularmente los suelos de grano fino con capas más gruesas.

No obstante, en algunos casos la resistencia al corte sin drenaje del suelo puede ser lo suficientemente alta como para resistir un colapso del taladro creado por el mandril y, por tanto, dejar un espacio abierto entre el dren y el suelo cuando se saca el mandril. Esto hace difícil estimar el efecto del remodelo así como el diámetro nominal del dren a usar en el diseño.

A.4.1.5 Factores que influyen en la eficiencia del dren banda

Capacidad de descarga

Es importante que la capacidad de descarga de los drenes instalados (la cantidad de flujo de agua por unidad de tiempo en la dirección vertical a través del dren bajo un gradiente hidráulico igual a uno) sea suficiente para alcanzar el grado requerido de consolidación de acuerdo con el diseño.

La capacidad de descarga requerida (véase el anexo B) depende de la profundidad de la instalación, del espaciado de los drenes (mayor al incrementar la profundidad de instalación y al disminuir el espaciado de los drenes) y de las características de consolidación del suelo (mayor con el incremento de la permeabilidad y compresibilidad).

La capacidad de descarga real de los drenes instalados en el suelo está influida por las propiedades del dren banda, por el método de instalación del dren (incluyendo los efectos de la zona remodelada, el taladro creado por el mandril y la presencia de aire en el dren) y por la interacción entre el suelo y el dren (presión lateral de tierras contra el dren, posible colmatación del filtro y/o el núcleo y el efecto del pandeo).

En suelos altamente compresibles (por ejemplo turbas y turba limosa) la compresión relativa que tiene lugar durante el proceso de consolidación, puede provocar pandeo de los drenes, que pueden reducir seriamente su capacidad de descarga (véase la figura A.5). El pandeo se produce normalmente en la parte alta del suelo. Sin embargo, las condiciones de pandeo extremo mostradas en la figura A.5 se pueden esperar solamente en suelos muy deformables con deformaciones verticales del orden del 50%. Este no es el caso de suelos y condiciones de carga normales, donde las deformaciones verticales son normalmente del 10% al 15% y el fenómeno de pandeo no tiene influencia en la capacidad de descarga.



Figura A.5 – Pandeo de un dren debido a compresiones relativamente grandes de la turba

A.4.1.6 Manto drenante

Para que el sistema de drenaje sea eficaz, se necesita instalar un manto drenante adecuado (una capa de material granular de espesor apropiado y/o un sistema adecuado de drenaje de geotextil o productos relacionados con los geotextiles) para eliminar el riesgo de crear presiones en los drenes debido al agua extraída de ellos (véase A.4.5). La presión en los drenes reduce el gradiente hidráulico creado entre el suelo y los drenes y prolonga el proceso de consolidación.

En las regiones frías se debería proteger al manto drenante de los efectos de las heladas.

A.4.1.7 Determinación de la capacidad de descarga del dren banda

La capacidad de descarga de los drenes banda depende de la estructura del dren y sus constituyentes. Puede determinarse al final del proceso de fabricación por medio de ensayos que tienen en cuenta los principales factores que influyen en la capacidad de descarga, es decir, la presión lateral en el dren que causa la intrusión del filtro en los canales del núcleo, la intrusión de partículas finas de suelo en los canales a través del filtro, posible colmatación de los canales, efectos de pandeo en el área del canal y efecto de la temperatura. Normalmente se incluyen estos ensayos en un procedimiento de control de calidad y no es preciso que se rehagan para cada obra de instalación de drenes. Se deberían usar las características de la capacidad de descarga por el diseñador y referirse a ellas en el pliego de instalación de drenes (véase el capítulo 8).

Capacidad de descarga drenes banda rectos

Se puede obtener la capacidad de descarga a partir de la capacidad de flujo medida de acuerdo con la Norma EN ISO 12958.

NOTA La capacidad de descarga q_w es la capacidad de flujo en el plano q_p multiplicada por el ancho del dren b y dividido por el gradiente hidráulico i . Para las aplicaciones habituales, la capacidad de flujo en el plano³⁾ a una temperatura de 20 °C se puede obtener aplicando un factor de corrección R_T tal como se describe en la Norma EN ISO 12958.

Para aplicaciones donde hay temperaturas de suelo mayores, como en rellenos, depósitos de fangos dragados y en áreas tropicales, se deberían realizar ensayos a la temperatura más alta del suelo de la referida localización.

También se debería tener en cuenta la duración de los ensayos y se debería aplicar un factor de corrección f_{cr} al valor de q_p .

La capacidad de descarga de un dren q_w (m³/año) a 20 °C se calcula como:

$$q_w = \frac{q_p \cdot b \cdot R_T}{i \cdot f_{cr}} = \frac{\theta \cdot b \cdot R_T}{f_{cr}}$$

donde

q_p capacidad de flujo en el plano (m²/año);

b ancho del dren (m);

i gradiente hidráulico;

$$R_T = 1,763 / (1 + 0,03771T + 0,00022T^2)$$

donde

T temperatura en °C;

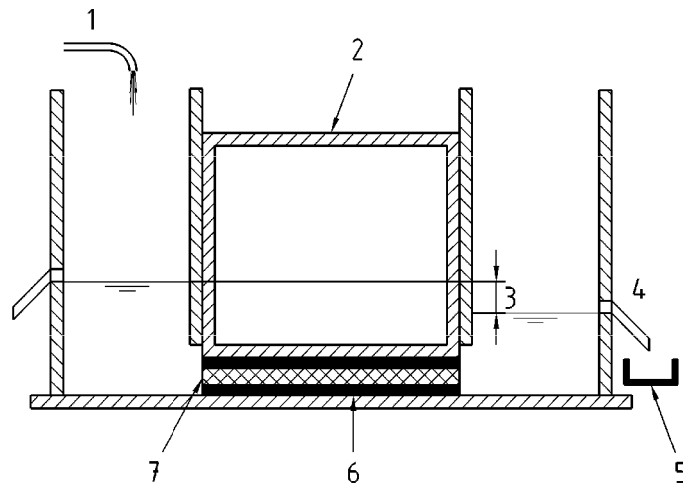
θ transmisividad⁴⁾ (m²/año);

f_{cr} factor de fluencia.

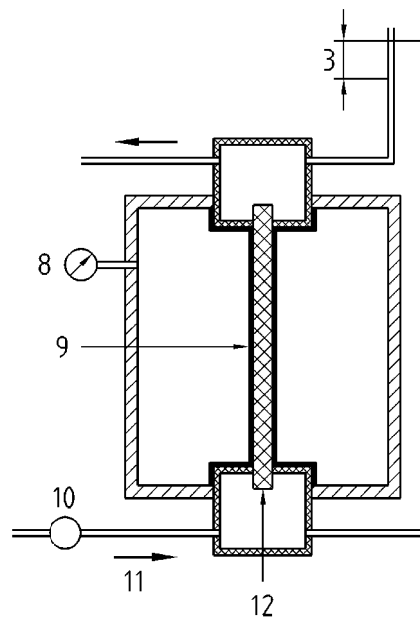
En la figura A.6 se muestran dos tipos de dispositivos de ensayo para determinar la capacidad de descarga de acuerdo con la Norma EN ISO 12958. En el aparato número 1, la muestra se cubre a ambos lados por una goma espumosa de celda cerrada de 10 mm de espesor. La membrana en el aparato 2 es de látex con un grosor máximo de 0,35 mm.

3) El proporción de flujo volumétrico del agua y/o líquidos por unidad de anchura del dren en los gradientes definidos en el plano del dren.

4) Capacidad de flujo de agua laminar en el plano de un dren expresada con un gradiente hidráulico igual a 1.



a) Aparato número 1



b) Aparato número 2

Leyenda

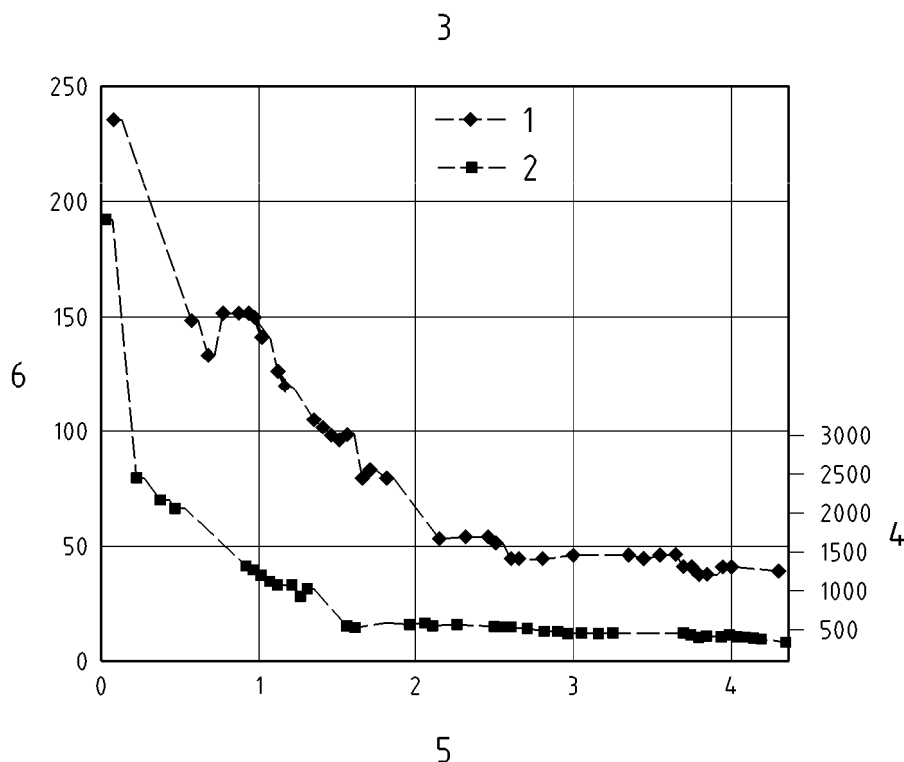
- 1 Suministro de agua
- 2 Carga
- 3 Pérdida de carga
- 4 Sobre flujo
- 5 Recogida de agua
- 6 Espuma

- 7 Muestra de 300 mm de longitud
- 8 Manómetro
- 9 Membrana de goma
- 10 Medidor de flujo
- 11 Dirección del flujo
- 12 Muestra de 350 mm de altura

Figura A.6 – Dispositivos de ensayo para la determinación de la capacidad de descarga [(Figura A.6 a) aparato número 1 y (Figura A.6 b) aparato número 2, de acuerdo con la Norma EN ISO 12958]

La duración del ensayo de capacidad de descarga influirá en la capacidad de flujo en el plano debido a la fluencia del filtro, que causa una intrusión del filtro en el sistema acanalado, reduciendo así la capacidad de descarga (véase la figura A.7). El factor de fluencia f_{cr} anteriormente mencionado, se usa para estimar el valor de la capacidad de descarga estabilizada a partir de los resultados de un ensayo con una duración menor. Depende del aparato de ensayo y se debería determinar o comprobar para cada dispositivo de ensayo.

En la figura A.7 se muestran las variaciones en la capacidad de descarga de un dren banda con el tiempo, medida en dos dispositivos de ensayo diferentes.



Leyenda

1 Aparato 1 (ASTM)

2 Aparato 2 (Delft)

3 Capacidad de descarga a 30 °C, 500 kPa

4 Capacidad de descarga, m³/año

5 Tiempo (semanas)

6 Capacidad de descarga, cm³/s

Figura A.7 – Efecto de fluencia en la capacidad de descarga observada en la duración de un ensayo de capacidad de descarga [6]

Basándose en la experiencia, se proponen los factores de fluencia indicados en la tabla A.1 para los dos aparatos de ensayo mostrados en la figura A.6. Si se usan otros tipos de dispositivos de ensayo, se deberían determinar los factores de fluencia basados en datos medidos similares a los mostrados en la figura A.7.

Tabla A.1 – Factores de fluencia (valores si no se dispone de datos históricos)

Periodo de ensayo Días	Factor de fluencia f_{cr}	
	Aparato 1	Aparato 2
2	10	5
7	8	3
30	3	1

Cuando sea pertinente, se puede realizar un ensayo de flujo en el plano de 30 días para determinar el factor de fluencia de la capacidad de descarga de cada tipo de dren. Para aplicaciones usuales, se pueden usar los valores basados en los ensayos requeridos para obtener el marcado CE. Si los ensayos se llevan a cabo con el aparato número 1, los valores de los factores de fluencia siempre se tienen que multiplicar por 3.

Los ensayos de capacidad de descarga se deberían realizar con un gradiente hidráulico de 0,1 bajo las presiones estáticas de 20 kPa, 100 kPa y 200 kPa respectivamente, posiblemente también bajo presiones estáticas mayores con respecto a las condiciones de diseño específicas.

Estas condiciones de diseño específicas dependen de la instalación del dren, la carga del relleno, sobrecarga temporal y/o vacío. La presión de ensayo (kPa) se puede calcular a partir de la relación:

$$\sigma_t = f_m K_o \sigma'_v$$

donde

σ_t presión externa aplicada durante el ensayo;

f_m factor parcial para la presión de ensayo (1,2, véase el anexo B, apartado B.4.1.3);

K_o coeficiente de empuje pasivo (0,65 a 0,75 para suelos con alto índice de plasticidad);

σ'_v presión *in situ* de sobrecarga efectiva a la profundidad de instalación más el incremento de tensión vertical causada por el relleno, sobrecarga temporal y/o vacío a la profundidad de instalación.

Capacidad de descarga de un dren banda pandeado

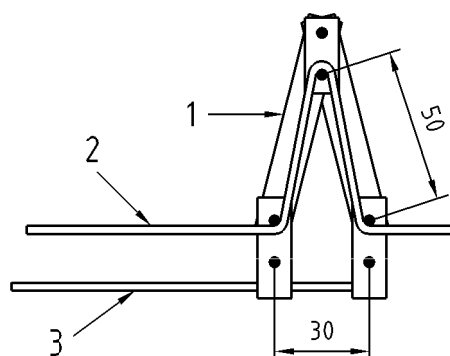
La influencia del pandeo en la capacidad de descarga de un dren banda debería considerarse en el diseño cuando la deformación vertical estimada del suelo alrededor del dren sea grande (normalmente más del 20%).

El ensayo de capacidad de descarga en drenes pandeados se debería realizar con un gradiente hidráulico de 0,1 bajo las presiones estáticas de 20 kPa, 60 kPa y 120 kPa respectivamente, posiblemente también bajo presiones estáticas mayores con respecto a las condiciones de diseño específicas. Esto puede realizarse, por ejemplo, usando el aparato mostrado en la figura A.8, el cual es adecuado para el dispositivo número 2 de la figura A.6.

El informe del ensayo debería contener la información indicada en el capítulo 9 de la Norma EN ISO 12958:1999. Por otra parte, se recomienda presentar los resultados del ensayo de capacidad de descarga tal como se muestran en la tabla A.2, ambos para drenes rectos o pandeados.

NOTA Como el ensayo se hace con un ángulo muy pronunciado del dren banda, sin medidas de ángulos intermedios, la capacidad de descarga del dren pandeado sirve como índice de influencia de deformaciones verticales en la capacidad de descarga y debería usarse como tal por el diseñador.

Dimensiones en milímetros



Leyenda

- 1 Barra A
- 2 Muestra del dren
- 3 Barra guía

Figura A.8 – Ejemplo de aparato para realizar el ensayo de capacidad de descarga de un dren pandeado [12]

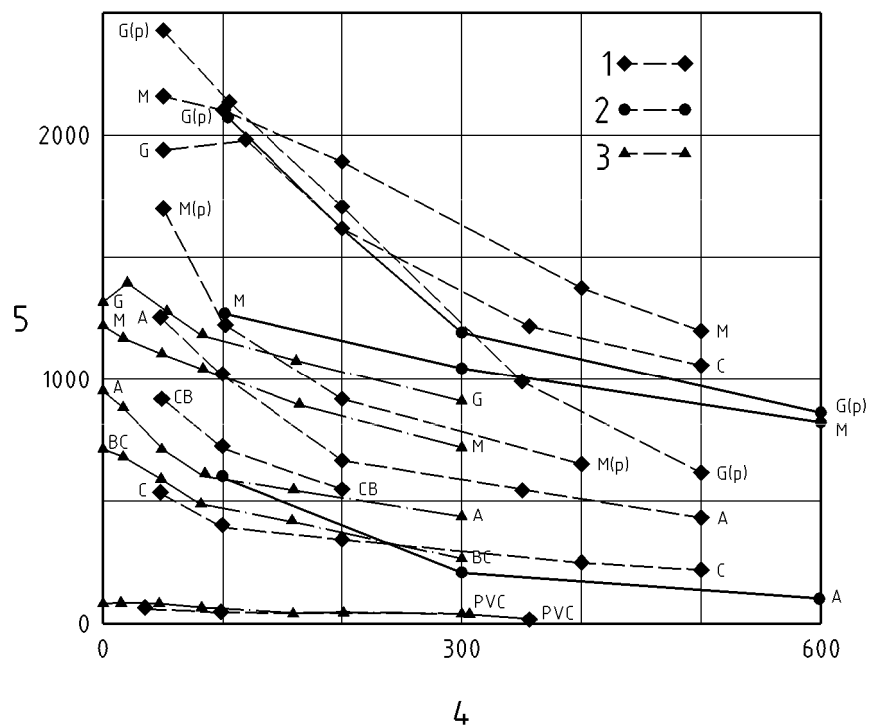
Tabla A.2 – Capacidad de descarga q_w y q_{wb} (en $\text{m}^3/\text{año}$) para varias presiones estáticas en kPa y un gradiente hidráulico $i = 0,1$

Muestra	Dren recto				Dren pandeado			
	q_w (20/0,1)	q_w (100/0,1)	q_w (200/0,1)	q_w (XXX/0,1)	q_{wb} (20/0,1)	q_{wb} (60/0,1)	q_{wb} (120/0,1)	q_{wb} (XXX/0,1)
1								
2								
3								
Media								

Capacidad de descarga de drenes banda en contacto con el suelo

Los valores de la capacidad de descarga obtenidos en los aparatos de ensayo mostrados en las figuras A.6 y A.7 pueden diferir de aquellos obtenidos si el dren se rodea del suelo en que se instala. Por tanto, los valores obtenidos en la cámara de ensayo sirven como un índice de qué se puede estimar en el campo. Obviamente, la capacidad de descarga se reducirá progresivamente al incrementar la intrusión del filtro en los canales del núcleo debido al incremento de la presión lateral del suelo durante el proceso de consolidación.

Los ensayos de capacidad de descarga en drenes banda instalados en el suelo a escala de laboratorio y sujetos al incremento de la presión lateral efectiva han dado los resultados mostrados en la figura A.9. En los ensayos italianos [24] los drenes se ensayaron a escala real. En los ensayos suecos [19] y japoneses [26] los drenes se ensayaron con un ancho reducido (40 mm y 30 mm respectivamente).



Leyenda

- 1 Ensayos a pequeña escala (Suecia)
- 2 Ensayos a gran escala (Italia)
- 3 Ensayos a pequeña escala (Japón)
- 4 Presión lateral efectiva, kPa
- 5 Capacidad de descarga, m³/año

A = Alidren

BC = Bando Chemical

C = Colbond

CB = Castle Board

G = Geodren

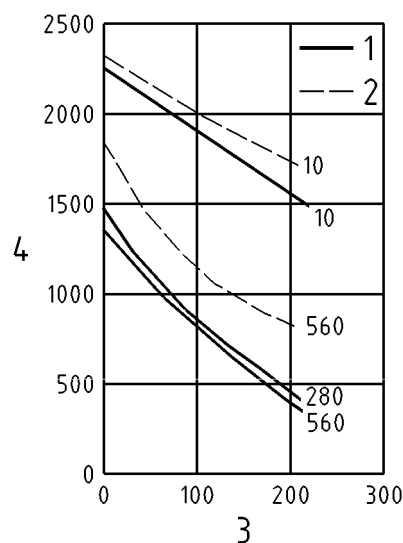
M = Mebradren

PVC = dren de PVC

(p) indica funda filtro de papel especialmente preparado

Figura A.9 – Resultados de los ensayos de capacidad de descarga para diferentes drenes banda realizados a escala de laboratorio. Drenes en el suelo [19][24][26]

Se puede esperar el envejecimiento del filtro en el suelo debido a la actividad bacteriológica o al ataque por hongos. En la figura A.10 se muestra el resultado de una investigación de los efectos del envejecimiento en la capacidad de descarga realizada por [29]. Los ensayos se realizaron en muestras de drenes arrancados de turbas y turba limosa después de diferentes periodos de tiempo después de su instalación.



Leyenda

- 1 Turba
- 2 Turba limosa
- 3 Presión lateral efectiva, kPa
- 4 Capacidad de descarga, m³/año

Figura A.10 – Influencia en la capacidad de descarga del deterioro del filtro con respecto del tiempo [29].
El número de días que los drenes se dejaron en el suelo después de la instalación se muestra en cada curva.
Las líneas continuas representan los drenes colocados en la turba, mientras que las líneas discontinuas representan los drenes instalados en la turba limosa

La colmatación del filtro y/o núcleo con partículas arcillosas o coloidales finas se evita habitualmente imponiendo un valor máximo del tamaño de abertura característico O_{90} del filtro (definido para un geotextil en la Norma EN ISO 12956), la cual se basa en la experiencia y en ensayos de laboratorio, y se debería adaptar a la distribución del tamaño de partículas del suelo.

A.4.2 Drenes cilíndricos prefabricados

A.4.2.1 Tipos de drenes

Un dren prefabricado está formado por un núcleo tubular, normalmente de 50 mm de diámetro exterior y 45 mm de diámetro interior, hecho de un plástico anular corrugado y perforado, resistente al aplastamiento, golpes, tracción y envejecimiento, rodeado por una funda de filtro hecha de geotextil no tejido.

A.4.2.2 Método de instalación

Los drenes cilíndricos prefabricados se instalan en el interior de un mandril cilíndrico hueco de un diámetro exterior de habitualmente 100 mm. El mandril, que normalmente se empuja en el suelo con una carga estática, necesita tener suficiente rigidez. Se fija una chapa de anclaje a la punta del dren antes de la instalación y se evita que el suelo penetre en el mandril durante la instalación.

Cuando se retira el mandril, se cortan los drenes de modo que se asegure un buen contacto con la capa de drenaje, preferiblemente 25 cm sobre la plataforma de trabajo.

A.4.2.3 Factores que influyen en la eficacia del dren

Se considera que los drenes cilíndricos tienen suficiente capacidad de descarga para cualquier proyecto de drenaje vertical. El único factor reconocido que puede limitar su eficiencia es la existencia de una zona remodelada alrededor del dren, creada por la inserción del mandril. De acuerdo con la experiencia, se puede analizar teóricamente el proceso de consolidación, sin tener en cuenta el efecto de la instalación del mandril y el remodelo, asumiendo un diámetro de dren de 50 mm.

A.4.2.4 Otros campos de aplicación

En EE.UU. se han desarrollado los drenes anulares cilíndricos y corrugados compuestos de una tubería de polietileno de alta densidad, rodeados de un filtro de geotextil no tejido, para la reducción del potencial de licuefacción en regiones sísmicas [44].

A.4.3 Drenes de arena

A.4.3.1 Tipos de drenes

Los drenes de arena están formados normalmente por columnas de arena de 18 cm a 50 cm de diámetro, que se instalan en el suelo y están en contacto directo con el suelo.

La arena que se usa para los drenes de arena debería estar preferiblemente dentro de los límites que se muestran en el área rayada de la gráfica de la figura A.11. Sin embargo, hay muchos casos en los que los drenes de arena han funcionado con éxito teniendo distribuciones de grano más amplias, estando fuera de los límites del área rayada. La distribución del tamaño de grano de la arena en estos casos históricos está dentro de los límites dados por las líneas discontinuas exteriores de la figura A.11.

A.4.3.2 Métodos de instalación

Los drenes de arena se instalan tanto por los denominados métodos de no-desplazamiento como por métodos de desplazamiento.

Los *métodos de no-desplazamiento* constan de perforación con camisa y barrena, perforación con barrena mecánica, lanza de agua, perforación con barrena hueca, perforación por lavado. El *método de barrena* consiste en atornillar la barrena hasta la profundidad requerida, y después tirar de ella hacia arriba mientras que la arena se transfiere al agujero de debajo de la punta a través del eje. En el *método de lanza de agua*, el agujero que se llenará de arena, se forma primero con un chorro de agua a una presión y flujo ajustados a las condiciones del suelo. Luego la arena se vierte en el agujero sin compactar.

Los *métodos de desplazamiento* constan de mandril o de métodos de vibro-instalación. En el *método del mandril* se introduce en el terreno un mandril hueco con una tapa en su extremo inferior. Al retirar el mandril, se abre la tapa y se llena el mandril con arena saturada de agua, creando así el dren de arena. En el *método de vibro-instalación*, se introduce en el terreno un mandril con o sin tapa en su extremo inferior hasta la profundidad requerida por medio de un vibrador superior montado en el mandril. Después de la instalación se tira del vibrador continuamente hacia arriba sin compactar el relleno de arena introducido desde la parte inferior del mandril.

Alternativamente, los drenes se instalan por medio de un vibrador en profundidad, el cual, después de su instalación se tira continuamente hacia arriba sin compactar el relleno de arena.

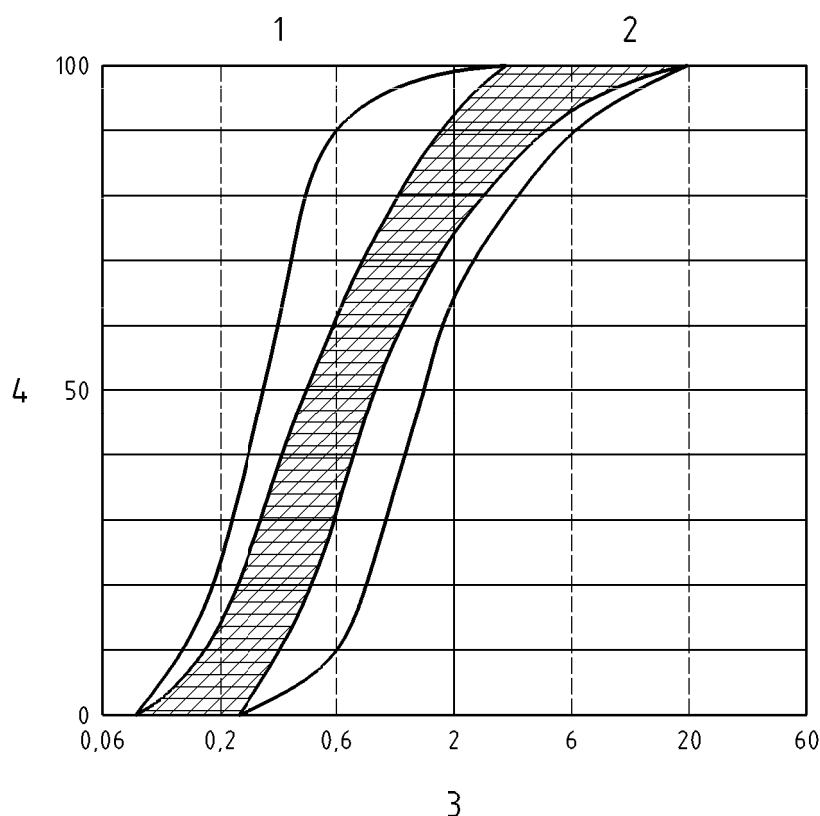
A.4.3.3 Eficacia de los drenes de arena

Continuidad y diámetro

La continuidad de los drenes de arena es de importancia primordial y el diámetro de los drenes instalados debería coincidir con los requisitos de diseño. La continuidad puede estar en riesgo cuando se crea primero el agujero y después se rellena con arena. Este es el caso del método de la lanza de agua y del método de barrena no hueca. La continuidad y el diámetro constante de los drenes se aseguran en los métodos cuando la arena se vierte dentro de un tubo hincado en el suelo y en el método de la barrena hueca.

Capacidad de descarga

La capacidad de descarga de los drenes de arena con la distribución de tamaño de grano preferible indicada en la figura A.11 varía de unos 800 m³/año (25 cm³/s) para drenes de arena con un diámetro de 0,18 m hasta unos 4 000 m³/año (127 cm³/s) para drenes de arena con un diámetro de 0,4 m. Los requisitos de permeabilidad de los drenes de arena dependen de la permeabilidad del suelo que los rodea y la profundidad de instalación del dren (véanse las figuras B.2 a B.5 del anexo B). Estos valores son mayores que los requeridos en los emplazamientos del drenaje vertical. Por tanto, normalmente se puede considerar que los drenes de arena no se ven afectados por la resistencia del pozo.



Leyenda

- 1 Arena
- 2 Grava
- 3 Tamaño de grano d , mm
- 4 Contenido de granos $< d$ en peso, % de la masa total

Figura A.11 – Límites del tamaño de grano del material granular a usar en los drenes de arena

Los valores de la capacidad de descarga descritos se basan en la condición de que la arena usada para los drenes de arena se satura con agua durante el proceso de instalación. La intrusión de aire en la arena reduce enormemente la capacidad de descarga.

Interacción con el suelo de alrededor

La instalación de tubos de extremo cerrado (mandril) provoca un desplazamiento lateral del suelo alrededor del tubo acompañado por un efecto de afección general y por una zona remodelada donde las capas horizontales con alta permeabilidad se deforman verticalmente. La instalación puede también crear fisuras verticales en suelo de alrededor del dren, que se rellena con arena [37].

La instalación por el método de chorro causa una afección al suelo mínima debido a la instalación. Generalmente crea un agujero mayor que el diámetro nominal y por tanto se considera particularmente eficiente. La presión del chorro y el flujo de agua necesitan ser adecuados a las condiciones del suelo.

Durante la instalación se debería controlar el riesgo de estrangulamiento o de posible fallo del dren debido a un insuficiente soporte del suelo que lo rodea. Esto se puede hacer controlando continuamente la cantidad de arena que se vierte en el dren. El estrangulamiento puede ser un problema muy serio en las arcillas sensibles.

A.4.3.4 Drenes de arena envueltos en geotextil

Se puede evitar el riesgo de estrangulamiento en los drenes de arena envolviéndolos en geotextil. Originalmente esto se hizo solo en drenes de pequeño diámetro pero hoy en día se usa también en drenes de mayor diámetro, tal como se ha mencionado anteriormente.

La capacidad de descarga de los drenes de arena con la distribución de tamaño de partículas preferible indicada en la figura A.11 es de 350 m³/año (11 cm³/s) para drenes con un diámetro de 0,12 m. El material a usar en drenes de pequeño diámetro, por ejemplo mechas de arena, debería ser más grueso que el mostrado en la figura A.11 con el fin de cumplir con los requisitos de capacidad de descarga.

A.5 Manto drenante y plataforma de trabajo

Para asegurar la eficacia del sistema de drenaje vertical, se debe colocar un manto drenante adecuado (una capa de material granular de espesor adecuado y/o un geotextil o producto similar adecuados). Los asientos de consolidación causan una depresión de la parte central del manto drenante. Por tanto, se pueden necesitar pozos temporales para evacuar el agua drenada del manto drenante, especialmente en casos donde el ancho del manto es grande. Cuando sea pertinente se debería considerar proteger el manto drenante de los efectos de las heladas.

La permeabilidad del manto drenante debe ser lo suficientemente grande para no causar presiones en los drenes tal como se muestra en la figura A.12.



Figura A.12 – Ejemplo de manto drenante de material granular con insuficiente permeabilidad, mostrando el agua atrapada en el manto drenante, lo que implica presiones en el dren.

La ejecución de un proyecto de drenaje vertical requiere la presencia de una plataforma de trabajo con una superficie superior adecuada para facilitar la instalación vertical de los drenes. La plataforma de trabajo ha de ser capaz de soportar los equipos de instalación. La presencia de bolsillos y lentejas de suelo blando en la plataforma de trabajo puede reducir mucho la capacidad portante local y hacer que el equipo de instalación vuelque. La colocación de una capa de separación de geotextil bajo la plataforma de trabajo puede ser un modo de evitar el riesgo de heterogeneidades en la plataforma de trabajo.

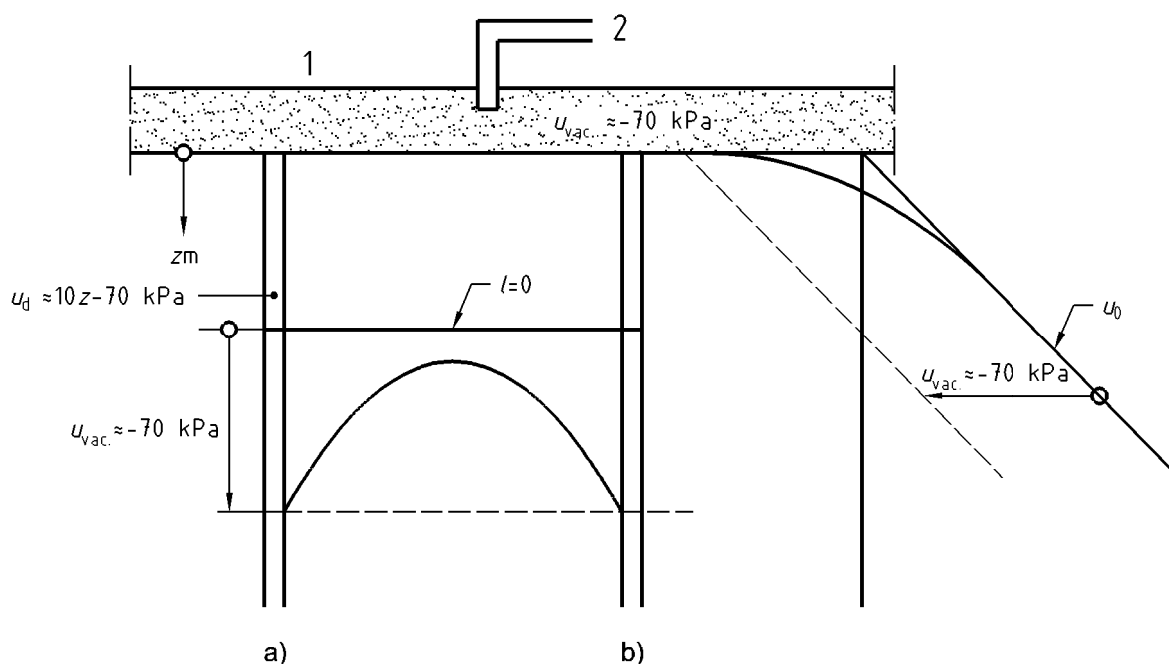
A.6 Carga

La operación de carga normalmente consiste en la colocación de una superficie de carga encima del manto drenante. Esta es una fase crítica de los proyectos de drenaje vertical. La carga necesita realizarse de modo que la estabilidad del terreno no se ponga en peligro. Por tanto, el peso unitario del relleno que se usa para la carga tiene que estar definido y controlado. La resistencia al corte sin drenaje del suelo puede afectarse negativamente, no solo por la instalación del dren sino también por la operación de carga si se realiza con equipos pesados. En la mayoría de los casos, es importante que la operación de relleno se controle observando los asientos y la presión intersticial.

Si la resistencia al corte del suelo es demasiado baja como para permitir colocar el relleno en toda la longitud, se precisa de bermas de carga. Alternativamente, la carga tiene que realizarse por etapas, midiendo la ganancia de la resistencia al corte y de la disipación del exceso de presión intersticial durante el proceso de consolidación, requerido para permitir la colocación de la siguiente etapa de carga y así sucesivamente. En el caso de la carga por etapas, se necesita comprobar el espesor especificado de cada capa de terraplén para evitar una carga excesiva y consecuentemente el fallo.

El rebajamiento del nivel freático en estratos permeables conectados a los drenes puede utilizarse también como alternativa o en combinación con carga externa.

En los lugares de instalación de drenes donde las condiciones de estabilidad no sean satisfactorias, la superficie de carga se puede sustituir o aumentar por el método de vacío (véase la figura A.13). En este caso el manto drenante se recubre con una cubierta hermética que se sella herméticamente a lo largo de sus bordes exteriores. El manto drenante se conecta a una bomba de vacío que produce una infrapresión en los drenes en relación con la presión intersticial del suelo produciendo la consolidación [9] [10]. La infrapresión alcanzada por el método de vacío en este caso corresponde a un máximo de 70 kPa a 80 kPa.



Leyenda

u_d = presión intersticial en los drenes

u_{vac} = infrapresión (considerada igual a un vacío del 70% de la presión atmosférica)

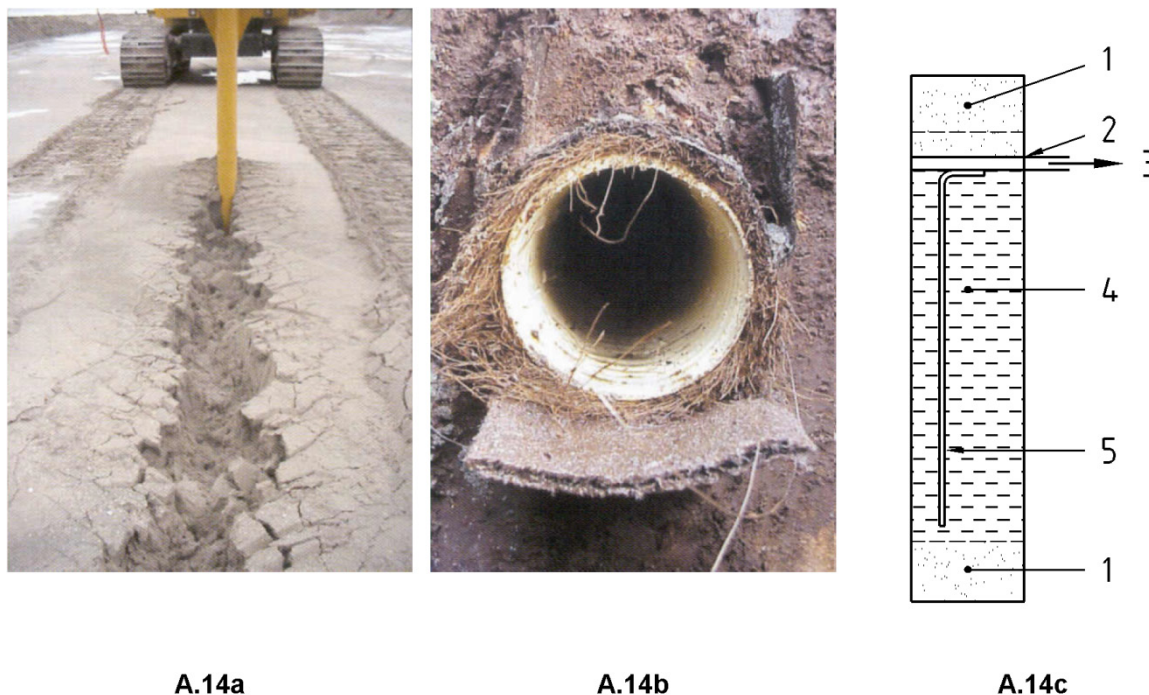
- a) Disipación de la presión intersticial causada por los drenes
- b) Disipación de la presión intersticial sin drenes

- 1 Cubierta hermética
- 2 Hacia la bomba de vacío

Figura A.13 – Esquema del método de vacío y su efecto en la presión intersticial, ambos para flujo de agua freática horizontal hacia los drenes (a) y para flujo de agua freática vertical entre los drenes (b)

En la figura A.14 se muestra otro método para alcanzar el vacío [40]. En este sistema, los drenes banda se cortan en la parte inferior de las zanjas excavadas a una profundidad de 1 m por debajo de la parte inferior de la plataforma de trabajo a lo largo de cada fila de drenes verticales. Entonces cada fila de drenes banda se conecta a un dren circular horizontal, el cual se cubre con una funda. Los drenes cilíndricos se conectan a una bomba de vacío y la infrapresión que así se alcanza en los drenes cilíndricos se transfiere a los drenes verticales.

Una ventaja de este sistema es que no se necesita la cubierta hermética sobre el todo el área como en el sistema convencional. Una desventaja es que no se alcanza ninguna infrapresión en la capa de 1 m superior. En este caso la infrapresión máxima alcanzada es de 50 kPa.



- Leyenda
- 1 Arena
 - 2 Funda
 - 3 Hacia la bomba de vacío
 - 4 Arcilla
 - 5 Drenes verticales

Figura A.14 – Instalación de dren cilíndrico horizontal (izquierda) y su conexión a los drenes verticales

A.7 Seguimiento

El efecto del drenaje vertical debería controlarse mediante la medición tanto de los asentos como de la presión intersticial. Los valores medidos se usan para comprobar el ritmo real de consolidación y las hipótesis de diseño. Es importante que el sistema de seguimiento se instale a tiempo antes de la instalación de los drenes, con respecto al efecto mismo de la instalación de drenes (exceso de presión intersticial debida a la alteración causada por la instalación del dren y su posible influencia negativa en la estabilidad) y con respecto de la interpretación de los resultados de las mediciones consecuentemente alcanzados.

Generalmente el objetivo de la mejora del suelo mediante drenaje vertical es evitar que ocurran asentos inaceptables. Por tanto, la observación de los asentos es un elemento necesario del sistema de seguimiento.

Las observaciones del exceso de presión intersticial por medio de piezómetros instalados a diferentes profundidades es sin duda el método más adecuado para comprobar que se ha alcanzado el grado de consolidación de acuerdo con lo establecido en diseño. Se deberían colocar los piezómetros en el centro entre los drenes donde el ritmo de consolidación es mínimo. Sin embargo, la interpretación de los resultados de las medidas de presión intersticial puede ser bastante complicada. Los resultados dependerán de la posición de los piezómetros en relación con los drenes (que pueden variar de la posición teórica), el piezómetro (la punta filtrante) se moverá hacia abajo durante el proceso de consolidación, los resultados se pueden afectar por la presión intersticial de los alrededores, la evolución del gas puede dar resultados erróneos, etc. Por otra parte, la situación de la presión intersticial después de completarse la consolidación puede que no vuelva a la condición de equilibrio original. A pesar de los problemas, las medidas de presión intersticial son una parte importante del sistema de seguimiento y la conclusión a obtener de los resultados de la mejora del suelo alcanzada debería basarse en las observaciones tanto de los asentos como de la presión intersticial.

En la figura A.15 se muestran las localizaciones típicas para realizar medidas de asientos y de presión intersticial en el caso de terreno homogéneo de espesor limitado, y para el caso de suelo estratificado se muestran en la figura A.16. El número de perfiles de medida depende de la extensión del emplazamiento, y del espesor y estratificación de las capas compresibles que se tratan en el drenaje vertical.

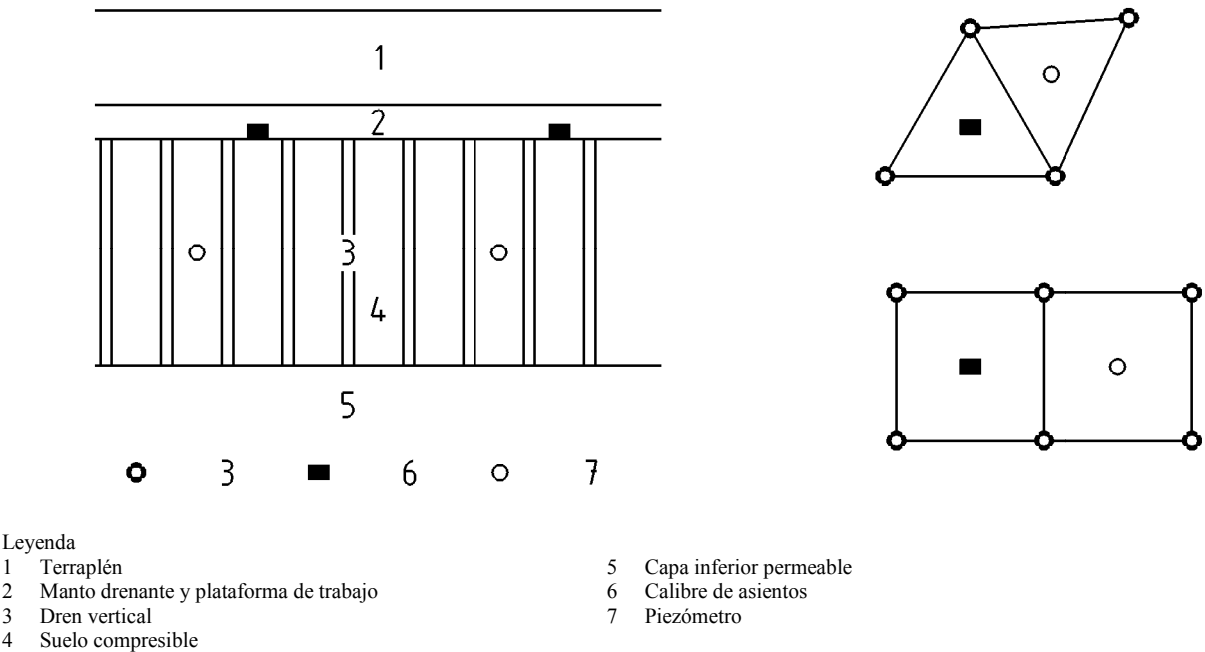
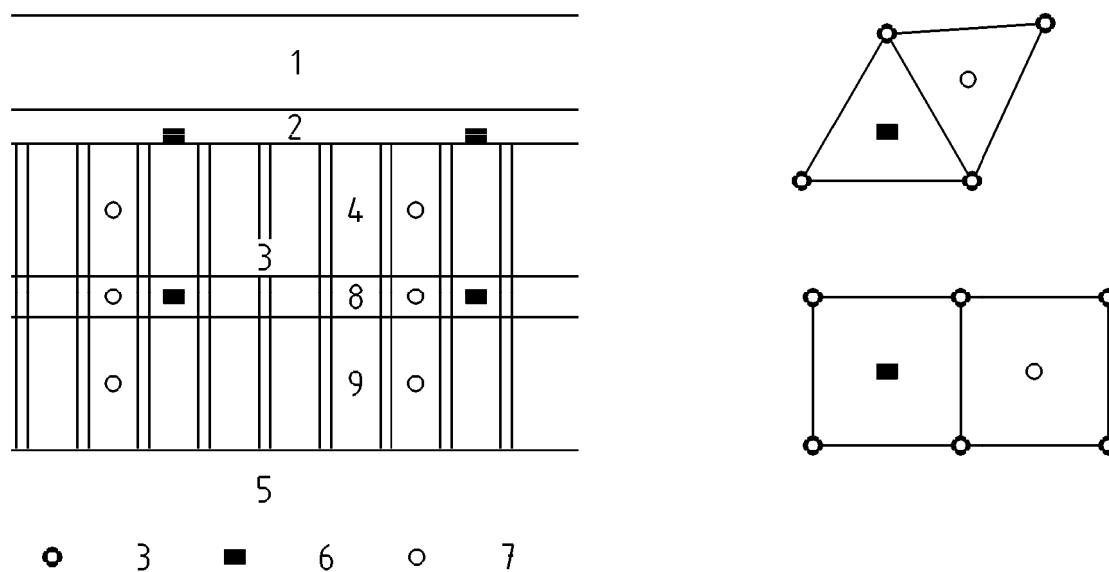


Figura A.15 – Instrumentación típica para controlar la eficiencia del drenaje vertical (caso simple)



Leyenda

- | | |
|--|---------------------------|
| 1 Terraplén | 6 Calibre de asientos |
| 2 Manto drenante y plataforma de trabajo | 7 Piezómetro |
| 3 Dren vertical | 8 Capa de arena permeable |
| 4 Suelo compresible | 9 Suelo compresible |
| 5 Capa inferior permeable | |

Figura A.16 – Instrumentación típica para controlar la eficiencia del drenaje vertical (emplazamiento con diferentes capas)

En la práctica, se necesita considerar el grado de consolidación alcanzado en las capas de suelo con menor coeficiente de consolidación (que normalmente también tienen las características de compresión más desfavorables). En suelos homogéneos, el grado más bajo de consolidación se alcanza cuando el efecto de consolidación vertical unidireccional es mínimo, es decir, en el medio de la capa de arcilla. Si la capacidad de descarga de los drenes es demasiado baja, esto influirá enormemente en el grado de consolidación alcanzado al incrementar la profundidad de la instalación. Comprobar el grado de consolidación alcanzado en la capa de suelo utilizando únicamente las medidas de asientos superficiales, puede llevar a conclusiones erróneas.

ANEXO B (Informativo)

ASPECTOS DE DISEÑO

B.1 Generalidades

Este anexo cubre algunos aspectos específicos del diseño de los sistemas de drenaje vertical, incluyendo la evaluación de las características del suelo y la influencia de las características de los drenes, el patrón y la profundidad de la instalación de los drenes. No cubre los principios o métodos de diseño geotécnico en detalle, para los cuales se debería consultar las Normas EN 1997-1 y EN 1997-2.

El objetivo de la aplicación de un drenaje vertical es tratar y resolver problemas asociados con los siguientes aspectos:

- 1) asientos de consolidación en suelos de baja permeabilidad (como consecuencia de carga superficial o rebajamiento del nivel freático);
- 2) estabilidad (de estructuras y terraplenes).

Como resultado de la mejora del terreno mediante drenaje vertical, se pueden reducir los efectos de cargas cíclicas y dinámicas (por ejemplo en zonas sísmicas) al igual que los efectos de las vibraciones en estructuras o seres humanos. El drenaje vertical también se puede usar para rehabilitar suelos contaminados y para la mitigación del potencial de licuefacción.

El diseño del drenaje vertical engloba dos fases, diseño funcional y proceso de diseño:

- 1) en la primera fase, se debe cuantificar la necesidad de un drenaje vertical. Esta fase de diseño funcional define la carga y el espaciamiento entre drenes que producirá los efectos deseados en relación a la consolidación y asientos, y eventualmente en la resistencia al corte sin drenaje del suelo. Los objetivos están asociados a la mejora del terreno mediante precarga y la construcción por fases de un terraplén, y también con la creación de caminos de drenaje satisfactorios para el agua freática en el caso de licuefacción;
- 2) en la segunda fase, tiene que diseñarse el método de instalación de drenes y su funcionamiento en la práctica. Esta fase del proceso de diseño explica los efectos de la instalación del drenaje en el terreno, para la geometría, la naturaleza y las dimensiones de los drenes, para posibles pandeos en el caso de deformaciones excesivas en algunas capas de suelo, etc.

B.2 Proceso de diseño

El drenaje vertical puede utilizarse para diferentes propósitos. Sin embargo, el proceso de diseño de drenaje vertical siempre incluye las operaciones enumeradas en la figura B.1: el objetivo (bases de diseño) y las propiedades del suelo (primera fila de recuadros) interactúan con el asentamiento y los análisis de estabilidad para satisfacer los requisitos necesarios para el efecto de los drenes, es decir, para alcanzar un grado de consolidación global y/o local dado dentro de un periodo específico de tiempo.

El tratamiento del terreno mediante drenaje vertical y la carga asociada diseñarse y ejecutarse de modo que la estructura, soportada por el terreno tratado, se mantenga durante su vida útil y con un grado adecuado de fiabilidad y coste, y soporte las acciones y las influencias que puedan ocurrir. Esto requiere que los estados límite de servicio y último se satisfagan.

El cliente debe especificar los requisitos de los estados límite de servicio y último. El diseño debe estar de acuerdo con los requisitos expuestos en la Norma EN 1997-1. El método observacional, que comprende adaptar el diseño de un modo planificado, puede ser una parte importante del diseño.

La instalación debe tener en cuenta las combinaciones de cargas que puedan ocurrir durante la construcción y servicio. Debe tener en cuenta la afección de la instalación del drenaje en las propiedades del terreno.

La instalación de drenes verticales puede inducir un exceso de presión intersticial y causar una reducción a corto plazo de la resistencia al corte sin drenaje.

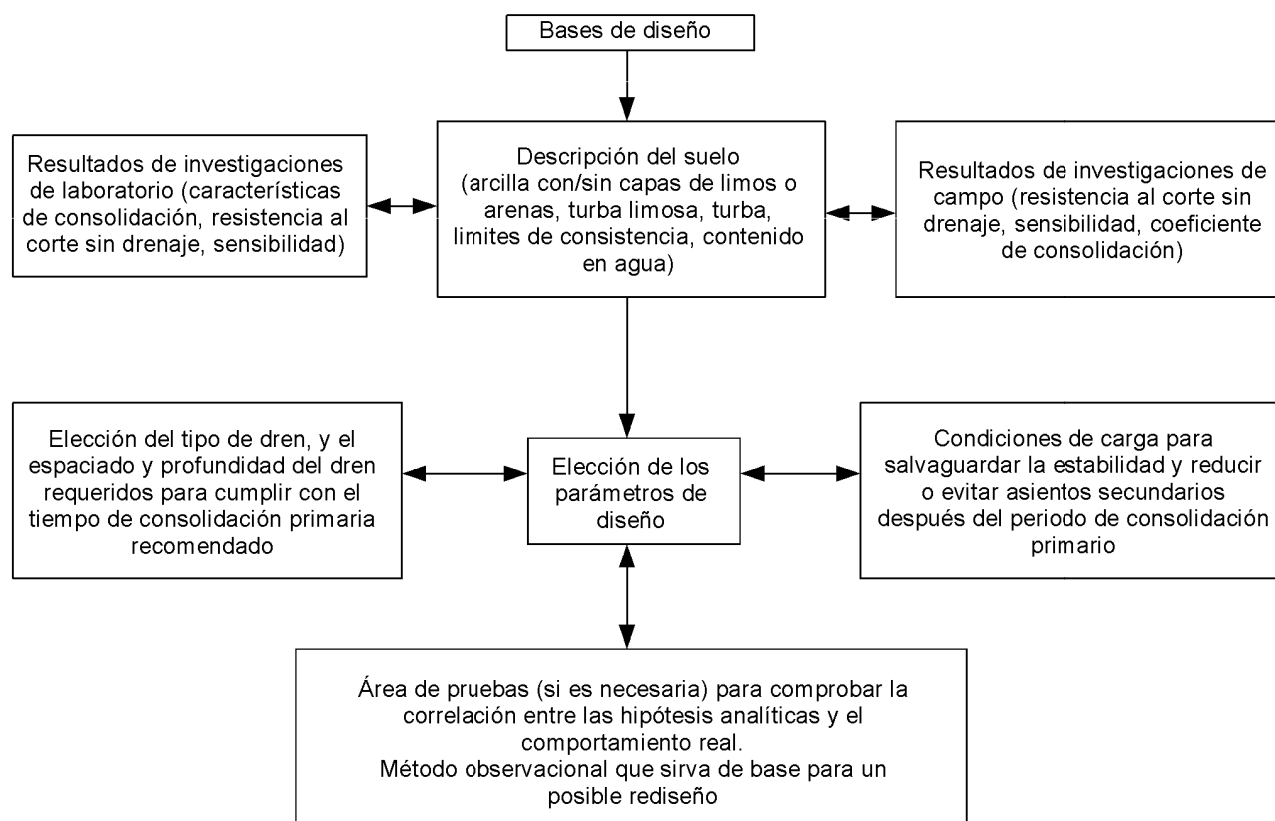


Figura B.1 – Diagrama del proceso de diseño, incluyendo investigaciones de laboratorio y de campo, diseño funcional y pruebas de campo

B.3 Investigaciones para el drenaje vertical

B.3.1 Generalidades

Las características del subsuelo se determinan normalmente por medio de métodos de investigación de campo (por ejemplo, ensayos de penetración con cono, ensayo de molinete y observaciones de la presión intersticial a varias profundidades) en combinación con la toma de muestras para el análisis de laboratorio. La distribución de la presión intersticial con la profundidad forma la base para la evaluación de la distribución de la presión de sobrecarga efectiva con la profundidad. Se requiere esta información para determinar si el suelo está sobreconsolidado o normalmente consolidado. Sin embargo, se hace notar que la presión intersticial del agua puede variar considerablemente en función de la estación y de la cantidad de precipitaciones. Una alta presión intersticial ocasional, que reduce la magnitud de la presión de sobrecarga efectiva, puede dar una falsa impresión de suelo sobreconsolidado.

El ensayo debería realizarse de acuerdo con la Norma EN 1997-2. La identificación y clasificación del suelo, que se basa en los resultados de la investigación, debe cumplir con la Norma EN ISO 14688.

La resistencia a la penetración del suelo debería investigarse para obtener información que permita elegir la capacidad de los equipos de instalación.

B.3.2 Investigaciones de laboratorio

Los parámetros de consolidación y asiento se determinan convencionalmente con ensayos edométricos en muestras inalteradas de suelo, tomadas utilizando un toma muestras de alta calidad. Los resultados de los ensayos edométricos convencionales dan valores del módulo de compresión, la presión de pre-consolidación y el coeficiente de consolidación vertical del suelo. Para la determinación del coeficiente de consolidación horizontal por medio de ensayos edométricos, se debe realizar drenaje radial.

Los ensayos de laboratorio también incluyen la determinación de la resistencia al corte sin drenaje y la sensibilidad del suelo, así como el peso unitario, humedad y sus índices.

B.3.3 Investigaciones de campo

Las investigaciones de campo normalmente incluyen la determinación de la resistencia al corte sin drenaje mediante ensayos de molinete y/o ensayos de penetración con conos. El coeficiente de consolidación y la permeabilidad horizontal se pueden determinar de los ensayos de penetración con cono con dispositivo de presión intersticial (CPTU). Esto se hace con sondeos intermitentes acompañados por un estudio de la disipación del exceso de presión intersticial causada por las operaciones de sondeo [33], [49], [50] y [51].

Se puede investigar la posible contaminación del agua freática tomando muestras de este agua a varias profundidades [44].

B.4 Aspectos del diseño

B.4.1 Asientos

B.4.1.1 Asientos totales

El cálculo de las deformaciones del suelo causadas por la operación de carga debe estar de acuerdo con la Norma EN 1997-1.

La cuestión de si el suelo está normalmente consolidado o sobreconsolidado es de gran importancia para realizar un correcto análisis de asientos y para saber si el uso de un drenaje vertical es adecuado o no. Una correcta determinación de la presión de preconsolidación es de primordial importancia. El uso de drenes verticales en un caso en el que las tensiones efectivas inducidas por la operación de carga son menores que la presión de preconsolidación del suelo es contraproducente pues la instalación de los drenes pueden afectar provocando un aumento de los asientos. De este modo, el drenaje vertical debería utilizarse sólo en casos en los que la presión de preconsolidación se exceda por las tensiones inducidas por la operación de carga.

Las deformaciones del suelo causadas por la carga externa incluyen tanto desplazamientos verticales como horizontales, cuyas magnitudes relativas dependen en la condición de carga, la resistencia al corte del suelo y la relación del ancho de la carga con respecto de la profundidad de la capa de suelo. Los desplazamientos horizontales pueden contribuir considerablemente a los asientos verticales observados, especialmente si las áreas de pruebas se usan como base del diseño, y sus anchos son pequeños en comparación con la profundidad de las capas del suelo. En tales casos, inclinómetros verticales colocados a lo largo de los bordes del área de pruebas, dan información sobre la influencia de las deformaciones horizontales en los asientos verticales.

En el análisis del asiento total obtenido después de completarse la consolidación, se debería considerar la influencia de los posibles efectos de alteración causados por la instalación de los drenes en la propiedades de asiento del suelo. Los efectos de alteración dependen mucho del método de instalación del dren, el tamaño y forma del mandril, las características estructurales y la resistencia al corte sin drenaje del suelo. Para asegurar la precisión del análisis de asientos es importante que el peso unitario medio de cualquier relleno utilizado como precarga se dé en la especificación. Es también necesario tener en cuenta la reducción de carga debido a los efectos de flotabilidad si parte de la sobrecarga se sumerge durante el proceso de consolidación.

El asiento total de consolidación primaria se puede estimar del asiento que se produce gradualmente durante el proceso de consolidación. Por ejemplo, de acuerdo con Asaoka [1] y [2], la relación establecida entre los asientos observado en intervalos de tiempo Δt iguales se puede usar para evaluar el asiento de consolidación primaria final.

El asiento alcanzado utilizando el método de vacío (véase el anexo A) está gobernado por la efectividad del sistema de sellado. Normalmente, se puede alcanzar un máximo del 70% al 80% de vacío, resultando en un incremento de la tensión efectiva de 70 kPa a 80 kPa. La relación del incremento de la tensión efectiva vertical con respecto del incremento de la tensión efectiva horizontal diferirá de la relación correspondiente obtenida por la carga externa. En consecuencia, el incremento de la resistencia al corte durante el proceso de consolidación diferirá de la obtenida por la carga externa.

La sobrecarga temporal puede reducir los asientos de fluencia secundarios que sigan al periodo de consolidación primaria. La sobrecarga temporal requerida depende de las características de deformación del suelo y de los requisitos de asiento de consolidación secundaria. Para disminuir significativamente los asientos de fluencia una vez se ha quitado la sobrecarga temporal [14] y [20], normalmente es suficiente una sobrecarga temporal de al menos 0,25 a 0,35 veces la carga permanente de diseño y mantenida hasta la finalización de la consolidación primaria.

B.4.1.2 Velocidad de asiento de consolidación

Hipótesis de cálculo

Para el análisis de la velocidad del asiento de consolidación, se tienen que identificar las características de drenaje (diámetro D del cilindro de suelo hipotético drenado por cada dren, el diámetro del dren d_w , diámetro de la zona remodelada d_s , capacidad de descarga q_w) así como los parámetros de consolidación del suelo (coeficiente de consolidación c_h , permeabilidad horizontal del suelo sin alterar k_{hy} y de la zona de remodelada k_s) (véase la figura B.2).

Como puede verse en la figura B.2, el valor de D depende de la malla de instalación de los drenes (1,05 veces el espaciado del dren para drenes colocados en una malla triangular equilátera; 1,13 veces el espaciado del dren para drenes colocados en una malla cuadrada). El diámetro del dren d_w para un dren banda se puede considerar igual al del dren cilíndrico con la misma circunferencia que la del dren banda, es decir, $d_w = 2(b + t) / \pi$ donde b es el ancho y t es el espesor del dren banda [17]⁵⁾.

Los parámetros de consolidación del suelo suelen estar basados en los resultados de los ensayos edométricos cuando la disipación del exceso de presión intersticial tiene lugar en la dirección vertical. Esto se diferencia del caso real con drenes verticales en los que la disipación del exceso de presión de poros tiene lugar principalmente en la dirección horizontal. La diferencia entre el caso edométrico y la realidad empieza a ser importante cuando existan juntas o capas con mayor permeabilidad que la del cuerpo de suelo principal. Para la determinación del coeficiente de consolidación horizontal, se pueden usar ensayos edométricos con drenaje radial o ensayos CPTU descritos en el apartado B.3.3.

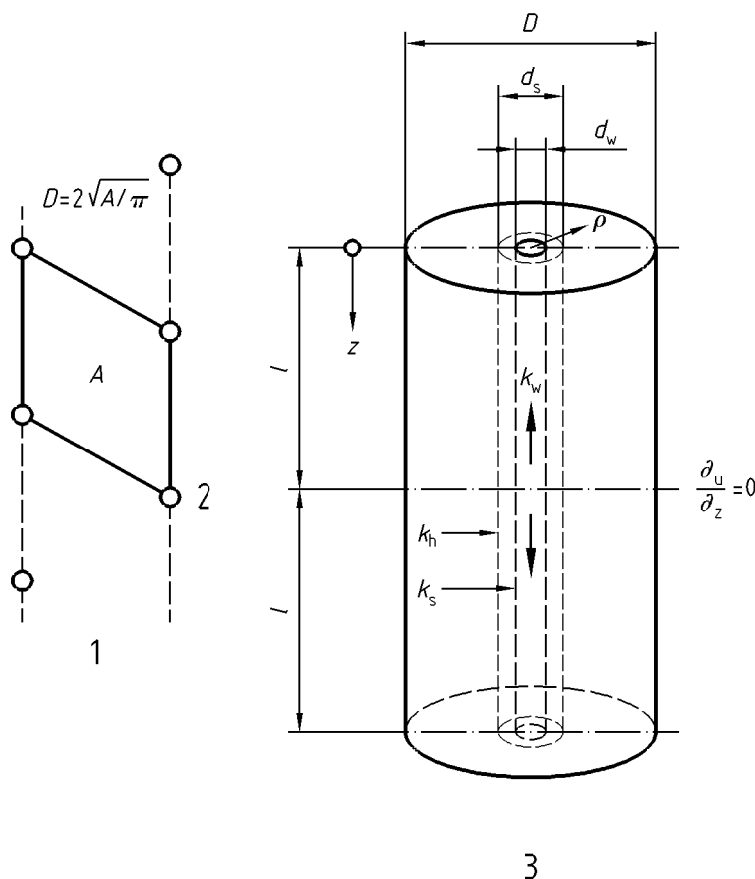
En algunas condiciones, el procedimiento de instalación de drenes puede incrementar la compresibilidad del suelo y/o reducir el coeficiente de consolidación y la permeabilidad del suelo. También puede crear exceso de presión intersticial en el suelo. Tales perturbaciones en las condiciones iniciales del suelo deberían considerarse en el cálculo. Cuando sea pertinente, es importante que el equipo de seguimiento se instale con tiempo suficiente antes de que los drenes se instalen de modo que los efectos de alteración se puedan registrar y considerar debidamente.

5) De acuerdo con [45] el valor del diámetro equivalente debería ser $d_{w,eq} = (b + t) / 2$.

La inserción del mandril en el suelo durante la instalación de los drenes también crea una zona remodelada donde las capas horizontales se alteran en la dirección vertical, seguida por una reducción de la permeabilidad horizontal del suelo. El ancho y las características de la zona remodelada están en función del método de instalación. La influencia de la zona remodelada también se debería considerar teniendo en cuenta el agujero creado por el mandril durante la instalación de los drenes. Las dimensiones del mandril son temporalmente mucho mayores que aquellas de los drenes.

El mandril que se utiliza para la instalación del dren banda no se suele rellenar con agua durante el proceso de instalación. En consecuencia, se puede dejar un colchón de aire entre el dren y el suelo alrededor después de sacar el mandril. Un colchón de aire causa un efecto negativo en el proceso de consolidación, similar al del remoldeo. Esto se tiene en cuenta en la elección de los parámetros del remoldeo basados en la experiencia. La instalación también puede cuasar fisuras verticales alrededor del mandril, que en el caso de los drenes de arena se rellenan con la arena que se introduce desde los drenes [37]. En los casos donde la resistencia al corte sin drenaje del suelo sea alta, la instalación puede dejar un agujero abierto alrededor del dren, el cual tiene un efecto favorable en la capacidad de descarga.

Las investigaciones de las características y la extensión de la zona remodelada causada por la instalación del mandril se han realizado por ejemplo en [4], [8], [23], [24] y [42].



- Leyenda
 1 Planta
 2 Dren
 3 Perspectiva

Figura B.2 – Cilindro de suelo drenado por un dren

Método de análisis

Teóricamente, independientemente de la malla usada, se considera que cada dren drena un cilindro de suelo hipotético cuyo área de la sección transversal equivale al área de la sección transversal contenida en cuatro drenes vecinos (véase la figura B.2). La manera más eficaz de utilizar la capacidad de descarga de los drenes verticales con el fin de acelerar el proceso de consolidación es instalar los drenes en una malla triangular equilátera. El proceso de consolidación está gobernado por el flujo del agua intersticial en dirección radial hacia el dren y por una disminución del flujo vertical del agua freática en la dirección vertical entre los drenes. Los dos métodos de análisis existentes son los llamados “análisis de deformación libre” y el “análisis de deformación equivalente”. Como muestra Barron [3] la diferencia en los resultados con respecto del proceso de consolidación medio obtenido entre los dos métodos de análisis es insignificante. Por tanto, debido a su simplicidad, el método de análisis de deformación equivalente, ecuación (1), se ha convertido en rutinario [18], [28], [32], [35] y [52].

En los métodos de análisis usados para determinar la influencia de la resistencia del agujero (capacidad de descarga limitada), las características de consolidación del suelo generalmente se consideran constantes en toda la capa del suelo. La influencia de las capas con características de consolidación diferentes las ha analizado Onoue [41].

Otra hipótesis convencional asumida en el análisis es la validez de la ley de Darcy. La experiencia de varios ensayos de permeabilidad de campo [16], [21] y [46] y de laboratorio [16] y [23] han mostrado que hay una desviación de la ley de Darcy con gradientes hidráulicos pequeños. Se han desarrollado las ecuaciones de consolidación válidas para flujos tanto darcianos como no-darcianos [22].

La teoría básica de drenaje vertical utilizada en los análisis rutinarios de la mayoría de los proyectos de drenes verticales fue publicada por Hansbo [18] como una extensión de la teoría de Barron [3] para el caso de drenes con capacidad de descarga limitada. En consecuencia, la velocidad de consolidación sigue la expresión:

$$\bar{U}_h = 1 - \exp\left(-\frac{8c_h t}{\mu D^2}\right)$$

donde, omitiendo los términos de menor importancia

$$\mu = \frac{D^2}{D^2 - d_w^2} \left[\ln\left(\frac{D}{d_s}\right) + \frac{k_h}{k_s} \ln\left(\frac{d_s}{d_w}\right) - \frac{3}{4} \right] + \frac{k_h}{q_w} \pi z [2l - z]$$

Un parámetro importante en el análisis del drenaje vertical es la capacidad de descarga de los drenes q_w , es decir, la cantidad de flujo de agua por unidad de tiempo que puede tener lugar en la dirección vertical a través del dren con un gradiente hidráulico igual a uno. (En la Norma EN 10318, la capacidad de descarga es equivalente a la transmisividad por el ancho del dren). Hay drenes que han aparecido en el mercado con capacidad de descarga insuficiente cuando se instalan a gran profundidad. Si los drenes tienen insuficiente capacidad de descarga, el grado de consolidación que se obtiene por la instalación de drenes en suelos homogéneos decrece con la profundidad de instalación.

La relación entre el tiempo de consolidación t , considerando el efecto de la resistencia del agujero (capacidad de descarga limitada) y el tiempo de consolidación t_1 , sin tener en cuenta el efecto de la resistencia del agujero, se puede expresar con la relación $t = t_1 (1 + \Delta t)$, donde el retraso de Δt en el tiempo de consolidación sigue la relación:

$$\Delta t = \frac{\pi z (2l - z) k_h (D^2 - d_w^2)}{q_w D^2 \left[\ln(D / d_s) + (k_h / k_s) \ln(d_s / d_w) - 3 / 4 \right]}$$

El caso más desfavorable con respecto a los requisitos de capacidad de descarga se obtiene cuando $k_s = k_h$ que ocurre cuando:

$$\Delta t = \frac{\pi z (2l - z) k_h (D^2 - d_w^2)}{q_w D^2 [\ln(D/d_w) - 3/4]}$$

El valor medio de Δt es equivalente a dos tercios del valor obtenido a la profundidad $z = l$.

El efecto de la resistencia del agujero (capacidad de descarga) depende de la profundidad de la instalación del dren, el espaciado de los drenes y de si los drenes están penetrando o no (véase la figura B.3). En el caso mostrado en la figura B.3 el retraso de Δt a los 30 m de profundidad es de 1,46 (146%) y el valor medio de Δt es de 0,97.

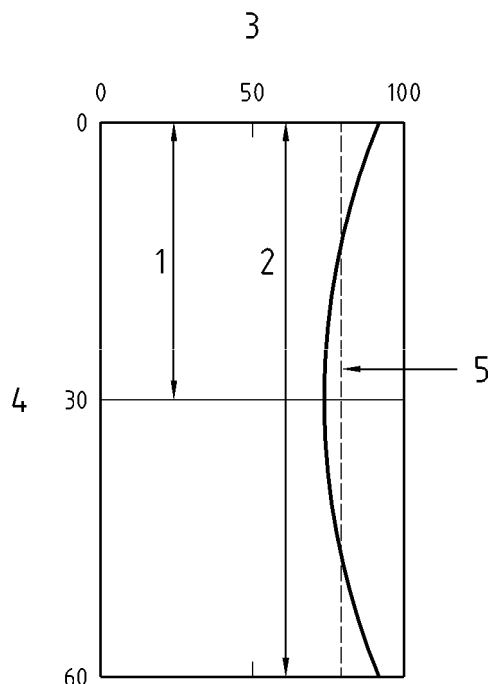
Siempre que se pueda permitir un incremento del 10% en el tiempo de consolidación debido a la resistencia del agujero en la punta de drenes que penetran parcialmente ($z = l$, véanse las figuras B.2 y B.3) relativo al obtenido usando drenes totalmente eficaces, en la figura B.4 se ejemplifica una estimación conservadora de la capacidad de descarga requerida con respecto a la permeabilidad del suelo y a la profundidad de instalación. Para drenes penetrantes (drenaje eficiente arriba y abajo) el retraso en la consolidación tiene lugar a media profundidad (véase la figura B.3) y por tanto, los valores de profundidad de la figura B.4 son dobles. El espaciado del dren de la figura B.4 se considera igual a 0,9 m (drenes colocados en una malla triangular equilátera, es decir, $D = 0,945$ m, véase la figura B.3) y el diámetro equivalente del dren $d_w = 0,065$ m.

La capacidad de descarga requerida de acuerdo con la figura B.4 para drenes que penetran parcialmente, instalados a una profundidad de 15 m en arcillas limosas con una permeabilidad de 0,25 m/año ($0,8 \times 10^{-8}$ m/s) equivale a 1 000 m³/año, mientras que la capacidad de descarga requerida de drenes que penetran parcialmente, instalados a una profundidad de 15 m en arcillas con una permeabilidad de 0,03 m/año ($0,95 \times 10^{-9}$ m/s) equivale a 110 m³/año.

Los requisitos de capacidad de descarga disminuyen al incrementar el espaciado entre drenes. Para un espaciado de drenes banda de, por ejemplo 1,5 m ($D = 1,575$ m) y 2 m ($D = 2,1$ m), respectivamente, las capacidades de descarga requeridas son de 80% y 70%, respectivamente, de aquellos que se muestran en la figura B.4.

Si el retraso admisible en el tiempo de consolidación se reduce a un 5%, la capacidad de descarga indicada en la figura B.4 es el doble.

Para drenes penetrantes, los valores de profundidad l dados en la figura B.4 se refieren a la mitad de la profundidad de la instalación del dren (véanse las figuras B.2 y B.3).



Leyenda

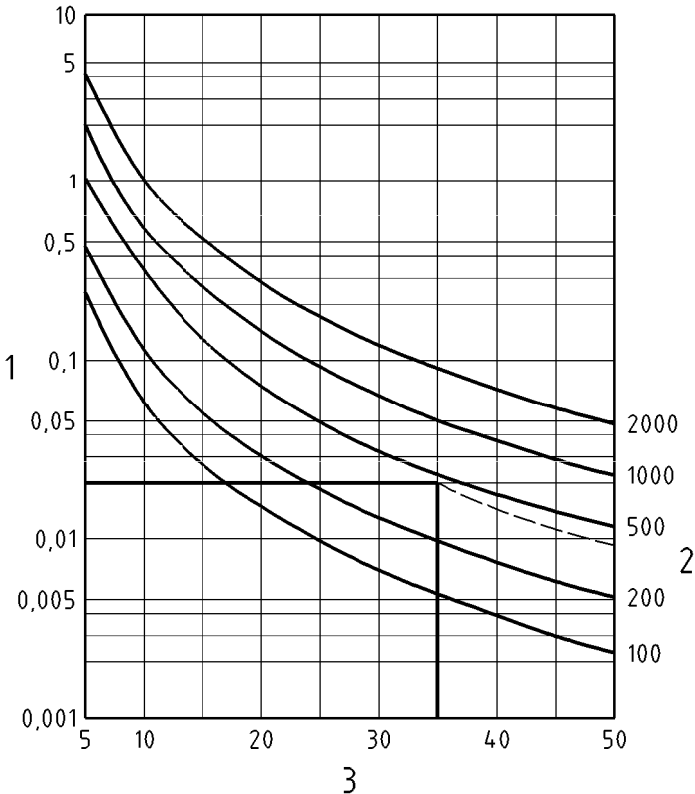
- 1 Drenes que penetran parcialmente ($l = 30\text{m}$)
- 2 Drenes que penetran totalmente ($2l = 60\text{m}$)
- 3 Grado de consolidación \bar{U}_h %
- 4 Profundidad de instalación del dren, m
- 5 $\bar{U}_{h, media}$

Parámetros de consolidación: $q_w = 100 \text{ m}^3/\text{año}$ ($\approx 3,2 \text{ cm}^3/\text{s}$), $c_h = 1,0 \text{ m}^2/\text{año}$ ($\approx 3,2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$), $K_s = k_h = 0,1 \text{ m/año}$ ($\approx 3,2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$), tiempo de consolidación $t = 0,5 \text{ año}$. Espaciado entre drenes $0,9 \text{ m}$ (malla triangular equilátera; $D = 0,945 \text{ m}$), diámetro del dren $d_w = 0,065 \text{ m}$.

Figura B.3 – Ejemplo de la influencia de la resistencia del agujero en el grado de consolidación para drenes parcialmente y totalmente penetrantes instalados a profundidades de 30 m y 60 m, respectivamente

Con el tiempo se puede esperar un cierto deterioro del filtro debido a la actividad bacteriológica o ataque de hongos (véase la figura A.10 del anexo A). El deterioro generalmente reduce la capacidad de descarga hacia el final del proceso de consolidación. Por tanto, tiene una influencia relativamente pequeña en la velocidad de consolidación.

En suelos altamente compresibles, la compresión relativa que tiene lugar durante el proceso de consolidación puede llevar al pandeo o curvatura de los drenes (véase la figura A.5 del anexo A), que puede reducir seriamente la capacidad de descarga de cierto tipo de drenes [31].



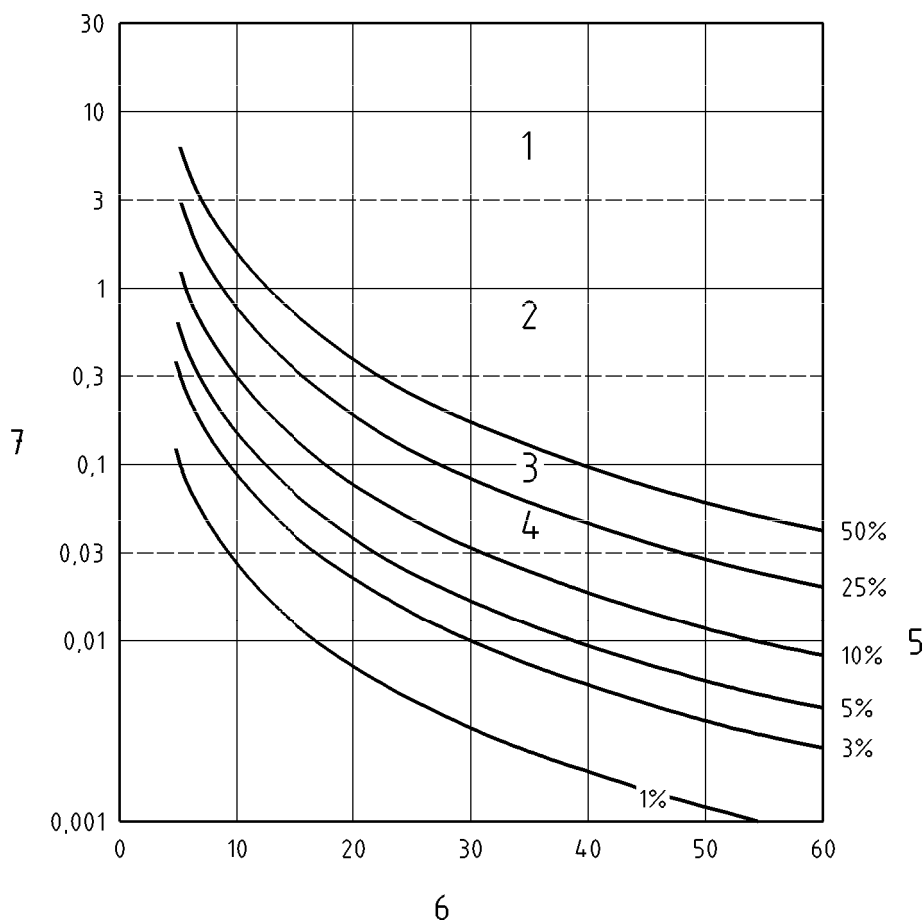
- Leyenda
- 1 Permeabilidad ($k_s = k_h$), m/año (1 m/año = $3,17 \times 10^{-8}$ m/s)
 - 2 q_w , m³/año
 - 3 Profundidad de instalación, m

Espaciado entre drenes 0,9 m (malla triangular equilátera; $D = 0,945$ m), diámetro del dren $d_w = 0,065$ m.

Figura B.4 – Requisitos de la capacidad de descarga q_w con respecto del coeficiente de permeabilidad del suelo para una prolongación en el tiempo de consolidación del 10% a una profundidad l de la instalación del dren (véanse las figuras B.2 y B.3)

Tabla B.1 – Ejemplos de capacidades de descarga mínimas mediante análisis de consolidación

Valores de la capacidad de descarga q_w en m³/año para un retraso en el tiempo de consolidación de $\Delta t = 10\%$ a una profundidad $z = l$									
Permeabilidad del suelo	$D/d_w = 10$ (drenes banda)			$D/d_w = 15$ (drenes banda)			$D/d_w = 5$ (drenes arena)		
	$l = 10\text{m}$	$l = 20\text{m}$	$l = 30\text{m}$	$l = 10\text{m}$	$l = 20\text{m}$	$l = 30\text{m}$	$l = 10\text{m}$	$l = 20\text{m}$	$l = 30\text{m}$
$k_s = k_h = 0,315$ m/año (10^{-8} m/s)	630 m³/año	2 525 m³/año	5 690 m³/año	505 m³/año	2 010 m³/año	4 530 m³/año	1 105 m³/año	4 420 m³/año	9 950 m³/año
$k_s = k_h = 0,0315$ m/año (10^{-9} m/s)	63 m³/año	253 m³/año	569 m³/año	50 m³/año	201 m³/año	453 m³/año	110 m³/año	442 m³/año	995 m³/año



Leyenda

- 1 Turba
- 2 Turba/limo
- 3 Limo/arcilla
- 4 Arcilla

- 5 Retraso
- 6 Profundidad l de la instalación del dren, m
- 7 Permeabilidad, m/año

Espaciado entre drenes 0,9 m (malla triangular equilátera; $D = 0,945$ m), diámetro del dren $d_w = 0,065$ m, $k_s = k_h$

Figura B.5 – Retraso en el tiempo de consolidación a una profundidad l de una instalación de drenes (véanse las figuras B.2 y B.3) para drenes con capacidad de descarga de $500 \text{ m}^3/\text{año}$ ($16 \text{ cm}^3/\text{s}$)

B.4.1.3 Factores de seguridad para drenes banda prefabricados

Con respecto a los posibles efectos negativos en la capacidad de descarga de los drenes banda prefabricados, se debe tener en cuenta la influencia de la presión efectiva lateral del suelo en los drenes, la temperatura del suelo y las actividades biológicas y químicas a largo plazo. Para garantizar la eficiencia de los drenes, se deberían realizar ensayos de la capacidad de descarga de los drenes (véase el anexo A) con referencia a la presión efectiva lateral máxima esperada en los drenes y las condiciones de temperatura en el proyecto real multiplicados por una serie de factores de seguridad requeridos, [36]. En el anexo A se ejemplifica como se debería realizar esto.

B.4.2 Estabilidad

El análisis de estabilidad es muy importante cuando la mejora del suelo se realiza mediante la instalación de drenaje vertical y precarga. En el análisis de estabilidad del terraplén de carga colocado en la superficie del terreno, el efecto de refuerzo de los mismos drenes verticales (por ejemplo, drenes de arena) no se tiene en cuenta. Sin embargo, la estimación y el seguimiento del incremento de resistencia producido durante la consolidación, particularmente cuando se usan etapas de carga, es una parte importante del análisis.

La resistencia al corte sin drenaje determinada en campo (por ejemplo con ensayos de molinete o de penetración con cono) o por ensayos de laboratorio (por ejemplo, ensayo de caída de cono, ensayo triaxial, ensayo de compresión sin confinamiento), deberían ajustarse con respecto de los límites de consistencia del suelo y de la dirección del corte [7]. Si la colocación de la carga exterior supone problemas de estabilidad, la carga debe colocarse por etapas. Después de cada etapa de carga, la ganancia de la resistencia al corte alcanzada durante el proceso de consolidación tiene que investigarse antes de proceder a la siguiente etapa de carga, para no poner en peligro la condición de estabilidad.

Una posibilidad de estimar la ganancia de resistencia en cada etapa de carga es utilizar correlaciones empíricas, por ejemplo, entre el límite líquido, la resistencia al corte sin drenaje y la presión de preconsolidación [15] o entre el índice de plasticidad, la resistencia al corte sin drenaje y la presión de preconsolidación [48]. Si no hay variación ni en el límite líquido ni en el índice de plasticidad durante el proceso de consolidación, se puede asumir la variación relativa en la resistencia al corte sin drenaje igual a la variación relativa en la presión de preconsolidación. También se han presentado correlaciones empíricas valiosas para estimar la ganancia de resistencia por Mesri [38] y Ladd [30]. Como la presión de preconsolidación crece con el incremento de tensión efectiva del terreno, ésta depende directamente del grado de consolidación, que caracteriza tanto a la disminución de los asientos y del exceso de presión intersticial. Por tanto, el seguimiento de la presión intersticial debería ser parte de las recomendaciones de los proyectos de drenaje vertical, tal como se describe en anexo A.

Se pueden evitar los problemas de estabilidad cambiando la carga exterior por el método de vacío o bombeando agua desde capas de suelo permeables inferiores (véase el anexo A). Normalmente, se puede alcanzar el 70% de vacío, que da como consecuencia un incremento de la tensión efectiva similar al producido por una superficie de carga de 70 kN/m^2 . Sin embargo, la relación entre el incremento de tensiones efectivas vertical y horizontal en ambos casos será diferente. Esto tendrá un efecto diferente en el incremento de la resistencia al corte sin drenaje causado por la consolidación que el incremento causado por la superficie de carga. Si el método de vacío se usa en instalaciones litorales, el incremento de la tensión efectiva resultante también incluirá la presión de sobrecarga del agua del mar.

ANEXO C (Informativo)

GRADO DE OBLIGACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES

Los apartados se marcan con el correspondiente grado de obligación:

- (REQ): Requerido;
- (REC): Recomendado;
- (PER): Permiso;
- (ST): Obligatorio.

4.1	(REQ)	6.3.4.1	(REQ)	6.4.3.1	(REQ)	8.1.2	(REQ)	9.1.5	(REQ)
4.2	(REQ)	6.3.4.2	(REC)	6.4.3.2	(REC)	8.1.3	(REQ)	9.2.1	(REQ)
4.3	(REQ)	6.3.4.3	(REC)	6.4.3.3	(REQ)	8.1.4	(REC)	9.2.2	(REC)
4.4	(REQ)	6.3.4.4	(REQ)	6.4.4.1	(REQ)	8.2.1	(REQ)	9.2.3	(REQ)
4.5	(REQ)	6.3.5.1	(ST)	6.4.4.2	(REC)	8.2.2	(REQ)	9.2.4	(REQ)
4.6	(REQ)	6.3.5.2	(ST)	6.4.4.3	(REQ)	8.2.3	(REC)	9.2.5	(REC)
5.1.1	(REQ)	6.3.5.3	(REQ)	6.4.5.1	(ST)	8.2.4	(REC)	9.2.6	(REQ)
5.1.2	(REQ)	6.3.5.4	(REC)	6.4.5.2	(REQ)	8.2.5	(REC)	9.2.7	(REC)
5.1.3	(REC)	6.3.5.5	(REC)	6.4.5.3	(REQ)	8.2.6	(REC)	9.2.8	(REC)
5.2.1	(REQ)	6.3.5.6	(REC)	6.4.6.1	(REC)	8.3.1	(REQ)	9.2.9	(REC)
5.2.2	(REQ)	6.3.5.7	(REC)	6.4.6.2	(REC)	8.3.2	(REQ)	10.1	(REQ)
5.2.3	(REQ)	6.3.6.1	(REC)	6.4.6.3	(REQ)	8.3.3	(REC)	10.2	(REQ)
6.1.1	(ST)	6.3.6.2	(REC)	6.4.6.4	(REQ)	8.3.4	(REQ)	11.1.1	(ST)
6.1.2	(REQ)	6.3.6.3	(REQ)	6.4.7.1	(REQ)	8.3.5	(REQ)	11.1.2	(REQ)
6.2.1	(ST)	6.3.6.4	(REQ)	6.4.7.2	(REC)	8.3.6	(REQ)	11.1.3	(REQ)
6.2.2	(ST)	6.3.7.1	(REQ)	6.4.8	(REC)	8.3.7	(REC)	11.2.1	(REQ)
6.2.3	(PER)	6.3.7.2	(REC)	6.4.9	(ST)	8.3.8	(REC)	11.2.2	(REC)
6.2.4	(REQ)	6.3.8.1	(REC)	6.4.10	(REQ)	8.3.9	(REQ)	11.2.3	(REQ)
6.2.5	(ST)	6.3.9.1	(REQ)	6.5.1	(ST)	8.4.1	(REC)	11.2.4	(REC)
6.3.1.1	(ST)	6.3.9.2	(ST)	6.5.2	(REC)	8.4.2	(REQ)	11.2.5	(REC)
6.3.1.2	(REC)	6.3.9.3	(REC)	6.5.3	(REC)	8.4.3	(REC)	11.3.1	(REQ)
6.3.1.3	(REQ)	6.3.9.4	(REC)	6.5.4	(REQ)	8.4.4	(REQ)	11.3.2	(REQ)
6.3.2.1	(REC)	6.3.10.1	(REC)	7.1.1	(ST)	8.4.5	(REQ)	11.3.3	(REQ)
6.3.2.2	(REC)	6.3.10.2	(REQ)	7.1.2	(REC)	9.1.1	(REQ)	11.4	(REQ)
6.3.3.1	(REQ)	6.4.1.1	(ST)	7.1.3	(ST)	9.1.2	(REQ)		
6.3.3.2	(REC)	6.4.1.2	(REQ)	7.1.4	(REC)	9.1.3	(REQ)		
6.3.3.3	(REQ)	6.4.2.1	(REC)	8.1.1	(REQ)	9.1.4	(REC)		

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Asaoka, A. (1978). Observational procedure of settlement prediction, *Soils and Foundations*, Vol.18, No. 4, pp. 87-101.
- [2] Asaoka, A. and Matsuo, M. (1980). :An Inverse problem approach to settlement prediction, *Soils and Foundations*, Vol.20, No.4, pp.53-66.
- [3] Barron, R. A. (1948). Consolidation of fine-grained soils by drain wells. *Proc. ASCE*, 134, Paper No. 2346, pp. 718-742.
- [4] Bergado, D. T., Akasami, H., Alfaro, M. & Balsubramaniam, A. S. (1992). Smear effects of vertical drains on soft Bangkok clay. *J. Geot. Eng.* 117, No. 10, pp. 1509-1530.
- [5] Bergado, D. T., Balasubramaniam, A. S., Patawaran, M. A. B. & Kwenpreuk, W. (2000). Electro-osmotic consolidation of soft Bangkok clay with prefabricated vertical drains. *Ground Improvement*, 4, pp. 153–163.
- [6] Bodamèr, R. M. (2003). Test report discharge capacity Mebradrain type MT 88 HD for Escravos, Nigeria. *Geotechnics Holland b.v. Zuider IJdijk 58*. Amsterdam.
- [7] Bjerrum, L. (1973). Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils (collapsible, expansive and others). *Proc. 8th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Moscow, Vol. 3. State-of-the-art Report.
- [8] Chai, J. C., Miura, N. & Sakajo, S. (1997). A theoretical study on smear effect around vertical drain. *Proc. 14th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Hamburg, Vol. 3, pp. 1581-1584.
- [9] Chaumeny, J.-L., Liausu, P. & Varaksin, S. (1997). *Consolidation atmosphérique de boue de drainage dans le port de Lübeck*. *Proc. 14th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Hamburg, Vol. 3, pp. 1969–1972.
- [10] Cognon, J.-M. (1991). *La consolidation atmosphérique*. *Révue Française Géotechnique*, No. 57, pp. 37–47.
- [11] Cortlever, N. & Hansbo, S. (2004). Aspects of vertical drain quality and action, *Proc. 3rd European Geosynthetic Conference*, Munich.
- [12] CROW (1993) Vertical Drainage. *Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek*, Publ. 77.
- [13] Dubin, B & Moulin, G. (1986). Influence of critical gradient on the consolidation of clay. In *Consolidation of soils: testing and evaluation*, ASTM STP 892, pp. 354–377, American Society for Testing and Materials.
- [14] Eriksson, U., Hansbo, S. & Torstensson, B.-A. (2000). Soil improvement at Stockholm-Arlanda Airport. *Ground Improvement* 4, pp. 73-80.
- [15] Hansbo, S. (1957). *A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test*. Swedish Geotechnical Institute, Proc. No. 14.
- [16] Hansbo, S. (1960). *Consolidation of clay, with special reference to influence of vertical drains*. Swedish Geotechnical Institute, Proc. No. 18. Doctoral Thesis, Chalmers Un. of Technology.
- [17] Hansbo, S. (1979). Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains. *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp.16–25.
- [18] Hansbo, S. (1981). Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. *Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Stockholm, Vol. 3, Paper 12/22, pp. 677-682.

- [19] Hansbo, S. (1983). Discussion, Proc. 8th European Conf. Soil Mech. Found. Eng., Helsinki, Vol. 3, Spec. Session 2, pp. 1148–1149.
- [20] Hansbo, S. (1987). Fact and fiction in the field of vertical drainage. *Prediction and Performance in Geotechnical Engineering*, Calgary, pp. 61–72.
- [21] Hansbo, S. (1997). Aspects of vertical drain design: Darcian or non-Darcian flow. *Géotechnique* 47, No. 5, pp. 983–992.
- [22] Hansbo, S. (2001). Consolidation equation valid for both Darcian and non-Darcian flow. *Géotechnique* 51, No.1, pp. 51–54.
- [23] [Hird, C. C. & Moseley, V. J. (2000). Model study of seepage in smear zones around vertical drains in layered soil. *Geotechnique* 50, No. 1, pp. 89–97.
- [24] Jamiolkowski, M., Lancelotta, R. & Wolski, W. (1983). Summary of discussion. *Proc. 8th European Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Helsinki, Vol. 3, Spec. Session 6, pp. 1242–1245.
- [25] Johnson, S. J. [1970]. Foundation precompression with vertical sand drains. *Proc. ASCE, Journal Soil Mech. Found. Eng.*, SM 1, pp.145–175.
- [26] Kamon, M. (1984). Function of band-shaped prefabricated plastic board drain. *Proc. 19th Japanese National Conf. on Soil Mech. Found. Eng.*
- [27] Karunaratne, G. P., Chew, S. H., Lim, L. H., Toh, M. L. Poh, W. G. & Hee, A. M. (2002) Electro-osmotic consolidation of soft clay with conductive polymeric vertical drain. *7th Int. Geosynthetics Conf.*, 3, Nice, pp. 1043–1046.
- [28] Kjellman, W. (1948). Consoliation of fine-grained soils by drain wells. *Trans. ASCE*, Vol. 113 (Contribution to the discussion), pp. 748–751.
- [29] Koda, E., Szymanski, A. & Wolski, W. (1986). Laboratory tests on Geodrains— Durability in organic soils. *Seminar on Laboratory Testing of Prefabricated Band-Shaped Drains*. Milan, April 22–23.
- [30] Ladd, C. C. (1991). Stability evaluation during staged construction. *J. Geot. Eng.* 117, No. 4, pp. 540–615.
- [31] *Lawrence, C. A. & Koerner, R. M. (1988). Flow behavior of kinked strip drains. In Geosynthetics for Soil Improvement, Geotechnical Special Publication No. 18 (editor R. D. Holtz), pp. 22–39.*
- [32] *Lo. D. O. K. (1991). Soil improvement by vertical drains. Doctoral Thesis, Univ. of Illinois at Urbana Champaign.*
- [33] Lunne, T., Robertson, P. K. & Powell, J. J. M., (1997). *Cone penetration testing in geotechnical practice*, E & FN Spon, an imprint of Routledge, London.
- [34] Madhav, M. R., Park, Y. M. & Miura, N. (1993). Modelling and study of smear zones around band-shaped drains. *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 4, pp.133–147.
- [35] Magnan, J. P. [1983]. *Théorie et Pratique des drains verticaux*. Lavoisier TEC & DOC.
- [36] Massarsch, K. R., 1979. “Lateral Earth Pressure in Normally Consolidated Clay”, *7th European Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Brighton, Proceedings, Vol. 2, pp. 245–249.
- [37] Massarsch, K. R. & Broms, B. B. (1977). Fracturing of soil caused by driving in clay. *Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Tokyo, Session 1, pp. 197–199.

- [38] Mesri, G. (1989). A re-evaluation of $s_{u(mob)} = 0.22 \sigma'_p$ using laboratory shear tests. *Canadian Geot. J.* 26, pp. 162-164.
- [39] Miura N. & Chai, J. C. (2000). Discharge capacity of prefabricated vertical drains confined in clay. *Geosynthetics International*, Vol. 7, No. 2, pp. 119 -134.
- [40] Nooy van der Kolff, A. H., Spiereburg, S. E. J., Mathijssen, F. A. J. M. (2003). BeauDrain: A new, innovative consolidation system based on the proven concept of vacuum consolidation, *Proc. Piarc World Road Congress*, Durban.
- [41] Onoue, A. (1988). Consolidation of multilayered anisotropic soils by vertical drains with well resistance. *Soils and Foundations*, Japanese Soc. Soil Mech. Found. Eng., Vol.28, No. 3. pp. 75–90.
- [42] Onoue, A., Ting, N., Germaine, J. T. & Whitman, R. V. (1991). Permeability of disturbed soil around vertical drains. In: *ASCE Geot. Special Publ.*, No. 27, pp. 879-890.
- [43] Pestana, J.M., Hunt, C. & Goughnour, R. (1998)). Use of prefabricated drains for the reduction of liquefaction potential. *ASCE, 12th Engineering Mechanical Conf.*, San Diego, California, pp. 1025–1026.
- [44] Rixner, J. J., Kraemer, S. R. & Smith, A. D. (1986). Prefabricated vertical drains. *Engineering Guidelines, FWHA/RD-86/168*, Federal Highway Administration, Washington D.C, Vol. 1.
- [45] Robertson, P. K., Campanella, R. G., Brown, P. T. & Robinson, K. E. (1988). Prediction of wick drain performance using piezometer cone data. *Can. Geotech. J.* 25, pp. 56-61.
- [46] Runesson, K., Hansbo, S. & Wiberg, N.-E. (1985) The efficiency of partially penetrating vertical drains. *Géotechnique* 35, No. 4, pp. 511–516.
- [47] Skempton, A. W. (1954). Discussion of the structure of inorganic soil. *Proc. ASCE, Soil Mech. Div.* 80, Separate No. 478.
- [48] Teh, C. I. & Houlsby, G. T. (1991). An analytical study of the cone penetration test in clay. *Géotechnique* 41, No. 1, pp. 17-34.
- [49] Torstensson, B.-A. (1977). The pore pressure probe. *Fjellsprengningsteknikk/Bergmekanikk/Geoteknikk 1977*, Oslo. pp. 34.1–34.15.
- [50] Torstensson, B.-A. (1986). A device for in-situ measurement of hydraulic conductivity. 4th *International Seminar – Field Instrumentation and In-Situ Measurement*. Nanyang Technological Institute, Singapore.
- [51] Yoshikuni, H. & Nakanado, H. (1974). Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability. *Soils and Foundations*, Vol. 14, No. 2, pp. 35-45.
- [52] Zeng, G. X. & Xie, K. H. (1989). New development of the vertical drain theory. *Proc. 12th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Rio de Janeiro, Vol. 2, Paper 18/28, pp. 1435-1438.
- [53] EN 791, *Drill rigs. Safety*
- [54] EN 1991 (all parts), *Eurocode 1: Actions on structures*
- [55] EN 12224, *Geotextiles and geotextile-related products. Determination of the resistance to weathering*
- [56] EN 12225, *Geotextiles and geotextile-related products. Method for determining the microbiological resistance by a soil burial test*
- [57] EN 12226, *Geotextiles and geotextile-related products. General tests for evaluation following durability testing*

- [58] EN ISO 9863-1, *Geosynthetics. Determination of thickness at specified pressures. Part 1: Single layers (ISO 9863-1:2005)*
- [59] EN ISO 9864, *Geosynthetics. Test method for the determination of mass per unit area of geotextiles and geotextile-related products (ISO 9864:2005)*
- [60] EN ISO 10318, *Geosynthetics. Terms and definitions (ISO 10318:2005)*
- [61] EN ISO 13438, *Geotextiles and geotextile-related products. Screening test method for determining the resistance to oxidation (ISO 13438:2004)*
- [62] EN 14030, *Geotextiles and geotextile-related products. Screening test method for determining the resistance to acid and alkaline liquids (ISO/TR 12960:1998, modified)*

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Génova, 6
28004 MADRID-España

info@aenor.es
www.aenor.es

Tel.: 902 102 201
Fax: 913 104 032