

Octubre 2008

TÍTULO

Ejecución de trabajos geotécnicos especiales

Mezclado profundo

Execution of special geotechnical works. Deep mixing.

Exécution des travaux géotechniques spéciaux. Colonnes de sol traité.

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de las Normas Europeas EN 14679:2005 y EN 14679:2005/AC:2006.

OBSERVACIONES

Esta norma sustituye a la Norma EN 14679:2005 (ratificada por AENOR).

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 46561:2008

© AENOR 2008
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

57 Páginas

Grupo 34

AENOR

NORMA EUROPEA
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM

EN 14679

Abril 2005

+AC

Junio 2006

ICS 93.020

Versión en español

Ejecución de trabajos geotécnicos especiales Mezclado profundo

**Execution of special geotechnical works.
Deep mixing.**

**Exécution des travaux géotechniques
spéciaux. Colonnes de sol traité.**

**Ausführung von besonderen
geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau).
Tiefreichende Bodenstabilisierung.**

Esta norma europea ha sido aprobada por CEN el 2005-02-28.

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, 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, Suecia y Suiza.

CEN
COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN
European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung
CENTRO DE GESTIÓN: Rue de Stassart, 36 B-1050 Bruxelles

© 2006 Derechos de reproducción reservados a los Miembros de CEN.

ÍNDICE

	Página
PRÓLOGO	6
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	7
2 NORMAS PARA CONSULTA.....	7
3 TÉRMINOS Y DEFINICIONES.....	8
4 INFORMACIÓN NECESARIA PARA LA EJECUCIÓN DEL TRABAJO	10
4.1 Generalidades.....	10
4.2 Requisitos particulares	11
5 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA.....	11
5.1 Generalidades.....	11
5.2 Información específica.....	12
6 MATERIALES Y PRODUCTOS.....	13
6.1 Generalidades.....	13
6.2 Consideraciones especiales.....	13
7 CONSIDERACIONES RELATIVAS AL DISEÑO	13
7.1 Generalidades.....	13
7.2 Consideraciones de diseño adicionales.....	14
7.3 Selección del ligante y de los aditivos	14
7.4 Ensayos de laboratorio y de mezclas tratadas <i>in situ</i>	15
7.5 Procedimiento de diseño	15
8 EJECUCIÓN	16
8.1 Método de ejecución	16
8.2 Preparación del emplazamiento	17
8.3 Ensayos de campo	17
8.4 Tolerancias de ejecución.....	17
8.4.1 Generalidades.....	17
8.5 Control de calidad y aseguramiento de la calidad.....	17
8.6 Mezclado profundo	18
8.6.1 Generalidades.....	18
8.6.2 Mezclado seco.....	18
8.6.3 Mezclado húmedo	19
8.7 Instalación de refuerzo estructural.....	19
9 SUPERVISIÓN, ENSAYOS Y CONTROL.....	20
9.1 Generalidades.....	20
9.2 Supervisión	20
9.3 Ensayos	20
9.4 Control	21
9.5 Comportamiento del suelo tratado	21
9.6 Otros aspectos	21

10	REGISTROS	22
10.1	Registros durante la construcción	22
10.2	Registros a la finalización de los trabajos.....	22
11	REQUISITOS ESPECIALES.....	22
11.1	Generalidades.....	22
11.2	Seguridad.....	23
11.3	Protección ambiental	23
11.4	Afecciones a estructuras adyacentes.....	23
ANEXO A (Informativo)	ASPECTOS PRÁCTICOS DEL MEZCLADO PROFUNDO	24
A.1	Introducción	24
A.2	Campos de aplicación	24
A.3	Ejecución.....	24
A.3.1	Generalidades.....	24
A.3.2	Método seco	26
A.3.3	Método húmedo.....	30
A.3.4	Diseños de instalación	34
A.3.5	Métodos híbridos.....	37
A.4	Consideraciones constructivas	39
ANEXO B (Informativo)	ASPECTOS DE DISEÑO	41
B.1	Generalidades.....	41
B.1.1	Objeto y campo de aplicación	41
B.1.2	Aplicación	41
B.2	Principios de diseño	41
B.3	Proceso de ejecución del mezclado profundo	44
B.4	Elección del ligante	44
B.5	Ensayos	44
B.5.1	Generalidades.....	44
B.5.2	Ensayos de laboratorio	45
B.5.3	Ensayos de campo	46
B.6	Correlación de varias propiedades del suelo tratado.....	48
B.6.1	Resistencia de campo y de laboratorio.....	48
B.6.2	Correlación entre las características mecánicas y la resistencia a compresión simple.....	50
B.7	Aspectos de diseño.....	50
B.7.1	Estabilidad	50
B.7.2	Asientos	53
B.7.3	Confinamiento	54
ANEXO C (Informativo)	GRADO DE OBLIGACIÓN DE LAS DISPOSICIONES DE ESTA NORMA	55
BIBLIOGRAFÍA.....		56

PRÓLOGO

Esta Norma EN 14679:2005 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 octubre de 2005, y todas las normas nacionales técnicamente divergentes deben anularse antes de finales de octubre de 2005.

Esta norma ha sido preparada para su aplicación junto a la Norma EN 1997-1 y el proyecto de Norma prEN 1997-2. Esta norma amplía el diseño sólo cuando es necesario, pero proporciona una cobertura completa de los requisitos de construcción y supervisión.

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, 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, Suecia y Suiza.

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma especifica principios generales para la ejecución, ensayo, supervisión y seguimiento de los trabajos de mezclado profundo llevados a cabo mediante dos métodos diferentes: mezclado seco y mezclado húmedo.

El mezclado en profundidad considerado en esta norma se limita a los métodos que comprenden:

- a) el mezclado mediante la rotación de útiles de mezclado mecánico (véase la figura A.1, en el anexo A) sin eliminar el soporte lateral provisto al suelo circundante;
- b) el tratamiento del suelo hasta una profundidad mínima de 3 m;
- c) diferentes formas y configuraciones, consistentes en columnas individuales, paneles, celdas, bloques, pantallas o cualquier combinación de más de una columna individual, con o sin solape (véanse las figuras A.8 a A.12 en el anexo A);
- d) el tratamiento de suelo natural, rellenos, depósitos de residuos y fangos, etc.

Para otros métodos de mejora del terreno existentes que utilizan técnicas similares véase el apartado A.3.5.

En el anexo A se proporciona una guía sobre aspectos prácticos del mezclado profundo tales como los procedimientos de ejecución y equipos. En la figura A.14 del anexo A se ejemplifican las aplicaciones principales. En el anexo B se presentan los métodos de ensayo y la especificación y determinación de los parámetros de diseño afectados por la 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 196-1 *Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.*

EN 196-2 *Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos.*

EN 196-3 *Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.*

EN 196-4 *Métodos de ensayo de cementos. Parte 4: Determinación de la calidad de los constituyentes.*

EN 196-5 *Métodos de ensayo de cementos. Parte 5: Ensayo de puzolanidad para los cementos puzolánicos.*

EN 196-6 *Métodos de ensayo de cementos. Parte 6: Determinación de la calidad.*

EN 196-7 *Métodos de ensayo de cementos. Parte 7: Métodos de toma y preparación de muestras de cemento.*

EN 196-8 *Métodos de ensayo de cementos. Parte 8: Determinación del calor de hidratación. Método por disolución.*

EN 196-21 *Métodos de ensayo de cementos. Parte 21: Determinación del contenido de cloruro, dióxido de carbono y álcalis en el cemento.*

EN 197-1:2000 *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.*

EN 197-2:2000 *Cemento. Parte 2: Evaluación de la conformidad.*

EN 451 *Métodos de ensayo de cenizas volantes.*

EN 459-1 *Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.*

EN 459-2 *Cales para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.*

EN 791:1995 *Equipos de perforación. Seguridad.*

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

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

EN 12716 *Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Inyecciones de alta presión. Jet grouting.*

ENV 1991 *Eurocódigo 1: Acciones en estructuras.*

ENV 10080 *Acero para el armado del hormigón. Acero soldable para armaduras de hormigón armado. Generalidades.*

EN ISO 14688-1 *Ingeniería geotécnica. Identificación y clasificación de suelos. Parte 1: Identificación y descripción. (ISO 14688-1: 2002).*

EN ISO 14688-2 *Ingeniería geotécnica. Identificación y clasificación de suelos. Parte 2: Principios de clasificación. (ISO 14688-2:2004).*

EN ISO 14689-1 *Investigación y ensayos geotécnicos. Identificación y clasificación de rocas. Parte 1: Identificación y descripción (ISO 14689-1: 2003).*

3 TÉRMINOS Y DEFINICIONES

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

3.1 aditivo:

en: admixture

de: Zusatzmittel

fr: additif, addition

Dispersante, fluidificante, agente retardante.

3.2 ligante:

en: binder

de: Bindemittel

fr: liant

Materiales químicamente reactivos (cal, cemento, yeso, escoria de alto horno, ceniza volante, etc.).

3.3 contenido de ligante:

en: binder content

de: Bindemittelgehalt

fr: dosage en liant

Peso de ligante seco introducido por unidad de volumen de suelo a tratar.

3.4 factor de ligante:

en: binder factor

de: Bindemittelfaktor

fr: teneur en liant

Relación entre el peso del ligante seco introducido y el peso seco del suelo a tratar.

3.5 número de rotación de las cuchillas:

en: blade rotation number

de: Flügelumdrehungszahl

fr: indice de malaxage

Número total de rotaciones de las cuchillas de mezclado por metro de movimiento del varillaje.

3.6 columna:

en: column

de: Säule

fr: colonne

Pilar de suelo tratado construido *in situ* por medio de un proceso de instalación individual utilizando un útil de mezclado. El útil de mezclado y el proceso de ejecución determinan la forma y tamaño de la sección transversal de una columna.

3.7 mezclado seco:

en: dry mixing

de: Trockenmischverfahren

fr: malaxage par voie inerte

Proceso consistente en la desagregación mecánica del suelo *in situ* y su mezclado con ligantes en forma de polvo seco, con o sin finos inertes y aditivos.

3.8 filler:

en: filler

de: Füller

fr: fines inerte, charge inerte

Material que no reacciona (arena, polvo de caliza, etc.).

3.9 energía de mezclado:

en: mixing energy

de: Mischungsenergie

fr: energy de malaxage

Recursos utilizados por la maquinaria en funcionamiento.

3.10 proceso de mezclado:

en: mixing process

de: Mischvorgang

fr: procédé de malaxage

Comprende la desagregación mecánica de la estructura del suelo y la dispersión en el suelo de los ligantes y filleres.

3.11 útil de mezclado:

en: mixing tool

de: Mischwerkzeug

fr: outil de malaxage

Útil utilizado para desagregar el suelo y para distribuir y mezclar el ligante con el suelo, consistente en una o varias unidades rotatorias provistas de varias cuchillas, brazos y palas con o sin hélices continuas o discontinuas (véase el anexo A).

3.12 penetración (descenso del útil):

en: penetration (downstroke)

de: Abbohrvorgang

fr: descente de l'outillage

Etapas o fase del ciclo del proceso de mezclado en la cual se lleva el útil de mezclado hasta la profundidad apropiada y se lleva a cabo el mezclado y fluidificación inicial.

3.13 velocidad de penetración o extracción:

en: penetration or retrieval speed

de: Abbohr-bzw. Ziehgeschwindigkeit

fr: vitesse de descente ou de remontée

Movimiento vertical por unidad de tiempo del útil de mezclado durante la penetración o extracción.

3.14 relación de penetración o extracción:

en: penetration or retrieval rate

de: Abbohr-bzw. Ziehrate

fr: vitesse de descente ou de remontée par tour

Movimiento vertical del útil de mezclado por cada giro o vuelta de la unidad de rotación durante la penetración o extracción.

3.15 extracción:

en: retrieval (upstroke)

de: Ziehvorgang

fr: remontée (montée de l'outillage)

Etapa o fase del ciclo del proceso de mezclado en la cual tiene lugar el mezclado final y extracción del útil de mezclado.

3.16 remezclado:

en: restroke

de: wiederholter Mischvorgang

fr: re-malaxage

Ciclo adicional de penetración y extracción del útil de mezclado para aumentar el contenido de ligante y/o la homogeneidad de la columna.

3.17 velocidad de rotación:

en: rotation speed

de: Umdrehungsgeschwindigkeit

fr: vitesse de rotation

Número de vueltas o giros por unidad de tiempo de la unidad de rotación del útil de mezclado.

3.18 mezclado:

en: stroke

de: Mischvorgang

fr: malaxage

Un ciclo completo del proceso de mezclado.

3.19 relación de volumen:

en: volume ratio

de: Volumenverhältnis

fr: teneur volumique en coulis

Relación entre el volumen de lechada inyectada (en el mezclado por vía húmeda) y el volumen de suelo a tratar.

3.20 relación agua/ligante:

en: water/binder ratio

de: Wassr-/Bindemittel-Verhältnis

fr: rapport eau/liant

Peso de agua añadida al ligante seco dividido por el peso del ligante seco.

3.21 mezclado por vía húmeda:

en: wet mixing

de: Nassmischverfahren

fr: malxage par voie humide

Proceso que consiste en la desagregación mecánica del suelo *in situ* y su mezclado con una lechada compuesta por agua, ligantes con o sin filleres inertes y aditivos.

4 INFORMACIÓN NECESARIA PARA LA EJECUCIÓN DEL TRABAJO**4.1 Generalidades**

4.1.1 Se debe suministrar toda la información necesaria antes de la ejecución del trabajo.

4.1.2 Esta información debería incluir:

- a) cualquier restricción legal o estatutaria;
- b) la situación de las líneas de la malla principal para el replanteo;
- c) las condiciones de las estructuras, carreteras, servicios, etc. adyacentes a la obra;
- d) un sistema de gestión de la calidad adecuado, incluyendo supervisión, auscultación y ensayos.

4.1.3 La información sobre las condiciones del emplazamiento debe incluir, cuando proceda:

- a) la geometría del emplazamiento (condiciones de contorno, topografía, accesos, taludes, restricciones de gálibo, etc.);
- b) las estructuras subterráneas existentes, servicios, contaminación y limitaciones arqueológicas conocidas;
- c) restricciones ambientales, incluyendo ruido, vibración y contaminación;
- d) las actividades de construcción en ejecución o futuras tales como rebajamientos del nivel freático, túneles y excavaciones profundas.

4.2 Requisitos particulares

4.2.1 También se debe suministrar la siguiente información:

- a) la experiencia previa en obras de mezclado profundo u obras de geotecnia especiales adyacentes al emplazamiento, incluyendo los resultados de los ensayos de campo realizados para confirmar el diseño;
- b) la contaminación subterránea o riesgos que puedan afectar al método de ejecución, la seguridad del trabajo o la eliminación del material de excavación del emplazamiento.

4.2.2 Se deben dar las siguientes instrucciones:

- a) el procedimiento para informar de circunstancias imprevistas o condiciones que aparezcan que sean diferentes de aquellas asumidas en el diseño;
- b) el procedimiento para informar si se adopta un método de diseño observacional;
- c) indicación de cualquiera de las restricciones tales como las fases de construcción requeridas en el diseño;
- d) un programa de cualquiera de los procedimientos de ensayo y aceptación de los materiales incorporados a la obra.

4.2.3 Se debe establecer y acordar antes del comienzo de la obra cualquier requisito adicional o desviación respecto a lo establecido en las disposiciones de permiso dadas en esta norma.

5 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA

5.1 Generalidades

5.1.1 La profundidad y extensión de cualquier investigación debe ser suficiente para permitir la determinación de las condiciones del terreno de acuerdo con los requisitos de la Norma EN 1997-1.

5.1.2 Los ensayos de campo y de laboratorio deben cumplir con el proyecto de Norma prEN 1997-2 y las Normas europeas correspondientes EN 196-1 a -8, EN 196-21, EN 197-1 y -2, EN 451, EN 459-1 y -2, ENV 10080, EN 12716, EN 791, EN ISO 14688-1 y EN ISO 14688-2).

5.1.3 Para determinar la extensión de la investigación del emplazamiento se debe tener en cuenta la experiencia correspondiente a trabajos de mezclado profundo comparables, ejecutados bajo condiciones similares, en lugares cercanos.

5.1.4 El informe sobre la investigación del emplazamiento debe estar disponible junto con toda la información conocida que pueda afectar a la elección del método.

5.1.5 Se deben sellar adecuadamente los sondeos y las catas para no afectar al movimiento del agua subterránea y/o la construcción y el comportamiento de las columnas mezcladas en profundidad.

5.2 Información específica

5.2.1 La identificación y la clasificación del suelo debe cumplir las Normas EN ISO 14688-1 y EN ISO 14688-2.

5.2.2 Además de la descripción geológica general y los detalles relacionados en la Norma EN 1997-1, el informe sobre la investigación del emplazamiento debe contener la siguiente información con respecto a las condiciones del terreno en el que se va a ejecutar el mezclado profundo:

- a) la composición, extensión lateral, espesor y dureza del estrato superficial, raíces de árboles, rellenos, etc.;
- b) la presencia de cantos o bloques, capas cementadas o roca subyacente que puedan causar dificultades en la ejecución o que podrían requerir métodos o útiles especiales;
- c) la presencia de suelo expansivo (montmorillonita);
- d) las cavidades, huecos o fisuras;
- e) los niveles piezométricos del agua subterránea con su variación y posible presión artesisana.

5.2.3 Se debería suministrar la información adicional siguiente, cuando proceda:

5.2.3.1 Características físicas y de estado:

- a) límites de consistencia;
- b) clasificación;
- c) densidad;
- d) distribución granulométrica;
- e) mineralogía;
- f) humedad natural;
- g) contenido de materia orgánica.

5.2.3.2 Características mecánicas:

- a) deformación y consolidación;
- b) resistencia (a cortante, a compresión y a tracción);
- c) permeabilidad.

5.2.3.3 Características ambientales, químicas y biológicas:

- a) calidad del agua (por ejemplo: contaminación, agresividad, química, valor del pH, tipo y concentración de iones y metales -mediciones de referencia-);
- b) datos de ensayo de contaminación;
- c) ensayos de lixiviación.

5.2.4 Se debería establecer el nivel y la localización del terreno en cualquier punto de investigación o de ensayo en relación con la referencia nacional reconocida o con un punto de referencia fijo.

6 MATERIALES Y PRODUCTOS

6.1 Generalidades

6.1.1 La ejecución del mezclado profundo supone la adición al suelo de un ligante y, si es necesario, de uno o más de los componentes siguientes:

- a) aditivo;
- b) agua;
- c) filler;
- d) armadura estructural.

6.1.2 Todos los materiales y productos a incorporar al mezclado profundo deben estar de acuerdo con las normas europeas correspondientes. Cuando las normas europeas no estén disponibles, el uso de los materiales y productos debe estar de acuerdo con las normas nacionales y/o guías.

6.1.3 Todos los materiales y productos que se utilicen deben cumplir con las reglamentaciones ambientales locales.

6.1.4 Todos los materiales y productos que se utilicen deben cumplir con las especificaciones de proyecto.

6.1.5 Se deben realizar los ensayos apropiados para asegurar el cumplimiento de las especificaciones de proyecto de los materiales no cubiertos por las normas existentes.

6.1.6 Se deben documentar las fuentes de suministro de materiales y no se deben cambiar sin notificación previa.

6.2 Consideraciones especiales

6.2.1 Se debe ensayar el agua que no provenga de fuentes de agua potable reconocidas para determinar si es o no adecuada para el uso previsto.

6.2.2 Los materiales y productos pueden tener trazas de sustancias químicas significativas desde el punto de vista ambiental, como una impureza normalmente presente. En estos casos puede ser necesario determinar su impacto ambiental.

7 CONSIDERACIONES RELATIVAS AL DISEÑO

7.1 Generalidades

7.1.1 Hay varios factores que influyen en la resistencia *in situ* de las columnas, como las propiedades del suelo a tratar, las condiciones de mezclado, el útil de mezclado y el proceso de mezclado, las condiciones de curado, el tipo y cantidad de ligante, condiciones del terreno, etc. Por lo tanto, puede ser difícil estimar con exactitud la resistencia de campo en la fase de diseño. Es importante estimar y verificar la resistencia de campo en varias etapas por medio de ensayos de laboratorio, la experiencia acumulada, pruebas de campo y ensayos de verificación. El diseño se debería modificar si no se pueden alcanzar los requisitos.

7.1.2 La ejecución de los proyectos de mezclado profundo tienen implicaciones de diseño geotécnico en varias fases y puede ser un proceso iterativo. El objetivo del diseño es producir documentos técnicos que permitan que los trabajos se construyan considerando la seguridad, servicio, economía y durabilidad, teniendo en cuenta la vida útil esperada. Se recomienda que las partes responsables del diseño se involucren también durante la construcción.

7.1.3 El diseño geotécnico de los proyectos de mezclado profundo debe basarse en las Normas ENV 1991, EN 1997-1 y el proyecto de Norma prEN 1997-2. El anexo B informativo resume parámetros importantes que afectan a la estabilidad global y al asiento del suelo tratado.

7.1.4 Se permiten las referencias a experiencias relevantes si se ha realizado la verificación apropiada (por ejemplo de ensayos de penetración, presiométricos u otros).

7.1.5 Se debe preparar un método de ejecución que detalle los trabajos de mezclado profundo. Como requisito mínimo, el método de ejecución debe detallar la localización y el fin de los trabajos, la vida de diseño requerida, posibles restricciones durante la fase constructiva y cualquier peligro asociado con la ejecución de los trabajos.

7.1.6 Cuando hay una cierta libertad en la selección de los materiales, el método de ejecución debe destacar los requisitos particulares que puedan influir en la decisión final.

7.1.7 El diseño preliminar se puede basar en los ensayos de laboratorio de muestras mezcladas y en experiencias comparables, teniendo en cuenta la diferencia en las características de las muestras de laboratorio y de suelo tratado *in situ*.

NOTA Se hace referencia al anexo B como guía.

7.1.8 Puede que los ensayos no sean suficientes para verificar la aptitud del tratamiento. Se requiere una supervisión, un control y unos registros apropiados. Frecuentemente son apropiadas observaciones directas y normalmente no se completa el diseño hasta que se consigue experiencia en el emplazamiento.

7.2 Consideraciones de diseño adicionales

7.2.1 Se tienen que tener en cuenta las condiciones de carga, los efectos climáticos, las condiciones hidráulicas, y los límites aceptables de asiento, el levantamiento y la afección a estructuras y servicios que puedan verse afectados por los trabajos de mezclado profundo.

7.2.2 El diseño debería identificar y tener en cuenta restricciones ambientales en la construcción, como el ruido, vibraciones, polución del aire y el agua y el impacto en estructuras adyacentes.

7.2.3 Cuando se requiere la capacidad por punta de la columna, se debe indicar el uso de un útil de mezclado y de un proceso de mezclado adecuados, para evitar que se forme una zona remoldeada en la base de la columna.

7.2.4 La columna especificada o el trazado de la pantalla y las tolerancias, deberían tener en cuenta las limitaciones del equipo de mezclado.

7.2.5 Para los tipo cuadrícula o celda, tipo bloque o columnas solapadas, el espacio especificado entre las columnas debe tener en cuenta la desviación angular y las tolerancias posicionales.

7.2.6 Se debe informar inmediatamente de correcciones necesarias debidas a circunstancias imprevistas, como cambios esenciales en las condiciones del terreno o hidráulicas.

7.2.7 Se deberían especificar protecciones adecuadas y ensayos cuando los suelos tratados puedan estar expuestos a ciclos de hielo/deshielo.

7.2.8 Se deben considerar en el diseño las consecuencias debidas a la exposición de las columnas a efectos químicos y físicos. Se necesitan consideraciones especiales respecto a la durabilidad a largo plazo en ambientes marinos o en suelos contaminados.

7.3 Selección del ligante y de los aditivos

7.3.1 En la selección del ligante se deben considerar las condiciones del emplazamiento y del terreno y la naturaleza y propiedades del terreno a tratar.

7.3.2 Se debe estudiar la eficiencia del ligante y del aditivo con ensayos de laboratorio y/o ensayos *in situ* del suelo tratado, teniendo en cuenta las recomendaciones dadas en el apartado 7.4.

7.4 Ensayos de laboratorio y de mezclas tratadas *in situ*

7.4.1 Como las propiedades del suelo tratado están influenciadas por numerosos factores, incluyendo el proceso de ejecución, se deben realizar pruebas preliminares y ensayos del suelo tratado para confirmar que se pueden alcanzar los requisitos de diseño.

7.4.2 Cuando se esté estudiando el suelo tratado, se debería considerar que los resultados de los ensayos de laboratorio podrían sobrestimar los resultados de campo alcanzables (debido, por ejemplo, al uso de una mezcla más cuidadosa en el laboratorio y a la variación de las condiciones de curado).

7.4.3 Cuando se estudia el proceso y el comportamiento del suelo tratado, se debería considerar la mejora del suelo con el tiempo. El ritmo de mejora depende del tipo y cantidad de ligante utilizado y de las condiciones de curado. Se debería tener en cuenta el efecto de las condiciones de curado cuando se estudia el efecto del tiempo en mezclas de prueba (temperatura, curado bajo agua, precarga, etc.).

7.4.4 Se deben considerar la secuencia y el ritmo de ejecución, el tiempo de fraguado y endurecimiento, y el diámetro de las columnas para evitar fallos locales del suelo o asentamientos o levantamientos inaceptables.

7.4.5 Se deben ejecutar programas de ensayos específicos del emplazamiento cuando se utiliza el mezclado profundo para inmovilizar contaminantes o estabilizar depósitos de residuos, o para propósitos similares donde pueda haber interacciones imprevisibles entre el ligante y el material *in situ*.

7.5 Procedimiento de diseño

7.5.1 Los resultados del diseño deberían establecer los objetivos funcionales y la geometría del tratamiento, las especificaciones de los materiales o productos considerados en el diseño y cualquier detalle adicional como el procedimiento de ejecución de los trabajos y, cuando proceda, proporcionar la siguiente información:

- a) especificaciones para los trabajos de mezclado profundo;
- b) requisitos de las columnas (resistencia y características de deformación y permeabilidad);
- c) la anchura del área de solapamiento entre columnas adyacentes;
- d) tolerancias para columnas respecto a la longitud, el diámetro, la inclinación y la posición en planta;
- e) límites y geometría de la instalación y planos de replanteo;
- f) programa de ejecución, incluyendo un cronograma para cargas y posibles precargas, y la notificación de cualquier restricción como el proceso constructivo requerido en el diseño;
- g) un programa de los ensayos y procedimientos de aceptación para materiales incorporados en los trabajos y de cualquier ensayo requerido y de los procedimientos de control durante la ejecución;
- h) requisitos relativos a un posible refuerzo estructural (clase de material y procedimiento de instalación) y un cronograma para su ejecución;
- i) penetración de la base de la columna en un estrato resistente o impermeable;
- j) procedimiento de información para circunstancias imprevistas o condiciones que surjan y sean diferentes de aquellas que se consideran en el diseño o si se adopta un procedimiento observacional.

7.5.2 Siempre que se defina un criterio de aceptación basado en ensayos de probetas, el diseño debe especificar la localización, la fecha del ensayo y el equipo y procedimiento de ensayo.

7.5.3 Para ensayos mecánicos en el suelo tratado, se deben especificar las condiciones de ensayo de las muestras y el criterio de aceptación. Las tolerancias relativas a los parámetros funcionales especificados deben considerar la aptitud del método de ensayo propuesto, especialmente cuando estos métodos son indirectos, como los descritos en el anexo B.

7.5.4 Se deben establecer valores límite de los parámetros de diseño geotécnicos críticos, así como los pasos a seguir si los valores son susceptibles de ser excedidos.

7.5.5 Se debe establecer y acordar, antes del comienzo de los trabajos, cualquier requisito adicional o desviación de los requisitos establecidos dentro de los capítulos obligatorios de esta norma.

8 EJECUCIÓN

8.1 Método de ejecución

8.1.1 Antes de la ejecución del mezclado profundo, se deben realizar como mínimo los siguientes procedimientos de ejecución:

- a) identificación, objetivo y alcance de los trabajos de mezclado profundo;
- b) descripción del suelo conforme a las Normas EN ISO 14688-1:2002 y EN ISO 14688-2:2004;
- c) forma de la columna del mezclado profundo;
- d) método de mezclado profundo;
- e) útil de mezclado; forma/dimensiones/configuración de las unidades de rotación, posiciones de las salidas, forma y longitud del eje de mezclado;
- f) procedimiento de trabajo (penetración y extracción, mezclado y secuencia de ejecución (véase la tabla 9.4.1.1);
- g) precisión de la instalación;
- h) parámetros del mezclado profundo; tipo de ligante y composición, relación contenido de ligante/factor ligante, relación de volumen, relación agua/ligante, aditivo, filler (véase la tabla en el apartado 9.4.1.1);
- i) precauciones ante levantamientos o asientos;
- j) instalaciones del emplazamiento y áreas de trabajo;
- k) plantas y equipos;
- l) gestión de residuos;
- m) procedimientos de control de calidad como se requieren en el contrato;
- n) procedimientos con respecto a posibles interrupciones durante las operaciones de mezclado profundo;
- o) posible modificación de los parámetros del mezclado profundo durante los trabajos;
- p) verificación de los métodos de ensayo;
- q) documentos de los trabajos (estructura, planos, informes);
- r) evaluación de la seguridad y del riesgo ambiental.

8.2 Preparación del emplazamiento

8.2.1 La preparación debe llevarse a cabo de acuerdo con las especificaciones de diseño y las condiciones ambientales específicas del emplazamiento. Ésta debe incluir accesos adecuados para la planta y maquinaria, excavación, limpieza y nivelación de la plataforma de trabajo que garantice la suficiente capacidad portante para los equipos, recepción, control de calidad y almacenaje de material.

8.2.2 Todos los materiales y productos para el mezclado profundo que se entregan en el emplazamiento deben identificarse y revisarse de acuerdo con las especificaciones de diseño (véase 6.1.2).

8.2.3 Los ligantes deben protegerse de la humedad o del aire, que podrían afectar perjudicialmente a su uso y/o función.

8.3 Ensayos de campo

8.3.1 En los casos en los que no haya experiencia previa para comparar, deben realizarse ensayos de campo para confirmar que se pueden alcanzar los requisitos de diseño y establecer los valores críticos de control, usando el mismo equipamiento, materiales, técnica y procedimiento que se especifican para la ejecución principal del trabajo.

8.3.2 Los valores de control de la ejecución deben incluir:

- a) penetración y velocidad de extracción del útil de mezclado;
- b) velocidad de rotación de la unidad de rotación del útil de mezclado;
- c) presión de aire (en el caso del mezclado seco);
- d) ritmo de alimentación del ligante/lechada.

NOTA En algunas circunstancias se deberían controlar otros parámetros que tengan influencia directa en la calidad y rendimiento del trabajo, por ejemplo la anchura de solapamiento, cuando un muro proporciona contención, o el par, cuando las columnas se cimientan en un estrato rígido.

8.4 Tolerancias de ejecución

8.4.1 Generalidades

8.4.1.1 Se debe localizar e identificar la posición de cada columna antes de la instalación de las columnas.

8.4.1.2 Las columnas se deben construir dentro de las tolerancias geométricas establecidas en el diseño.

8.4.1.3 Las medidas de verticalidad e inclinación se pueden llevar a cabo con inclinómetros.

8.5 Control de calidad y aseguramiento de la calidad

8.5.1 Se debe disponer de un plan de calidad, detallando los métodos y la frecuencia de las revisiones a realizar durante la construcción y el proceso de verificación, y definir el procedimiento para tratar cualquier no-conformidad (véase la Norma EN ISO 9000). El plan de calidad también debe identificar todos los documentos (dibujos, procedimientos de ejecución, planos, etc.) que sean necesarios para la ejecución de los trabajos.

8.5.2 Se deben realizar los ensayos en los suelos tratados expuestos en el apartado 9.3 y se deben utilizar los métodos de ensayo, expuestos en el anexo B, de acuerdo a las especificaciones de diseño (véanse 7.4 y 9.3).

8.5.3 Si las condiciones que aparecen durante la ejecución no se corresponden con las esperadas en el diseño, se debe informar inmediatamente a aquellas personas responsables del proyecto.

8.6 Mezclado profundo

8.6.1 Generalidades

8.6.1.1 La ejecución del mezclado profundo se puede llevar a cabo tanto con mezclado seco como con mezclado húmedo. Estos dos métodos se describen en detalle en el anexo A.

NOTA 1 El mezclado profundo se ejecuta por medio de la desagregación mecánica del suelo usando principalmente el movimiento vertical de rotación de las unidades de mezclado e introduciendo un ligante, el cual se homogeniza con el suelo durante la penetración y/o extracción. La ejecución del mezclado profundo se puede llevar a cabo tanto por mezclado seco como por mezclado húmedo. Estos dos métodos se describen detalladamente en el anexo A.

NOTA 2 En el método de mezclado seco, el medio de transporte del ligante es normalmente aire comprimido.

NOTA 3 En el método de mezclado seco, el medio de transporte del ligante es normalmente agua.

8.6.1.2 El equipo y el útil de mezclado se deben posicionar correctamente en cada localización de la columna de acuerdo con las tolerancias de ejecución especificadas en el diseño.

8.6.1.3 La cantidad de ligante a lo largo de la columna se debe medir durante la instalación de cada columna.

8.6.1.4 Se debe calibrar el equipo utilizado para registrar la cantidad de ligante o sólidos para la lechada.

8.6.1.5 Se debe recoger cualquier vertido o residuo generado y depositarlo de acuerdo con los requisitos legales o normativos.

8.6.2 Mezclado seco

8.6.2.1 El procedimiento de ejecución del mezclado seco debe seguir las especificaciones dadas en el diseño.

NOTA 1 La instalación se lleva normalmente a cabo de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- el útil de mezclado se sitúa correctamente;
- el eje de mezclado penetra hasta la profundidad requerida de tratamiento con una desagregación simultánea del suelo por medio del útil de mezclado;
- después de alcanzar la profundidad requerida de tratamiento, el eje se retira y, al mismo tiempo, el ligante en forma granular o en polvo se inyecta en el suelo y el útil de mezclado, el cual rota en un plano horizontal, mezcla el suelo y el ligante.

NOTA 2 También se puede inyectar y mezclar el ligante durante la etapa de penetración.

8.6.2.2 El equipo y los útiles de mezclado deben ser compatibles con el procedimiento de ejecución, la profundidad del suelo a tratar y las tolerancias de ejecución especificadas en el diseño.

NOTA Cuando el ligante se inyecta y se mezcla con el suelo durante la etapa de penetración, la salida de la inyección se debe situar en o bajo el útil de mezclado.

8.6.2.3 La velocidad de rotación de las unidades de rotación y el ritmo de penetración y extracción del útil de mezclado se debe ajustar para producir un suelo tratado lo suficientemente homogéneo.

NOTA 1 Actualmente las velocidades de penetración y extracción normales del eje de mezclado son de 10 mm/r a 50 mm/r y el número de rotación de las cuchillas es normalmente de 200 a 500.

NOTA 2 La cantidad de trabajo de mezclado utilizado para producir una columna de mezclado seco depende del tipo y la cantidad de ligante y tipo de suelo. La utilización de cemento como ligante requiere una energía de mezclado mayor que si se utiliza solamente cal.

8.6.2.4 En el mezclado seco, la presión del aire se debe mantener lo más baja posible durante el proceso de mezclado para evitar problemas de arrastre de aire y movimientos del terreno.

NOTA Si la presión de aire es demasiado baja, puede que el ligante no se extienda por toda la sección de la columna.

8.6.2.5 Se debe controlar la cantidad de ligante y de presión de aire durante la ejecución de las columnas.

8.6.2.6 Se debería controlar la energía de mezclado para conseguir un suelo tratado uniforme.

8.6.3 Mezclado húmedo

8.6.3.1 El procedimiento de ejecución del mezclado húmedo debe tener en cuenta las especificaciones dadas en el diseño.

NOTA La instalación se lleva a cabo normalmente de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- el útil de mezclado se sitúa correctamente;
- el eje de mezclado penetra hasta la profundidad requerida de tratamiento con una desagregación simultánea del suelo por medio del útil de mezclado y/o inyección de lechada, normalmente lechada de cemento y posibles filleres y aditivos;
- después de alcanzar la profundidad requerida de tratamiento, el eje se retira y en algunos casos se inyecta al mismo tiempo la lechada en el suelo y se mezcla con él.

8.6.3.2 El equipo y los útiles de mezclado deben ser compatibles con el procedimiento de ejecución, la profundidad del suelo a tratar y las tolerancias de ejecución especificadas en el diseño.

NOTA 1 La lechada no se debe añadir durante la fase de extracción en máquinas con la salida debajo del útil de mezclado.

NOTA 2 Mientras que en los suelos granulares puede ser suficiente una hélice continua, los suelos cohesivos requieren útiles de mezclado más sofisticados. Las máquinas rotatorias necesitan tener la potencia suficiente para destruir la matriz del suelo y para unir la mezcla con la lechada.

8.6.3.3 La velocidad de rotación de las unidades de rotación y el ritmo de penetración y extracción del útil de mezclado se debe ajustar para producir un suelo tratado lo suficientemente homogéneo.

NOTA Actualmente las velocidades de rotación normales de las cuchillas de mezclado son de 25 r/min a 50 r/min y el número de rotación de las cuchillas es normalmente mayor que 350.

8.6.3.4 Se debe suministrar la lechada durante el mezclado bombeando un flujo continuo en el suelo a tratar.

8.6.3.5 El proceso de mezclado húmedo se puede interrumpir con la condición de que la lechada no haya empezado a endurecer y que el útil de mezclado empiece a trabajar otra vez al menos 0,5 m en el suelo ya tratado.

8.6.3.6 El remezclado se puede utilizar para redistribuir la lechada a una cierta porción de la columna tratada, refluidificar una porción del estrato durante la penetración o como un medio de mantener en movimiento las unidades de rotación durante una parada o un periodo de espera.

8.6.3.7 Se debe comprobar la densidad de la lechada con un dispositivo adecuado al menos dos veces por turno de trabajo en cada planta de clasificación/amasado. Se debe aumentar la frecuencia de ensayo en el caso de amasado manual.

8.7 Instalación de refuerzo estructural

8.7.1 Se pueden instalar refuerzos estructurales (barras de acero, jaulas de acero o vigas de acero) en las columnas o elementos mezclados frescos.

NOTA Se puede requerir de la ayuda de un vibrador en el proceso de ejecución.

8.7.2 Cualquier refuerzo estructural se debe instalar de acuerdo con las especificaciones del diseño (véase 7.5.1 h)).

9 SUPERVISIÓN, ENSAYOS Y CONTROL

9.1 Generalidades

9.1.1 En las especificaciones de diseño se debería definir el alcance de los ensayos y el control.

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

9.2 Supervisión

9.2.1 Debe estar a cargo de la ejecución de los trabajos personal cualificado y con experiencia en la técnica para comprobar que la construcción cumple con el diseño y otros documentos del contrato.

9.2.2 Cuando se encuentran condiciones imprevistas o se dispone de nueva información de las condiciones del suelo, se debe informar inmediatamente de acuerdo con los procedimientos de información especificados (véase 7.5.1 j)).

9.3 Ensayos

9.3.1 La conformidad con las hipótesis de diseño se debe comprobar respecto a las características resistentes, las propiedades de deformación y la homogeneidad de las columnas, y cuando proceda, respecto a su longitud, diámetro, permeabilidad, inclinación y solapamiento.

9.3.2 Se debe definir el alcance y los métodos de ensayo en cada caso individual antes del comienzo de los trabajos de mezclado profundo (tipo de aplicación y ensayos especificados).

NOTA El alcance de los ensayos y los métodos de ensayo dependen de la aplicación y de los requisitos funcionales. En el anexo B se da una guía de métodos apropiados de ensayo del suelo tratado (por ejemplo ensayos de compresión simple, ensayos triaxiales, ensayos edométricos, ensayos de penetración de columnas, ensayos de penetración de columna inversa, ensayos CPTU, ensayos presiométricos, ensayos sísmicos).

9.3.3 Los ensayos de control de calidad deberían estar distribuidos uniformemente en el tiempo y entre los útiles de mezclado utilizados.

9.3.4 Los ensayos de control deberían cubrir un número suficiente de columnas para establecer la distribución y el valor medio de las propiedades de la columna de cada estrato de suelo significativo comprendido en el trabajo de mezclado profundo.

9.3.5 Se debería decidir en cada caso individual el número de columnas a ensayar, teniendo en cuenta el propósito y el alcance del tratamiento y la aplicación.

9.3.6 Se deberían realizar ensayos químicos aplicables (por ejemplo la determinación del contenido de sustancias químicamente activas, valor de pH, contenido en carbonato, contenido en cloruros, contenido en sulfatos y sulfuros) cuando sea apropiado (por ejemplo en conexiones con inmovilización, contenciones y aplicaciones de pantallas de retención).

9.3.7 Se debe comprobar la anchura del área de solapamiento entre las columnas adyacentes cuando el solapamiento sea una parte esencial del diseño.

NOTA La anchura de solapamiento se puede verificar utilizando inclinómetros durante la penetración y extracción y perforando las columnas o por inspecciones visuales.

9.3.8 Se deben inspeccionar visualmente las columnas puestas como elementos de retención para encontrar faltas de homogeneidad durante la excavación.

9.4 Control

9.4.1 Proceso constructivo

9.4.1.1 Durante la ejecución se deben controlar los siguientes parámetros de construcción e información, o al menos a unos intervalos de profundidad de 0,5 m (véase la tabla 1).

Tabla 1 – Parámetros de construcción

Mezclado seco	Mezclado húmedo
Presión del tanque de aire	Presión de la lechada; presión del aire (si hay)
Velocidad de penetración y extracción	Velocidad de penetración y extracción
Velocidad de rotación (r/min durante la penetración y recuperación)	Velocidad de rotación (r/min durante la penetración y recuperación)
Cantidad de ligante por metro de profundidad durante la penetración y la recuperación	Cantidad de lechada por metro de profundidad durante la penetración y la recuperación

NOTA En algunas aplicaciones, especialmente cuando la continuidad de la pantalla es importante, se requiere controlar el posicionamiento y la verticalidad del útil de mezclado

9.4.1.2 Se puede obtener alguna información limitada del tipo de suelo y de las condiciones del nivel freático a partir del control de los parámetros de operación de la máquina (tales como el consumo de potencia y la resistencia a la penetración del útil de mezclado) y el rechazo.

9.4.1.3 Se debe controlar durante la ejecución el proceso de construcción y los parámetros constructivos relevantes al igual que la información relativa a las condiciones del suelo y las tolerancias de construcción.

9.4.1.4 La ejecución se debería controlar automáticamente, preferiblemente con la ayuda de un sistema informatizado.

NOTA En un sistema informatizado, la presión de alimentación, la velocidad de alimentación, el tipo de útil de mezclado, el factor y contenido del ligante, la relación agua/ligante se registran. Para cada columna instalada, se obtiene un informe impreso. Esto hace posible juzgar en etapas tempranas si se requiere o no un reajuste de la técnica de instalación y si se necesita instalar más columnas.

9.5 Comportamiento del suelo tratado

9.5.1 Los movimientos verticales y horizontales del suelo se deberían controlar usando métodos adecuados. Para ciertas aplicaciones se deberían controlar otros parámetros, como la presión intersticial.

9.5.2 Se debe informar de las desviaciones respecto a las especificadas en el diseño.

9.6 Otros aspectos

9.6.1 Los instrumentos de control se deben instalar lo suficientemente pronto para tener valores de referencia estables antes de empezar los trabajos.

10 REGISTROS

10.1 Registros durante la construcción

10.1.1 Se deben registrar aspectos relevantes de la construcción: ejecución de las columnas, ensayos y observaciones como se describen en el capítulo 9, y estos registros deben estar disponibles en el emplazamiento.

10.1.2 Se deben registrar durante la ejecución los siguientes parámetros de ejecución (véase la tabla 2):

Tabla 2 – Parámetros de ejecución

Mezclado seco	Mezclado húmedo
Fecha y hora de ejecución	Fecha y hora de ejecución
Número de referencia de la columna	Número de referencia de la columna
Forma de la tubería de mezclado y herramienta	Forma de la tubería de mezclado y herramienta
Velocidad de penetración y extracción (mm/r) o velocidad (m/min)	Velocidad de penetración y extracción (mm/r) o velocidad (m/min)
Velocidad de rotación (r/min durante la penetración y recuperación)	Velocidad de rotación (r/min durante la penetración y recuperación)
	Relación agua/ligante
Cantidad de ligante por metro de profundidad durante la penetración y la extracción	Cantidad de lechada por metro de profundidad durante la penetración y la extracción
Tolerancias de construcción (verticalidad, diámetro, puesta en obra)	Tolerancias de construcción (verticalidad, diámetro, puesta en obra)
Secuencia y tiempo	Secuencia y tiempo
Nivel superior e inferior	Nivel superior e inferior

10.2 Registros a la finalización de los trabajos

10.2.1 Se deben realizar registros de los trabajos tal y como han sido construidos incluyendo:

- registros como en el apartado 10.1;
- información detallando las columnas tal y como han sido construidas, incluyendo los resultados de los ensayos y cualquier cambio en los planos y especificaciones de diseño;
- detalles de los materiales y productos utilizados;
- detalles de condiciones geotécnicas relevantes del suelo.

11 REQUISITOS ESPECIALES

11.1 Generalidades

11.1.1 En este capítulo se consideran solamente aquellos aspectos de la seguridad del emplazamiento y la protección del entorno que son específicos del mezclado profundo.

11.1.2 Se deben respetar todas las normas europeas y nacionales, especificaciones y requisitos reglamentarios relativos a la seguridad y al medioambiente durante la ejecución de los trabajos.

11.2 Seguridad

11.2.1 Se debe prestar una atención especial a todos los procesos que requieran personal trabajando cerca de equipos y herramientas pesadas. En particular, el manejo del equipo de mezclado puede ser peligroso y se deben prestar especial atención a la seguridad del personal que trabaja en la proximidad de los equipos de rotación. Se debe realizar el manejo de los materiales y productos de acuerdo con las instrucciones de seguridad del fabricante.

11.3 Protección ambiental

11.3.1 La construcción debería identificar y tener en cuenta las restricciones ambientales como el ruido, vibraciones, polución del aire y agua y afecciones a estructuras adyacentes.

11.4 Afecciones a estructuras adyacentes

11.4.1 Cuando haya estructuras sensibles o taludes inestables cerca del emplazamiento o posibles áreas de influencia de la ejecución de los trabajos, se deberían observar cuidadosamente sus condiciones y documentarlas antes y durante la ejecución de los trabajos.

ANEXO A (Informativo)**ASPECTOS PRÁCTICOS DEL MEZCLADO PROFUNDO****A.1 Introducción**

El objetivo del mezclado profundo es mejorar las características del suelo, por ejemplo, incrementar la resistencia a cortante y/o reducir la compresibilidad, mezclando el suelo con algún tipo de aditivos químicos que reaccionan con el suelo. La mejora es posible por el intercambio de iones en la superficie de los minerales de arcilla, la adhesión de las partículas del suelo y/o el relleno de los huecos con los productos de las reacciones químicas. El mezclado profundo se clasifica según el ligante utilizado (cemento, cal/cemento y posibles aditivos como yeso, ceniza volante, etc.) y el método de mezclado (húmedo/seco, rotatorio/jet, hélice/cuchillas).

El desarrollo del mezclado profundo empezó en Suecia y Japón a finales de los años 60. El método seco, utilizando cal viva como ligante, se puso en práctica en Japón a mediados de los años 70. Aproximadamente al mismo tiempo, el mezclado profundo se originó en Suecia mezclando cal en polvo para mejorar el asiento en arcillas blandas y plásticas. El método húmedo, utilizando lechada de cemento como ligante, se puso también en práctica en Japón a mediados de los años 70. El mezclado profundo se ha extendido a otras partes del mundo desde entonces. Más recientemente se ha introducido la combinación de cemento y cal con yeso, cenizas volantes y escoria de alto horno.

Desde su introducción, se han diversificado las aplicaciones, los equipos se han mejorado y se han modificado los agentes endurecedores. En muchos países, el mezclado profundo se ha convertido en una técnica ampliamente aceptada debido a los considerables esfuerzos realizados tanto en la investigación como en la práctica del método. Se ha iniciado el uso del mezclado profundo para la remediación y contención de áreas contaminadas gracias a la creciente conciencia ambiental.

Recientemente, se han desarrollado técnicas híbridas al combinar el mezclado profundo con otros métodos de mejora del terreno (como el *jet grouting*) u otras máquinas (mezclado en superficie). El desarrollo tecnológico de los últimos 25 años lo ha resumido, por ejemplo, Terashi (2001). La clasificación genérica del equipo se muestra en la figura A.1.

A.2 Campos de aplicación

En la figura A.2 se muestra una gran variedad de aplicaciones de mezclado profundo para obras temporales y permanentes, en tierra o marinas. Las principales aplicaciones son la reducción de asientos, la mejora de la estabilidad y la contención.

A.3 Ejecución**A.3.1 Generalidades**

La ejecución típicamente consiste en el posicionamiento, penetración y extracción. Durante la penetración, los útiles de mezclado cortan y desagregan el suelo hasta la profundidad de tratamiento deseada. Durante la extracción, se inyecta el ligante en el suelo con un flujo constante mientras que la velocidad de la recuperación se mantiene constante. Las cuchillas de mezclado rotan en un plano horizontal y mezclan el suelo y el ligante. Sin embargo, hay algunas diferencias entre máquinas, en las cuales el ligante se inyecta durante la fase de penetración o en las dos fases de penetración y extracción.

Se pueden utilizar algunas herramientas especiales de mezclado en sitios donde el movimiento del terreno durante la ejecución se tiene que minimizar.

El mezclado profundo se puede llevar a cabo por dos métodos diferentes: el método de mezclado en seco, en el que el ligante se introduce por medio de aire, y el método de mezclado húmedo, en el que el ligante está en forma de lechada.

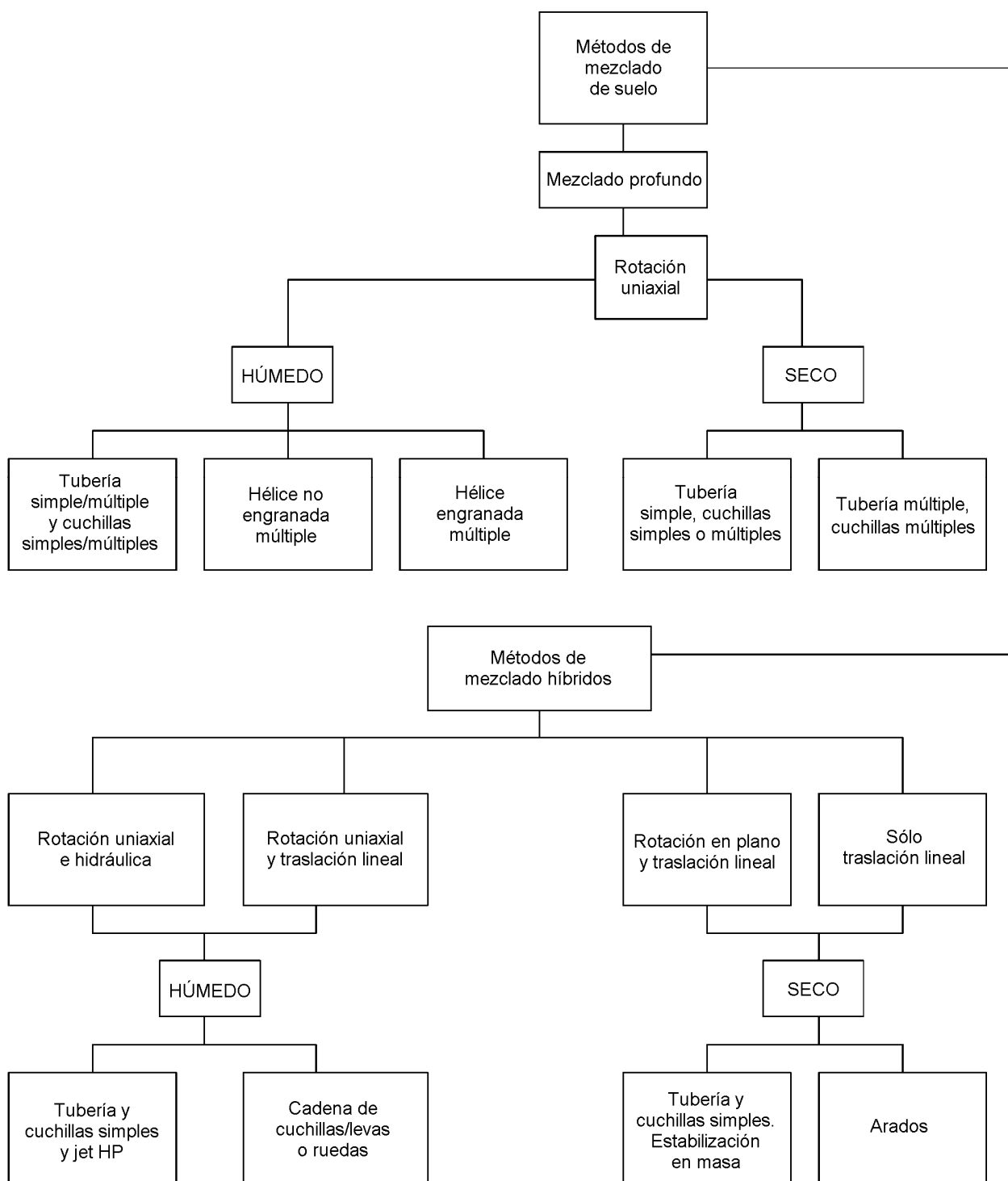


Figura A.1 – Clasificación general del equipamiento utilizado por los métodos de mezclado profundo incluidos en el Código y por los métodos de mezclado híbridos no incluidos

En el método seco el ligante es normalmente una mezcla de cemento y cal viva, o una combinación de cemento, cal, yeso, escoria de alto horno o ceniza de combustible pulverizada (PFA) en forma granular o en polvo. El aire se usa para alimentar (o incorporar) el ligante en el suelo. (El contenido de humedad del suelo debe ser $\geq 20\%$).

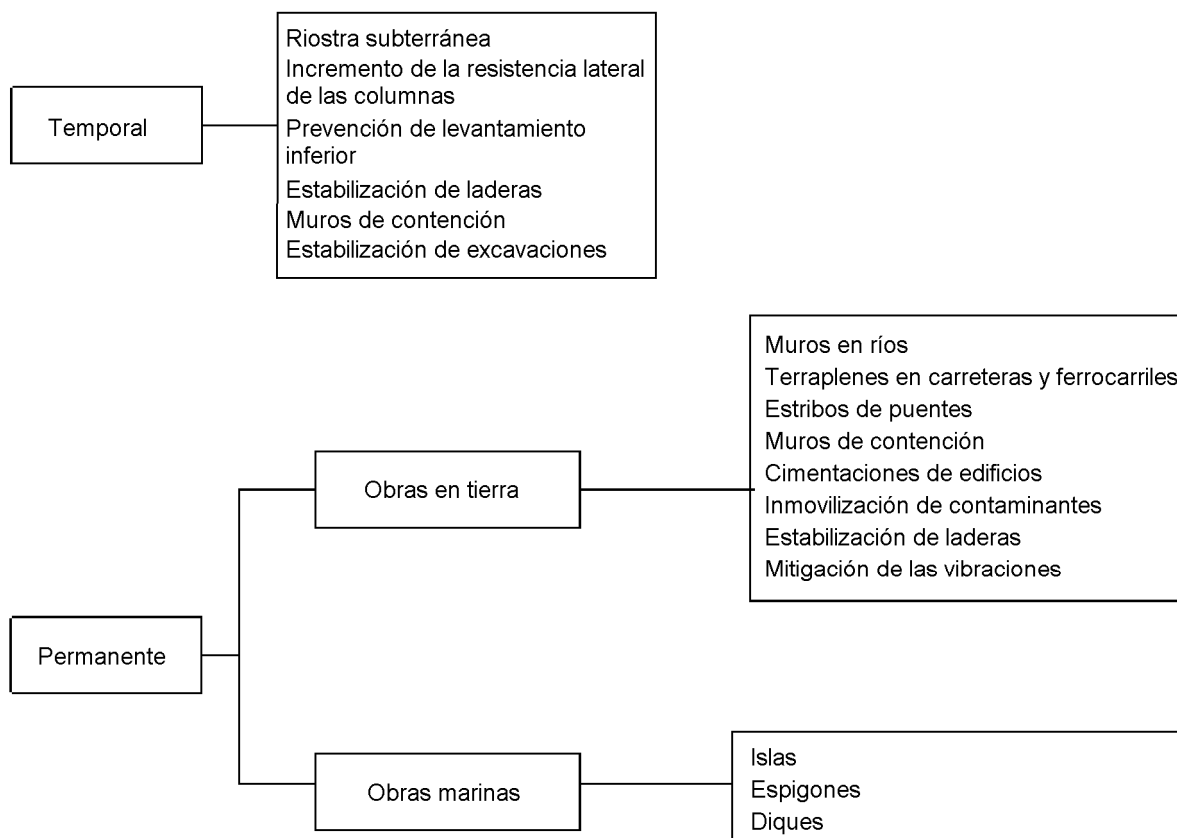


Figura A.2 – Aplicaciones del mezclado profundo

En el método húmedo el ligante más común es el cemento.

Fundamentalmente el método seco se usa para mejorar las características de los suelos cohesivos, mientras que el método húmedo se aplica también para mejorar las características de un material granular. Para ciertas aplicaciones, como la prevención de la licuefacción en suelos granulares sueltos, se ha utilizado el método seco.

La contaminación subterránea o riesgos que pueden afectar la ejecución del método, la seguridad de la obra o la eliminación del material excavado del emplazamiento pueden consistir en montones de residuos viejos, material de desecho industrial, productos de desecho químicos, etc. Los obstáculos, como rocas o raíces de árboles, pueden afectar la eficacia del mezclado profundo. Antes de que comiencen los trabajos de construcción, se tiene que asegurar la calidad prevista de las columnas. El proceso de ejecución de un proyecto de mezclado profundo sigue los principios mostrados en la figura A.3.

A.3.2 Método seco

A.3.2.1 Generalidades

Normalmente, el método seco se lleva a cabo de acuerdo con ciertos principios generales que se resumen en la figura A.4.

Como se puede ver en el diagrama de flujo, el ligante se introduce en el suelo en forma seca con la ayuda de aire comprimido. Principalmente existen dos técnicas de mezclado en seco: la técnica nórdica y la japonesa.

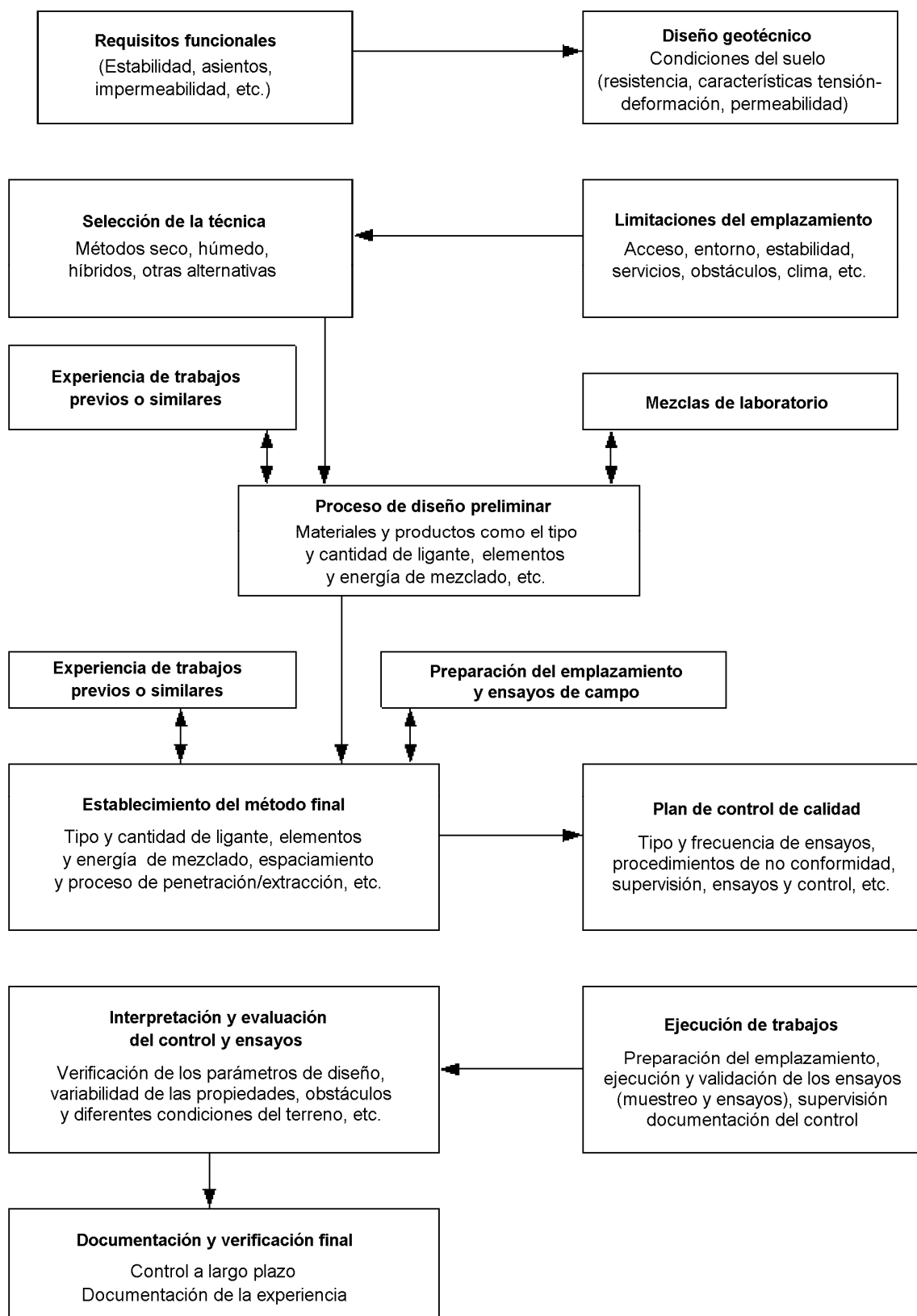


Figura A.3 – Principios de ejecución del mezclado profundo

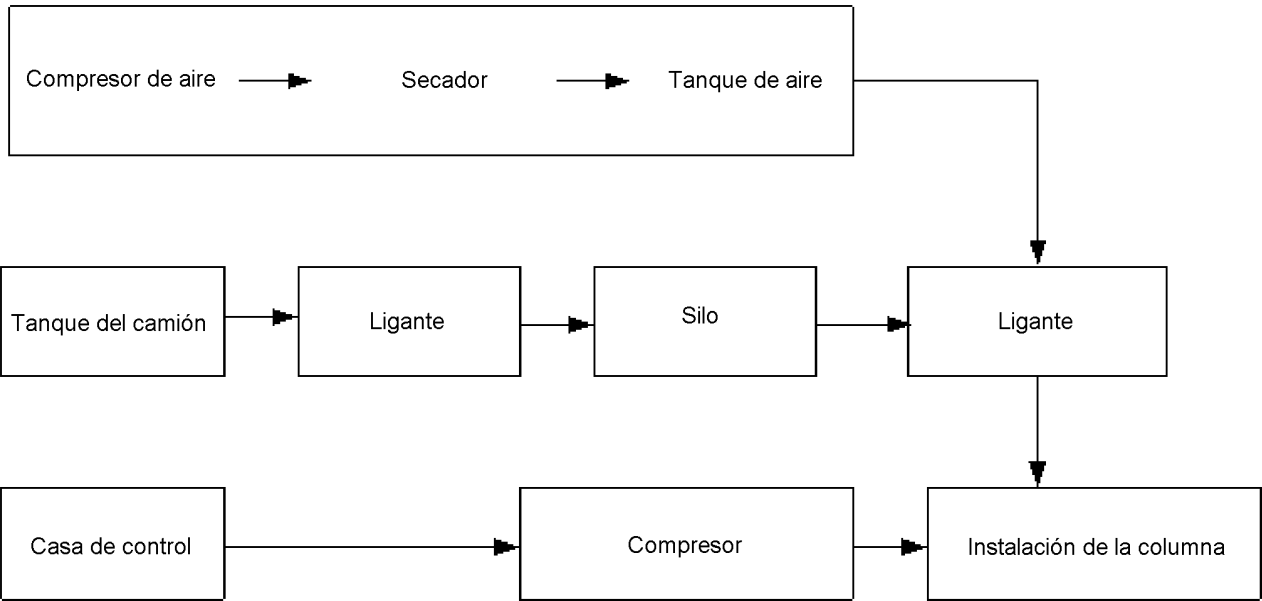


Figura A.4 – Diagrama de flujo para la ejecución del método de mezclado seco

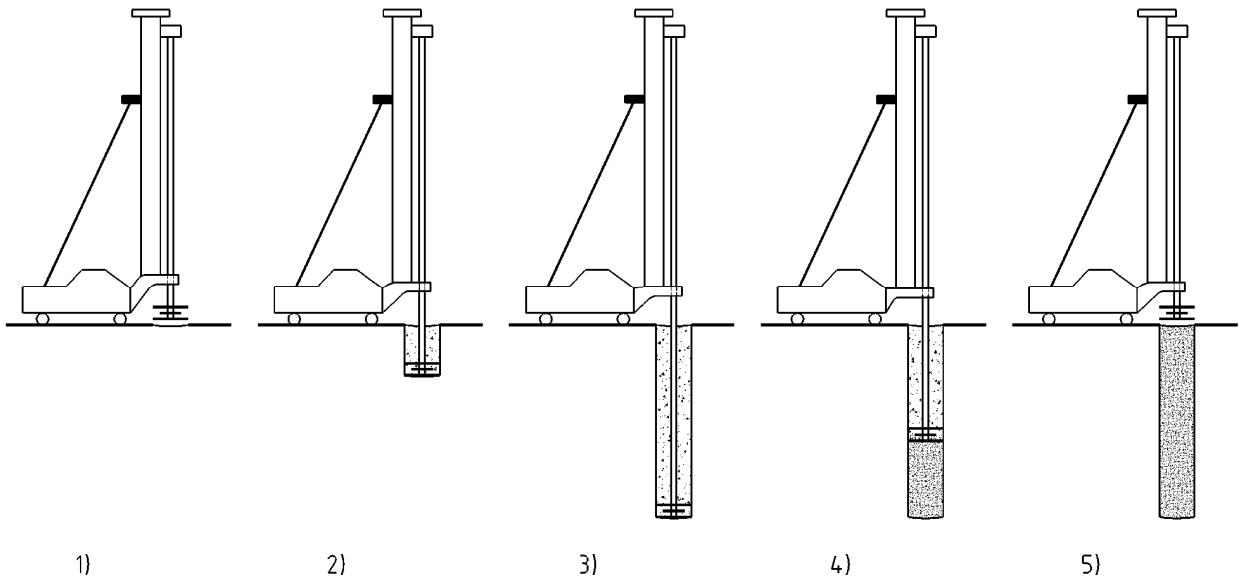


Figura A.5 – Secuencia de la instalación

La instalación se lleva a cabo de acuerdo con el siguiente procedimiento, de izquierda a derecha:

- 1) posicionamiento correcto del útil de mezclado;
- 2) la tubería del útil de mezclado penetra hasta la profundidad de tratamiento deseada, con la desagregación simultánea del suelo;
- 3) tras alcanzar la profundidad deseada, la tubería se retira y, al mismo tiempo, el ligante en forma de polvo o granular, se inyecta en el suelo;
- 4) el útil de mezclado rota en un plano horizontal y mezcla el suelo con el ligante;
- 5) columna terminada.

A.3.2.2 Método nórdico

Los equipos utilizados en los países nórdicos son capaces de ejecutar columnas hasta una profundidad de 25 m con un diámetro de columna normalmente de 0,6 m a 1,0 m. Las columnas se pueden inclinar hasta 70° con respecto a la vertical. Las máquinas tienen una tubería de mezclado con la salida de inyección situada en el útil de mezclado. La energía de mezclado y la cantidad de ligante se controlan, en algunos casos automáticamente, para conseguir que el suelo tratado sea uniforme.

El útil de mezclado se introduce hasta la profundidad final y se añade una cantidad de ligante predeterminada a través del tubo interior que tiene una abertura en el útil de mezclado (durante la fase de extracción). Durante la fase de extracción, el suelo y el ligante se mezclan girando continuamente el útil de mezclado. Si se requiere, las dos operaciones se pueden repetir en el mismo lugar.

La velocidad de rotación del útil de mezclado y la velocidad con la que se retira, se ajusta para producir un mezclado uniforme, suficiente para el propósito. La cantidad de trabajo de mezclado que supone producir una columna de mezclado en seco depende del tipo y cantidad de ligante y del tipo de suelo. Cuando se utiliza cemento como ligante comparado a cuando se usa cal únicamente, se requiere una cantidad de energía de mezclado mayor. Para contener el aire y el polvo se ha desarrollado un equipo especial.

A.3.2.3 Método japonés

Hay muchas variantes de máquinas que tienen tanto una como dos tuberías de mezclado. Cada tubería de mezclado de estas máquinas tiene varias cuchillas con un diámetro de 0,8 m a 1,3 m y son capaces de ejecutar columnas hasta 33 m de profundidad. El ligante, normalmente cemento en polvo, llega a la máquina de mezclado por medio de aire comprimido. Para evitar que se disperse el aire que sube del suelo, se instala un fuelle cubriendo la tubería. El útil de mezclado está compuesto de varias pilas de cuchillas mezcladoras para lograr la uniformidad de la columna tratada. Las salidas de inyección se colocan por encima y por debajo de las cuchillas en la tubería de mezclado. Una barra de acero fija la distancia entre las dos tuberías de mezclado. La barra y algunas cuchillas de mezclado adicionales que rotan libremente (sin estar guiadas o girando en sentido contrario), también funcionan para prevenir la rotación del suelo adherido a las cuchillas guiadas y a la tubería de mezclado. La presión del aire y la cantidad de ligante se controlan automáticamente para conseguir la homogeneidad de la columna tratada.

El ligante se inyecta durante la etapa de penetración o durante ambas etapas de penetración y extracción.

Tabla A.1 – Comparación de los métodos de mezclado seco japonés y nórdico

Equipo	Detalles	Método nórdico	Método japonés
Equipo de mezclado	Nº de tuberías o barras de mezclado	1	1 a 2
	Diámetro de los útiles de mezclado	0,4 m a 1,0 m	0,8 m a 1,3 m
	Profundidad máxima del tratamiento	25 m	33 m
	Posición de la tobera de inyección del ligante	En el par superior de cuchillas de mezclado	En la parte inferior de la tubería de mezclado y/o de las cuchillas de mezclado (simple o múltiple)
	Presión de inyección	Variable entre 200 kPa a 800 kPa	Máximo 300 kPa
Planta de mezclado	Capacidad de suministro	50 kg/min a 300 kg/min	50 kg/min a 200 kg/min

La tabla A.2 resume los valores de ejecución típicos de los métodos nórdico y japonés.

Tabla A.2 – Valores de ejecución típicos de los métodos de mezclado seco nórdico y japonés

Equipo de mezclado	Método nórdico	Método japonés
Velocidad de penetración de la tubería de mezclado	2,0 m/min a 6,0 m/min	1,0 m/min a 2,0 m/min
Velocidad de extracción de la tubería de mezclado	1,5 m/min a 6,0 m/min	0,7 m/min a 0,9 m/min
Velocidad de rotación de las cuchillas de mezclado	100 r/min a 200 r/min	24 r/min a 64 r/min
Número de rotación de las cuchillas ¹⁾	150 por m a 500 por m	≥ 274 por m
Cantidad de ligante inyectado	100 kg/m ³ a 250 kg/m ³	100 kg/m ³ a 300 kg/m ³
Velocidad de extracción (penetración)	10 mm/r a 30 mm/r	10 mm/r a 35 mm/r
Fase de inyección	Típicamente durante la extracción	Durante la penetración y/o extracción
<p>1) El número de rotación de las cuchillas significa el número total de cuchillas pasando durante 1 m de movimiento de la tubería de mezclado y se define por la ecuación $T = \sum M(N_d / V_d + N_u / V_u)$, donde T = número de rotación de las cuchillas (n/m), $\sum M$ = número total de cuchillas de mezclado, N_d = velocidad de rotación de las cuchillas durante la penetración (r/min), V_d = velocidad de penetración de la cuchilla de mezclado (m/min), N_u = velocidad de rotación de las cuchillas durante la extracción (r/min), V_u = velocidad de la cuchilla de mezclado durante la extracción (m/min). Si la inyección se realiza solo durante la extracción, entonces N_d es igual a cero.</p>		

A.3.3 Método húmedo

A.3.3.1 Generalidades

El método húmedo se lleva a cabo de acuerdo a unos principios generales, que se pueden resumir como muestra la figura A.6.

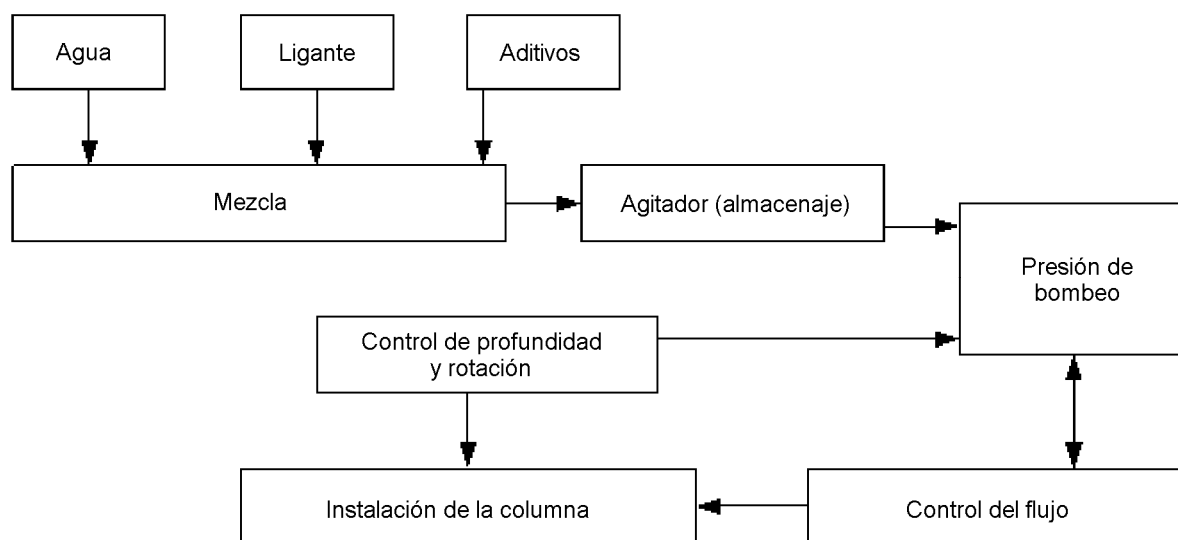


Figura A.6 – Diagrama de flujo para la ejecución del método de mezclado húmedo

En el método de mezclado húmedo el ligante es normalmente lechada. Cuando sea necesario, a la lechada se le puede añadir filler (arena y aditivos). La cantidad específica de lechada a añadir puede variar con la profundidad. En máquinas con la salida debajo del útil de mezclado, no es necesario añadir la lechada en la fase de extracción.

Mientras que las barrenas helicoidales pueden ser suficientes para suelos predominantemente granulares, el incremento de la calidad y finura requiere útiles de mezclado más complicados, provistos de cuchillos de corte y mezclado de diferentes formas y disposiciones. Los controladores de rotación, que giran la tubería, necesitan tener suficiente potencia para destruir la matriz del suelo, y mezclarlo íntimamente con la lechada.

Dependiendo del tipo de suelo y de lechada, se crea una mezcla de tipo mortero que se endurece durante el proceso de hidratación. La resistencia y permeabilidad dependen fuertemente de la composición y características del suelo (contenido en finos, orgánico, tipo de arcillas, forma de los granos, granulometría, dureza de los granos), del tipo y cantidad de ligante y del procedimiento de mezclado.

El proceso de mezclado húmedo puede interrumpirse siempre que la lechada no haya empezado a endurecerse, y que el útil de mezclado empiece de nuevo por lo menos 0,5 m en el suelo ya tratado.

Las bombas para el transporte de la lechada hacia la salida necesitan tener suficiente capacidad (velocidad de reparto y presión) para repartir de modo seguro la cantidad de lechada diseñada.

El mezclado húmedo es común en el centro y sur de Europa, en Norteamérica y en Japón.

A.3.3.2 Método europeo

En Europa, dependiendo de las aplicaciones y condiciones del terreno, la instalación de columnas de mezclado por método húmedo es realizado por medio de barrenas helicoidales (continuas o fraccionadas, individuales o múltiples) o por medio de cuchillas.

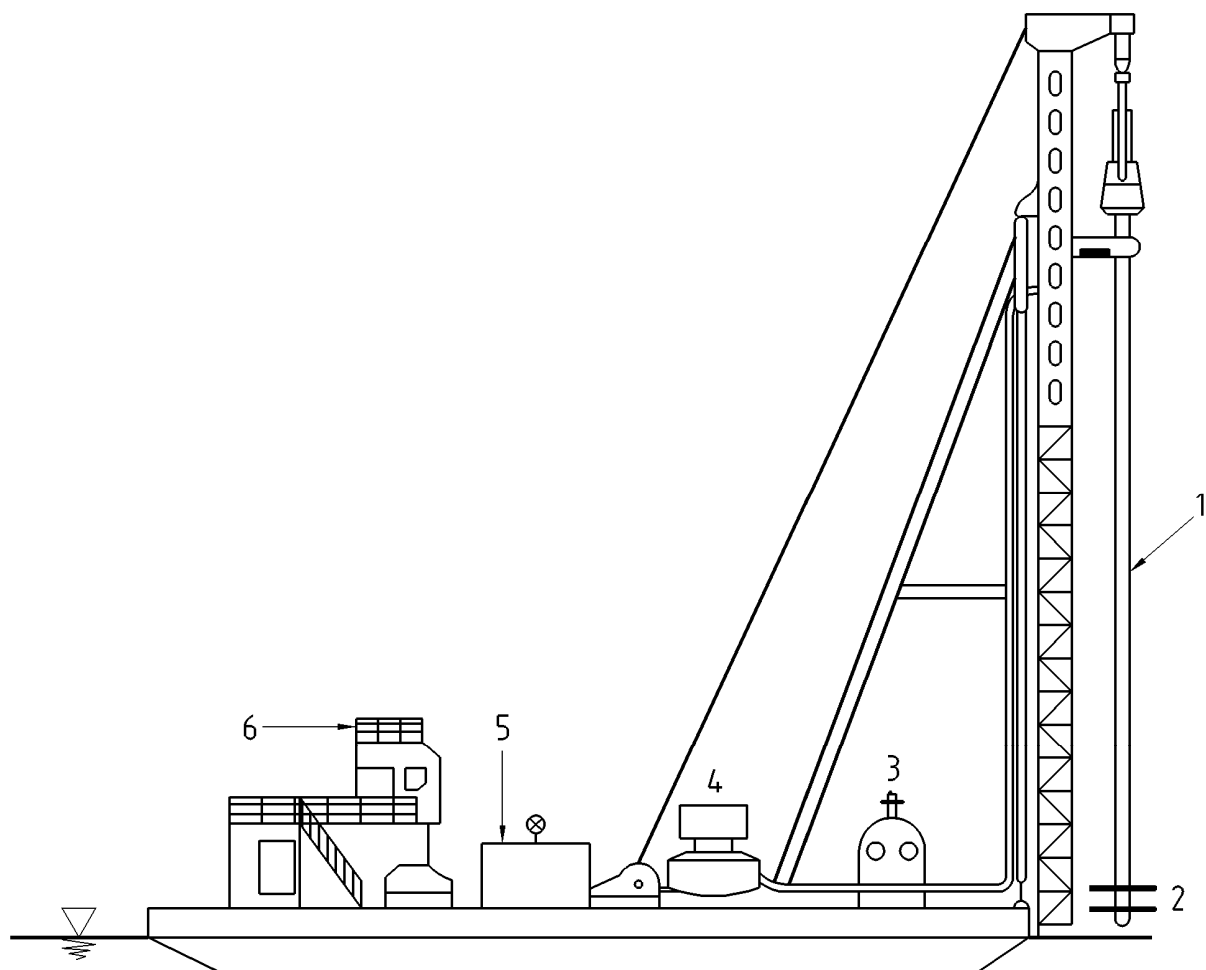
En muros de refuerzo de suelos, las barras, los armazones o las vigas de acero pueden instalarse en los elementos y columnas recién mezclados. Puede requerirse la ayuda de un vibrador para el proceso de instalación.

A.3.3.3 Método japonés

En Japón, el método húmedo se ha utilizado frecuentemente para construcciones tanto terrestres como marinas [5]. En construcciones terrestres, se usan máquinas con una, dos o cuatro tuberías de mezclado. El útil de mezclado está compuesto por varias pilas de cuchillas mezcladoras para lograr la uniformidad de la columna tratada. Una barra de acero fija la distancia entre las dos tuberías de mezclado. La barra y a veces algunas cuchillas de mezclado adicionales que rotan libremente (sin estar guiadas o contrapeadas), funcionan para prevenir la rotación del suelo adherido a las cuchillas y tubería de mezclado guiadas.

El número de rotación de las cuchillas y la cantidad de ligante están controlados automáticamente para conseguir uniformidad en la columna tratada. La máquina tiene varias cuchillas de mezclado con un diámetro de 1,0 m a 1,6 m, y capacidad para instalar columnas a una profundidad máxima de 48 m. La tubería tiene varias cuchillas de mezclado a diferentes niveles.

En construcciones marinas, se usan grandes embarcaciones de ejecución frecuentemente para el tratamiento rápido de considerables volúmenes de suelo, véase la figura A.7. En la embarcación están instaladas una máquina mezcladora, una planta de mezclado, tanques de almacenamiento y una cabina de control. Las máquinas para trabajos marinos tienen habitualmente más de dos tuberías de mezclado. Las máquinas de mezclado profundo disponibles actualmente en Japón son capaces de construir columnas con una sección transversal de 1,5 m² a 6,9 m², hasta una profundidad máxima de 70 m desde el nivel del mar.



Leyenda

- 1 Barras de perforación/mezclado
- 2 Cuchillas de mezclado
- 3 Generador
- 4 Bomba de lechada
- 5 Planta de agente estabilizador
- 6 Sala de mando

Figura A.7 – Embarcación japonesa para ejecución de mezclado profundo marino

Las condiciones típicas de mezclado se muestran en las tablas A.3 y A.4.

Tabla A.3 – Comparación de los métodos de mezclado húmedo europeo y japonés

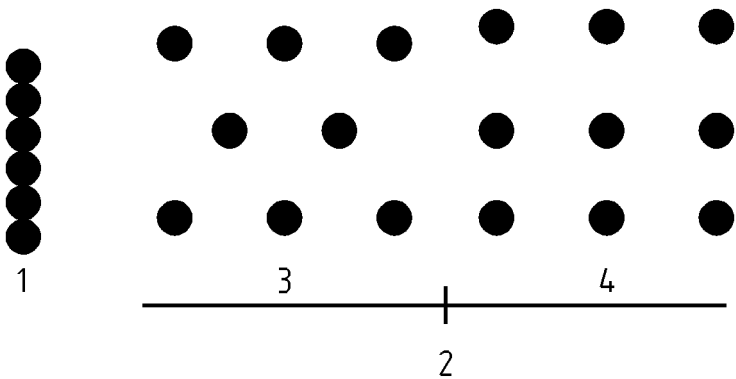
Equipo	Detalles	Europeo, en tierra	Japonés, en tierra	Japonés, en mar
Equipo de mezclado	Nº de tuberías o barras de mezclado	1-3	1-4	2-8
	Diámetro de los útiles de mezclado	0,4 m a 0,9 m	1,0 m a 1,6 m	1,0 m a 1,6 m
	Profundidad máxima de tratamiento	25 m	48 m	70 m por debajo del nivel del mar
	Posición de la salida de ligante	Barra de perforación	Barra de perforación y cuchilla de mezclado	Barra de perforación y cuchilla de mezclado
	Presión de inyección	500 kPa a 1 000 kPa	300 kPa a 600 kPa	300 kPa a 800 kPa
Planta dosificadora	Cantidad de lechada almacenada	3 m ³ a 6 m ³	3 m ³	3 m ³ a 20 m ³
	Capacidad de suministro	0,08 m ³ /min a 0,25 m ³ /min	0,25 m ³ /min a 1 m ³ /min	0,5 m ³ /min a 2 m ³ /min
Silo	Capacidad máxima		30 t	50 t a 1 600 t

Tabla A.4 – Valores típicos de los parámetros de ejecución en los métodos de mezclado húmedo europeo y japonés

Equipo de mezclado	Europeo, en tierra	Japonés, en tierra	Japonés, en mar
Velocidad de penetración de la tubería de mezclado	0,5 m/min a 1,5 m/min	1,0 m/min	1,0 m/min
Velocidad de extracción de la tubería de mezclado	3,0 m/min a 5,0 m/min	0,7 m/min a 1,0 m/min	1,0 m/min
Velocidad de rotación de las cuchillas de mezclado	25 r/min a 50 r/min	20 r/min a 40 r/min	20 r/min a 60 r/min
Nº de rotación de las cuchillas	Mayoritariamente hélice continua	350 por metro	350 por metro
Cantidad de ligante inyectado	80 kg/m ³ a 450 kg/m ³	70 kg/m ³ a 300 kg/m ³	70 kg/m ³ a 300 kg/m ³
Fase de inyección	Durante la penetración y/o extracción	Durante la penetración y/o extracción	Durante la penetración y/o extracción

A.3.4 Diseños de instalación

Se usan diferentes modelos de instalación de columnas dependiendo del propósito el mezclado profundo, véanse las figuras A.8 a A.11. Si el principal objetivo es reducir los asentamientos, las columnas se colocan normalmente en una plantilla triangular equilátera o cuadrada. Por otro lado, si el propósito es asegurar la estabilidad de, por ejemplo, taludes o terraplenes, las columnas se suelen situar formando pantallas perpendiculares a la superficie de rotura esperada. El solapamiento de columnas es particularmente importante cuando las columnas se ejecutan con función de contención. El solapamiento se usa normalmente en la ejecución tipo bloque, tipo pantalla y tipo cuadrícula o celda. Un ejemplo de la secuencia de ejecución de columnas solapadas para crear pantallas entrelazadas se muestra en la figura A.12, ejecutando las columnas en forma de U, elíptica o circular, formando barreras efectivas contra las acciones horizontales de diferentes tipos (presión de tierras, superficies de deslizamiento, etc.).



Leyenda

- 1 Fila
- 2 Grupo
- 3 Triangular
- 4 Cuadrado

Figura A.8 – Ejemplos de diseños de tratamiento del método seco

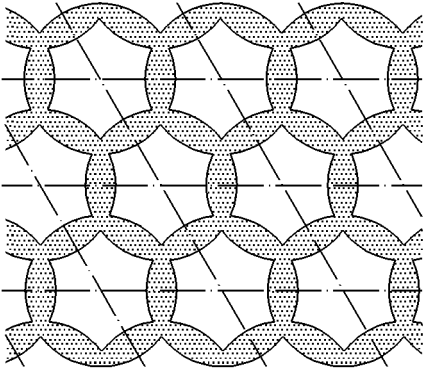
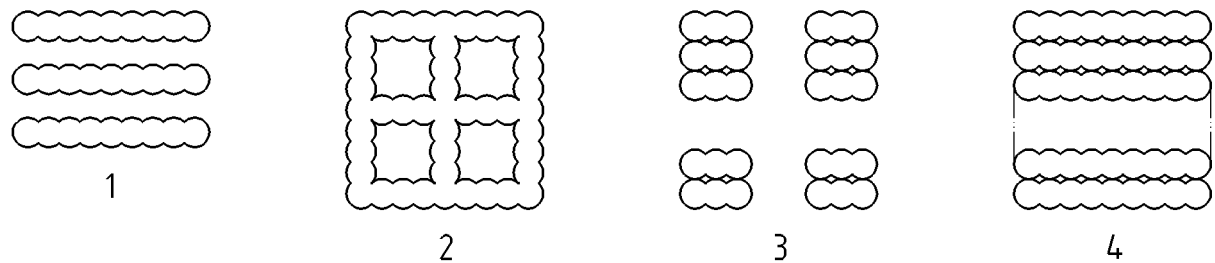
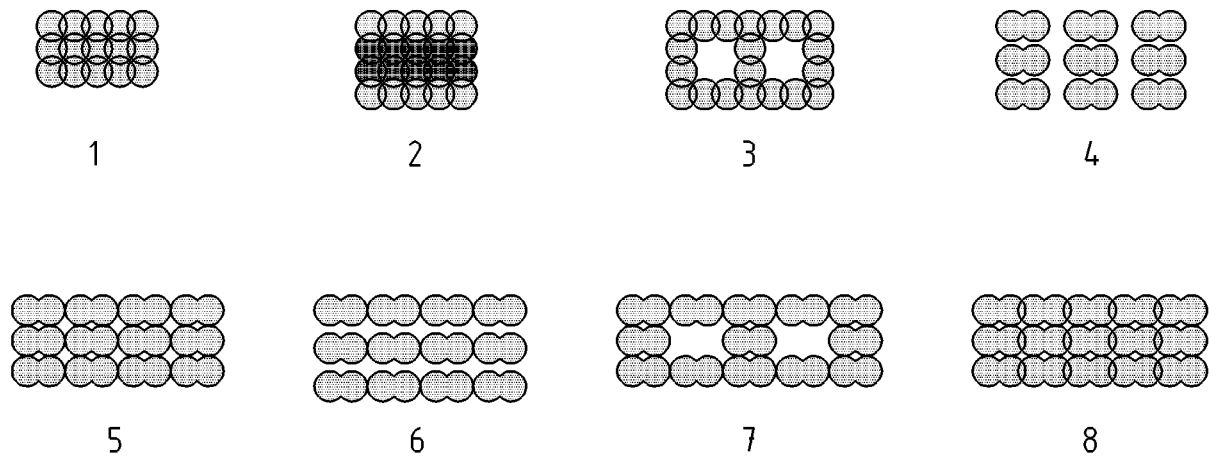


Figura A.9 – Modelo de columnas solapadas tipo bloque del método seco



- Leyenda
- 1 Tipo pantalla
 - 2 Tipo cuadrícula o celda
 - 3 Tipo bloque
 - 4 Tipo área

Figura A.10 – Ejemplos de diseños de tratamiento del método húmedo en tierra



- Leyenda
- | | |
|---------------------------|-------------------------------|
| 1 Tipo bloque | 5 Columnas tangentes |
| 2 Tipo pantalla | 6 Pantallas tangentes |
| 3 Tipo cuadrícula o celda | 7 Cuadrícula o celda tangente |
| 4 Tipo columna | 8 Bloque tangente |

Figura A.11 – Ejemplos de modelos de tratamiento en condiciones marinas

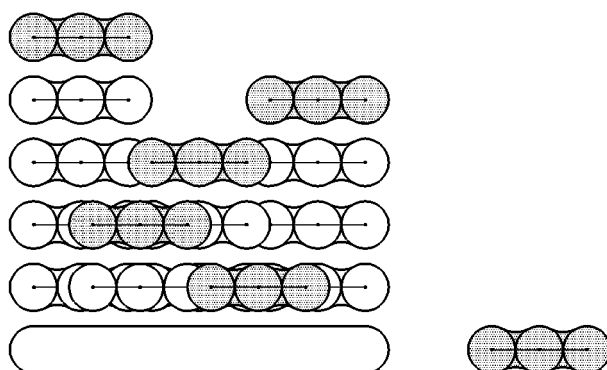


Figura A.12 – Ejemplo de una pantalla de columnas secantes ejecutada con el método húmedo, mostrando la secuencia de ejecución

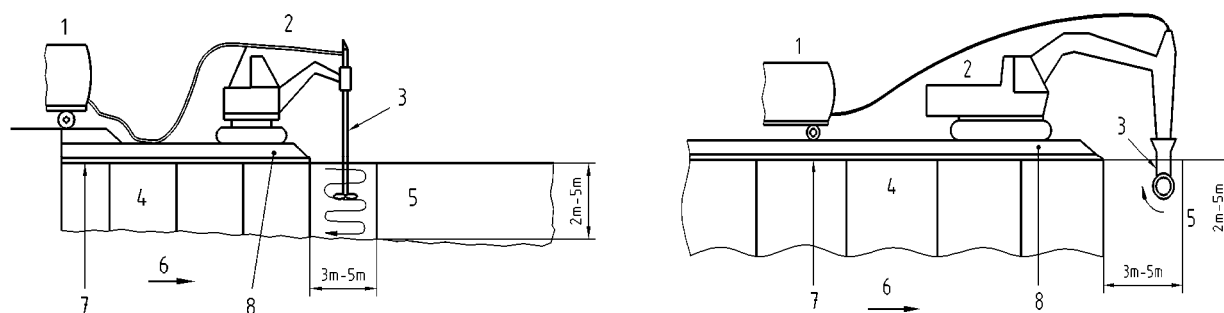
A.3.5 Métodos híbridos

A.3.5.1 Generalidades

Hay varios métodos que usan técnicas que recuerdan al mezclado profundo. Estos métodos, que en este contexto se denominan métodos híbridos, están continuamente en desarrollo para tratar de resolver problemas de condiciones de terreno y cimentaciones particulares. Típicamente combinan el mezclado hidráulico y mecánico. A continuación se describen algunos de los métodos híbridos que han sido utilizados y aceptados entre los constructores, como la estabilización en masa, *jet-grouting* combinado con el mezclado mecánico, etc.

A.3.5.2 Estabilización en masa

En los casos en los que las condiciones del suelo son muy malas, por ejemplo en depósitos de turbas, fangos o arcillas orgánicas y arcillas blandas, se puede requerir la estabilización en masa, en la cual se trata toda la masa de suelo hasta una profundidad de 2 m a 3 m. La máxima profundidad alcanzada con el tratamiento es de 5 m. Las máquinas de estabilización en masa se diferencian esencialmente de las máquinas de estabilización por columnas [7]. El ligante alimenta la cabeza mezcladora mientras que el mezclador rota y simultáneamente se mueve vertical y horizontalmente. Principalmente, la máquina de estabilización en masa es una excavadora convencional con un útil de mezclado de estabilización en masa. En la figura A.13 se muestran dos tipos de tecnología de estabilización en masa.



Leyenda

- 1 Tanque con estabilizador + sistema dosificador
- 2 Excavadora
- 3 Útil de mezclado
- 4 Arcilla blanda, fango o turba estabilizada en masa
- 5 Arcilla blanda, fango o turba
- 6 Dirección de estabilización en masa
- 7 Geotextil de refuerzo
- 8 Terraplén (plataforma de trabajo y precarga)

Figura A.13 – Dos tipos de estabilización en masa

A.3.5.3 Jet-grouting combinado con el mezclado mecánico

Se ha desarrollado un nuevo método que combina la ventaja del mezclado mecánico con el *jet grouting*. Estas máquinas tienen una tubería mezcladora al igual que unas toberas de *jet*, capaces de crear columnas más grandes que el diámetro del útil de mezclado. El *jet*, al remover, hace que sea fácil de crear el solapamiento de las columnas tratadas. El diámetro de las columnas puede variar con el *jet* o sin él. La técnica del *jet grouting* se describe en detalle en la Norma EN 12716, [12] y [22].

A.3.5.4 El método CDM-LODIC

En Japón se ha desarrollado un nuevo método de mezclado profundo con bajo desplazamiento con el fin de minimizar los desplazamientos laterales durante la construcción. Por lo tanto, se instala en la parte alta de la tubería mezcladora una barrena helicoidal para quitar el suelo de la superficie del terreno. Se puede reducir el desplazamiento del terreno adyacente o de estructuras cercanas sacando un volumen de suelo igual al volumen inyectado de lechada [12] y [22].

A.3.5.5 Método de Corte-Mezcla-Inyección

El método de Corte-Mezcla-Inyección (Fräs-Mischinjektionsverfahren) es un método alemán mediante el cual el suelo suelto se puede mezclar con lechada de cemento y homogeneizar franjas en profundidad por medio de una máquina especial llamada Fräsmaschine en alemán. La máquina FMI (iniciales del nombre del método en alemán), con capacidades todoterreno y montadas sobre orugas, consta de una cabina, un tren de potencia y un árbol de corte (*cutting tree*). El árbol de corte, en el que las cuchillas de corte giran por medio de dos sistemas de cadenas, se conduce hacia la cabina. Se coloca detrás de la máquina, está inclinado hasta 80° y se puede posicionar perpendicular a la dirección de la operación. El suelo no se excava debido a la especial configuración de las cuchillas, pero se mezcla *in situ* con la lechada de cemento. Se controlan por ordenador la velocidad de movimiento, la profundidad de corte y el ritmo de inyección de cemento.

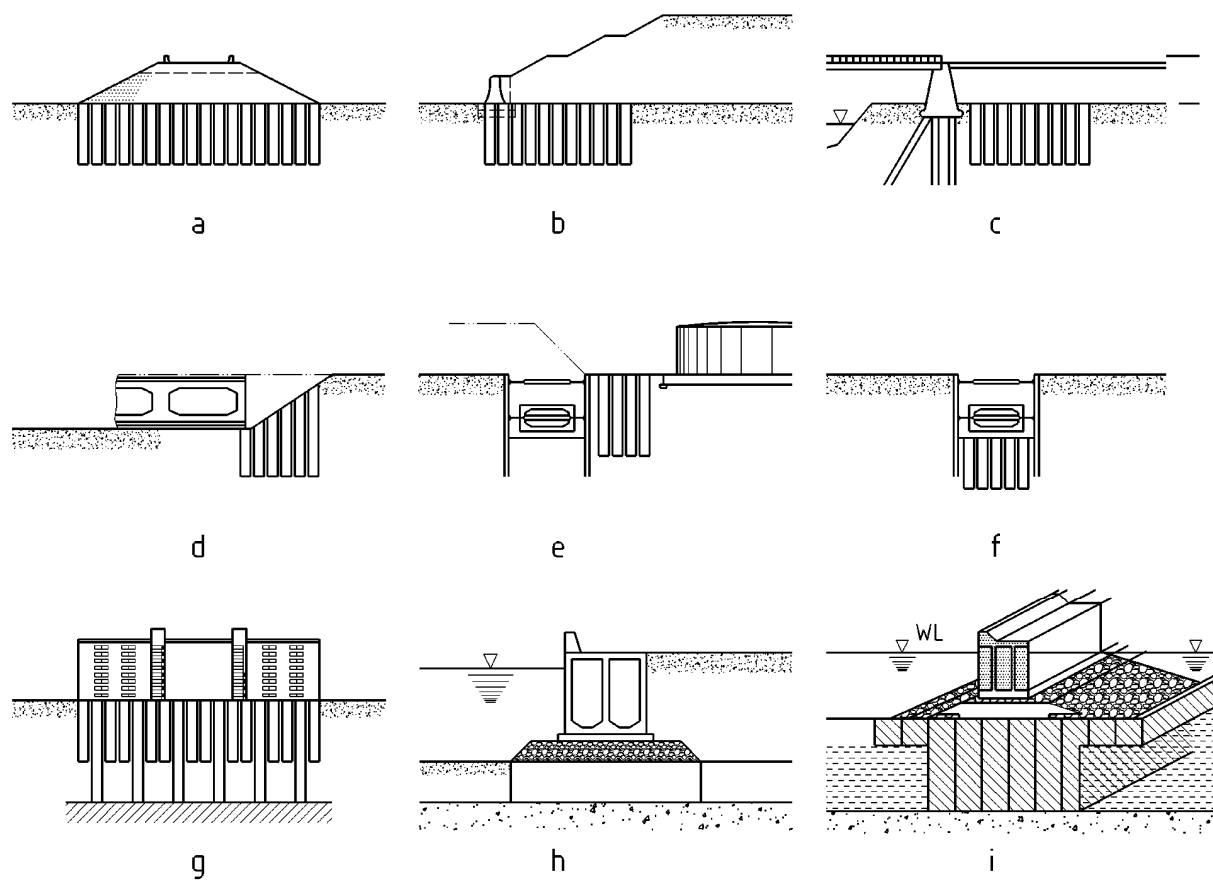
El árbol de corte está provisto de tubos de inyección y de salidas de la inyección. La lechada de cemento se mezcla en un sitio aparte y se distribuye al árbol de corte a través de la tubería de inyección. El aporte medio de lechada es de 100 m³/h. El método permite tratar el terreno a una profundidad máxima de 9 m. La anchura del corte es de 1,0 m a una profundidad de 6 m y de 0,5 m a una profundidad de 9 m [20].

A.4 Consideraciones constructivas

Se necesita tener en cuenta la posibilidad de que la ejecución del mezclado profundo pueda causar desplazamientos en el terreno, afectando las condiciones de estabilidad de laderas o causando problemas con estructuras sensibles. En la figura A.14 se muestran varios ejemplos del uso del mezclado profundo con el fin de reducir el asiento y mejorar la estabilidad, para prevenir efectos adversos en estructuras adyacentes y como muros de contención en excavaciones profundas.

Las reacciones químicas entre el suelo y el ligante generan un incremento de la temperatura del terreno que continúa hasta que estas reacciones químicas terminan.

Se necesita llevar a cabo la operación del equipo de mezclado con las debidas consideraciones a las restricciones de seguridad. La reacción entre la cal viva y la humedad del aire o agua es altamente exotérmica. La expansión de volumen que rápidamente resulta y la generación de calor pueden conducir a un fuego o explosión. Es cáustica y tóxica y como precaución se deberían usar gafas y guantes protectores y una máscara. También es cáustico el cemento.



Leyenda

- a Estabilización y disminución de asientos en terraplenes de carreteras
- b Estabilización de terraplenes de gran altura
- c Disminución de asientos diferenciales en estribos de puentes
- d Estabilización de los taludes de excavaciones
- e Reducción de las afecciones por construcciones adyacentes
- f Reducción del empuje de tierras y el levantamiento de fondo en excavaciones entibadas
- g Aumento de la resistencia por fuste en cimentaciones pilotadas
- h Aumento de la capacidad portante en muelles de cajones
- i Aumento de la capacidad portante en diques portuarios

Figura A.14 – Diferentes aplicaciones del mezclado profundo. Terashi (1997) [23]

ANEXO B (Informativo)**ASPECTOS DE DISEÑO****B.1 Generalidades****B.1.1 Objeto y campo de aplicación**

Los aspectos de diseño tratados en este anexo se refieren al desarrollo del proceso de diseño, la elección del ligante, ensayos de laboratorio y de campo y la influencia en el diseño de la estructura y el comportamiento de las columnas. Este anexo no trata los principios o métodos de diseño geotécnicos en detalle, para los que se debería referir a la Norma EN 1997-1.

Como el mezclado profundo es un proceso de mejora del terreno, el diseño engloba dos aspectos distintos:

- el diseño funcional describe la forma en la que los suelos tratado y no tratado interaccionan para producir el comportamiento global requerido;
- el proceso de diseño describe los medios por los cuales se obtienen las características de comportamiento requeridas del suelo tratado al seleccionar y modificar los parámetros del proceso de control.

B.1.2 Aplicación

El objeto y campo de aplicación del método de mezclado profundo es tratar y resolver problemas asociados a los aspectos siguientes:

- reducción de asientos (por ejemplo de terraplenes y estructuras);
- mejora de la estabilidad (estructuras y terraplenes);
- sostenimiento de laderas y excavaciones;
- mejora de la resistencia y reducción del asiento y el movimiento lateral debido a cargas dinámicas y cíclicas (por ejemplo en zonas sísmicas);
- inmovilización y/o confinamiento de depósitos de residuos o suelos contaminados;
- construcción de estructuras de contención;
- reducción de las vibraciones y sus efectos en las estructuras y seres humanos.

B.2 Principios de diseño

El terreno tratado con el mezclado profundo necesita que se diseñe y se ejecute de tal modo que la estructura soportada, durante su vida útil, y con el grado de fiabilidad apropiado y coste efectivo, se mantenga adecuado para el uso que se le pretende dar y para soportar todas las acciones e influencias que son susceptibles de ocurrir durante la ejecución y el uso. Esto requiere que satisfaga los estados límite último y de servicio.

Los requisitos para los estados límite último y de servicio los debe especificar el cliente. El diseño debe estar de acuerdo con los requisitos expuestos en la Norma EN 1997-1.

El denominado diseño iterativo, basado en un seguimiento de los resultados obtenidos por varios métodos de ensayo, es una parte importante del diseño. Aquí la mayor atención se centra en aquellos factores que son importantes para la ejecución y el propósito del mezclado profundo.

El diseño se hace para la combinación más desfavorable de cargas que pueden ocurrir durante la construcción y el servicio.

Los procesos de mezclado profundo pueden suponer una reducción de la resistencia de rotura a corto plazo como consecuencia del exceso de presión intersticial inducido y el desplazamiento del suelo. Las columnas realizadas en el emplazamiento se deberían disponer de un modo que se eviten los posibles planos de debilidad en algunas columnas puedan tener una influencia negativa en la estabilidad. En el análisis de estabilidad es importante tener en cuenta las diferencias en la relación tensión-deformación entre el suelo tratado y sin tratar. Para el sostenimiento de excavaciones, los parámetros más importantes son la resistencia a compresión del suelo tratado y el arqueado. La figura B.1 indica el proceso iterativo combinando el diseño funcional y el proceso de diseño.

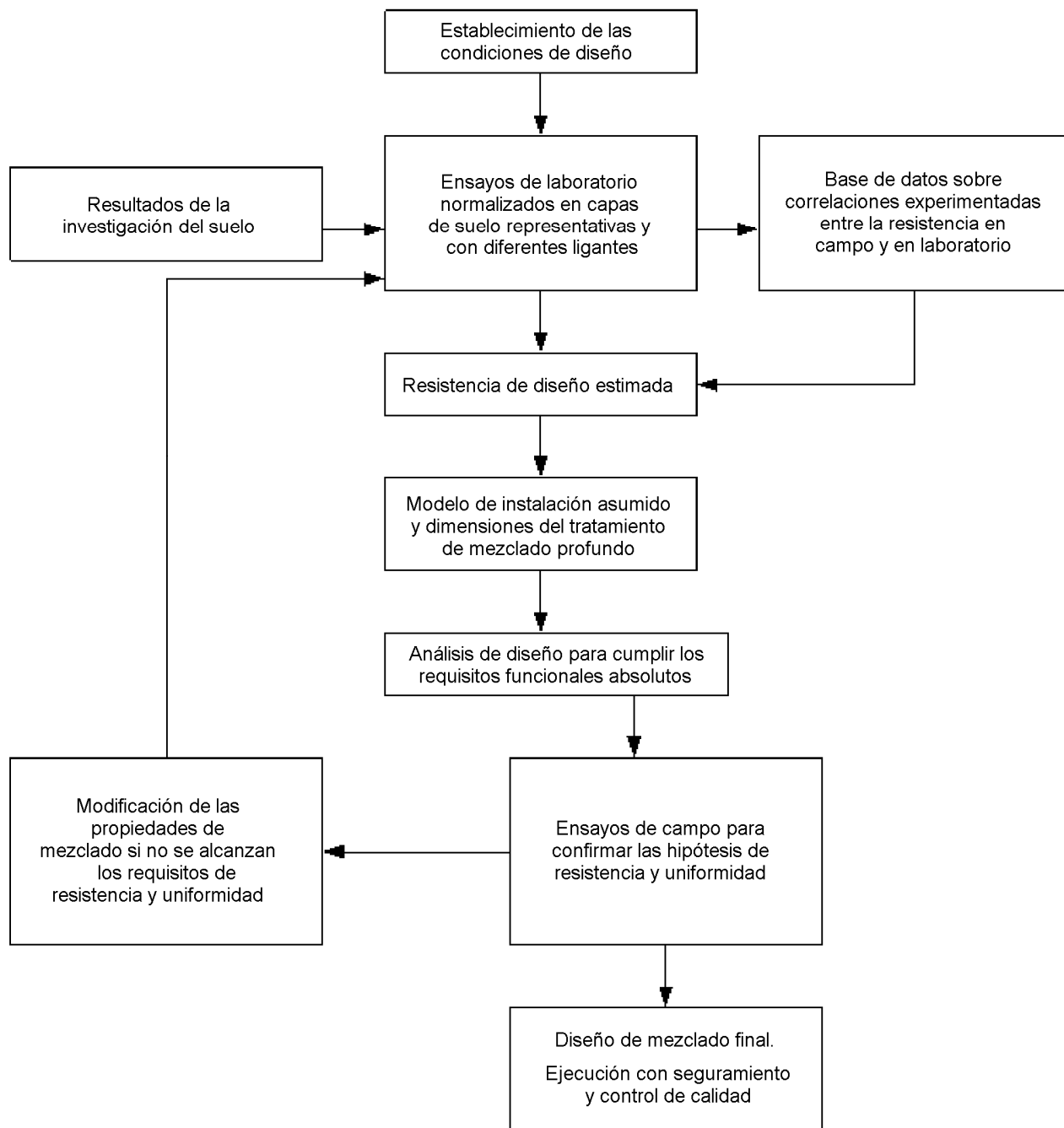


Figura B.1 – Proceso de diseño iterativo, incluyendo ensayos de laboratorio, diseño funcional, ensayos de campo y procesos de diseño

B.3 Proceso de ejecución del mezclado profundo

El fin de los ensayos de laboratorio normalizados (ensayos de mezclado en laboratorio) es proporcionar información sobre el tipo de ligante y la dosificación apropiados para la obra real. Los ensayos deberían incluir cada capa de suelo representativa. En muchos casos hay una diferencia entre la resistencia de laboratorio y de campo. El proceso de diseño preliminar se basa en los resultados de los ensayos de laboratorio, en bases de datos e información de experiencias similares como se muestra en la figura B.1. Antes de comenzar la construcción, se construyen columnas de prueba de mezclado profundo sobre las que se realizan ensayos de campo para verificar que la dosificación, el tipo de ligante, la energía de mezclado, la resistencia requerida y la uniformidad son apropiados. En caso de que los ensayos de campo no satisfagan los requisitos del diseño, se deberá reconsiderar el diseño funcional y de proceso.

B.4 Elección del ligante

Los ligantes utilizados en el método seco son generalmente cemento o una mezcla de cal y cemento; en el método húmedo se utiliza cemento. La elección del ligante es un aspecto crítico del mezclado profundo, que depende en gran parte de las condiciones del suelo y del fin del mezclado profundo. El ensayo de los ligantes junto con el suelo a tratar es normalmente un requisito esencial de cualquier proyecto de mezclado profundo. En la tabla B.1 se muestra un resumen de los ligantes más comunes.

Tabla B.1 – Ligantes usuales en el método seco

Tipo de suelo	Ligante adecuado
Arcillas	Cal o cal/cemento
Arcillas sensitivas	Cal o cal/cemento
Arcillas orgánicas y fangos	Cal/cemento o cemento/escoria granulada de alto horno o cal/yeso
Turbas	Cemento o cemento/escoria granulada de alto horno o cal/yeso/cemento
Yesos	Cemento o cemento/escoria granulada de alto horno
Limos	Cal o cal/cemento

El ligante que se utiliza en el método húmedo es cemento en la mayoría de los casos. Se pueden utilizar ligantes especialmente preparados para suelos altamente orgánicos o suelos extremadamente flojos con un alto contenido de agua. Se pueden utilizar mezclas de cenizas volante, yeso y cemento en los casos en los que se prefiera una resistencia baja del suelo tratado. La bentonita se usa frecuentemente para mejorar la reología y estabilizar las mezclas de lechada.

B.5 Ensayos

B.5.1 Generalidades

El método de ensayo utilizado se tiene que adaptar para el fin del mezclado profundo. Así, para la reducción de asentamientos, es de principal interés el valor del módulo de elasticidad, mientras que el valor de la resistencia de las columnas es de mayor interés para la mejora de la estabilidad y la eliminación del riesgo de rotura. En cuanto a la inmovilización y/o confinamiento de depósitos de residuos o suelos contaminados, los factores determinantes son la contención, el solapamiento y la baja permeabilidad de las columnas.

B.5.2 Ensayos de laboratorio

B.5.2.1 Generalidades

Los ensayos de laboratorio representan uno de los medios utilizados para analizar las posibilidades de tratamiento del suelo real y para comprobar el resultado del mezclado profundo. Por un lado incluyen muestras de laboratorio de suelo mezclado y por otro lado, muestras a varias profundidades de las columnas ejecutadas.

B.5.2.2 Muestras de laboratorio

Las muestras de laboratorio del suelo mezclado ofrecen la posibilidad de estudiar qué cantidad de ligante, que tipo de ligante o combinación de ligante/filler/aditivos, qué factor de ligante y relación agua/ligante se requiere para estabilizar el suelo para el fin requerido.

Para investigar en el laboratorio las muestras de suelo/ligante, se dan referencias a los siguientes procedimientos incluidos en la Guía de Diseño del punto de la bibliografía [6]:

- 1) procedimiento de laboratorio para la preparación y almacenamiento de muestras de suelo estabilizado con ligantes para aplicaciones del Mezclado Profundo y Columnas;
- 2) procedimiento de laboratorio para la preparación y almacenamiento de muestras de suelo (especialmente turba) estabilizado con cal y materiales cementosos para aplicaciones de estabilización en masa.

NOTA El procedimiento de laboratorio para la preparación y almacenamiento de muestras de suelo para los métodos seco y húmedo japonés ha sido normalizado por la Sociedad Geotécnica de Japón.

Es muy incierta la correlación entre las propiedades resistentes de las muestras de laboratorio y las propiedades correspondientes a las condiciones de campo. Si se dispone de una amplia experiencia de la correlación entre las características resistentes de las muestras de laboratorio y de las correspondientes características de las columnas ejecutadas en el terreno de un origen geológico igual al de las muestras de laboratorio, se puede aplicar un coeficiente de correlación conservador. Debería utilizarse, al igual que en el objeto de referencia, el mismo tipo de útil de mezclado, ligante y contenido de ligante.

B.5.2.3 Testigos

Se pueden tomar probetas por medio de un equipo de perforación a rotación, con recuperación de testigo. Los testigos se pueden usar para el estudio de las características de deformación, resistencia y uniformidad. La elección de la técnica para testificar y el diámetro de la probeta depende enormemente de la resistencia y la granulometría del suelo tratado. Se recomiendan tomamuestras de tubo triple para columnas en suelos blandos. El número de probetas depende del tamaño y/o complejidad del proyecto. Se recomienda un mínimo de tres probetas en una obra. La toma de muestras debería extenderse a toda la profundidad del tratamiento. Fundamentalmente, el rango de la resistencia que se gana en el método seco y el método húmedo es diferente. Está afectado por el contenido de humedad y las características de hidratación de los ligantes. La temperatura tiene una influencia significativa en el incremento de la resistencia. La hidratación del ligante incrementa la temperatura del suelo y está influido por varios parámetros como el tipo de ligante, el factor/contenido de ligante y el volumen de suelo tratado. La alteración de las muestras influye en sus características y puede ser importante. Se debería complementar el ensayo de probetas con otros ensayos como los relacionados a continuación.

Las características resistentes y el módulo elástico, E_{col} , de las muestras se suelen determinar con ensayos de compresión simple. Sin embargo, la presencia de fisuras en las muestras afectará a los resultados así obtenidos. Es preferible el ensayo triaxial si se observan fisuras (véase el proyecto de Norma prEN 1997-2).

El módulo de compresión M_{col} de las muestras se determina con ensayos edométricos (véase el proyecto de Norma prEN 1997-2). Para evaluar el asiento del suelo estabilizado, es más representativo el módulo elástico de la columna que el módulo edométrico. El uso del módulo edométrico en los análisis del asiento en vez del módulo elástico de la columna lleva a una infraestimación del asiento a largo plazo [1].

Los ensayos de conductividad hidráulica requieren construir unos equipos especiales para tal fin, pues no existe un aparato estándar. Sin embargo, se puede estimar la permeabilidad realizando un análisis regresivo a partir del valor de consolidación determinado en los ensayos edométricos.

B.5.2.4 Muestras de suelo-ligante frescas

Las muestras de suelo-ligante frescas se utilizan en el método húmedo europeo. Las muestras de suelo ligante se toman antes de la puesta en servicio del suelo tratado. Se extraen de profundidades críticas de las columnas con una herramienta adecuada, normalmente una cada 500 m³ de suelo tratado o una cada día. Las muestras se obtienen al bajar un tomamuestras de suelo-ligante fresco vacío a la profundidad deseada, cogiendo una muestra líquida, cerrando el tomamuestras de suelo-ligante fresco y sacando la muestra a la superficie donde se procesa el material y se coloca en cilindros para su ensayo. Las muestras se curan a una temperatura recomendada en unos moldes, cilíndricos o cúbicos, normalizados. Los ensayos descritos previamente, se realizan normalmente después de 7 días y 28 días de curado. Las condiciones de curado del suelo tratado *in situ* por un lado y por otro las muestras de suelo-ligante frescas son diferentes e influyen en la resistencia y en el ritmo de incremento de la resistencia.

B.5.3 Ensayos de campo

B.5.3.1 Ensayos en el campo de pruebas

Se requieren ensayos *in situ* debido a la incertidumbre con respecto a la aplicabilidad de las características de las columnas determinadas en el laboratorio. Uno de los aspectos más importantes, en concreto la investigación de la uniformidad de las columnas, se puede llevar a cabo con algún tipo de sondeo, o con probetas como se ha descrito anteriormente y/o levantando columnas enteras. La determinación de las propiedades mecánicas y de conductividad hidráulica de las columnas requiere equipos especiales. Un ensayo de campo de pruebas consta de dos o tres columnas con diferentes contenidos de ligante para este fin.

Otro aspecto importante de los ensayos de campo es la determinación de los criterios para el control de ejecución del mezclado profundo. Los valores de control de ejecución pueden incluir los ritmos de penetración y de extracción del útil de mezclado, la velocidad de rotación y el par del útil, la anchura de solapamiento y el ritmo de alimentación del ligante/lechada. Cuando una columna se tiene que ejecutar en un estrato rígido, se mide el par y/o cambio de la resistencia a la penetración para establecer los valores críticos del control de ejecución.

B.5.3.2 Determinación directa de las propiedades mecánicas

Los ensayos presiométricos (véase el proyecto de Norma prEN 1997-2) pueden servir como base para la determinación de la resistencia a cortante y la compresibilidad de la columna. Los ensayos requieren perforar un agujero en la columna en el que se puede insertar el presiómetro.

Los ensayos geofísicos sirven como base para la determinación de las características del suelo tratado bajo acciones dinámicas y se pueden usar para la investigación de la integridad de las columnas y también para la determinación indirecta del módulo de deformación y resistencia. Sin embargo, todavía está en fase de investigación la interpretación de los resultados de los ensayos geofísicos.

B.5.3.3 Investigación de la uniformidad y determinación indirecta de las propiedades mecánicas

Los ensayos CPT, representando el ensayo de penetración con cono convencional, se usan para la determinación de los parámetros resistentes y la continuidad de la columna. El método CPT tiene unas limitaciones potenciales comparado con el ensayo de penetración de columna en términos del mantenimiento de la verticalidad. Debido al tamaño de su punta, el CPT sólo ensaya una proporción limitada del volumen de la columna. Frecuentemente es necesaria realizar una perforación previa para mantener el cono de ensayo dentro de la columna.

Los ensayos de penetración estática/dinámica, que son una combinación de los ensayos de penetración y golpeo, son útiles para suelos tratados con una resistencia a la compresión simple ≤ 4 MPa.

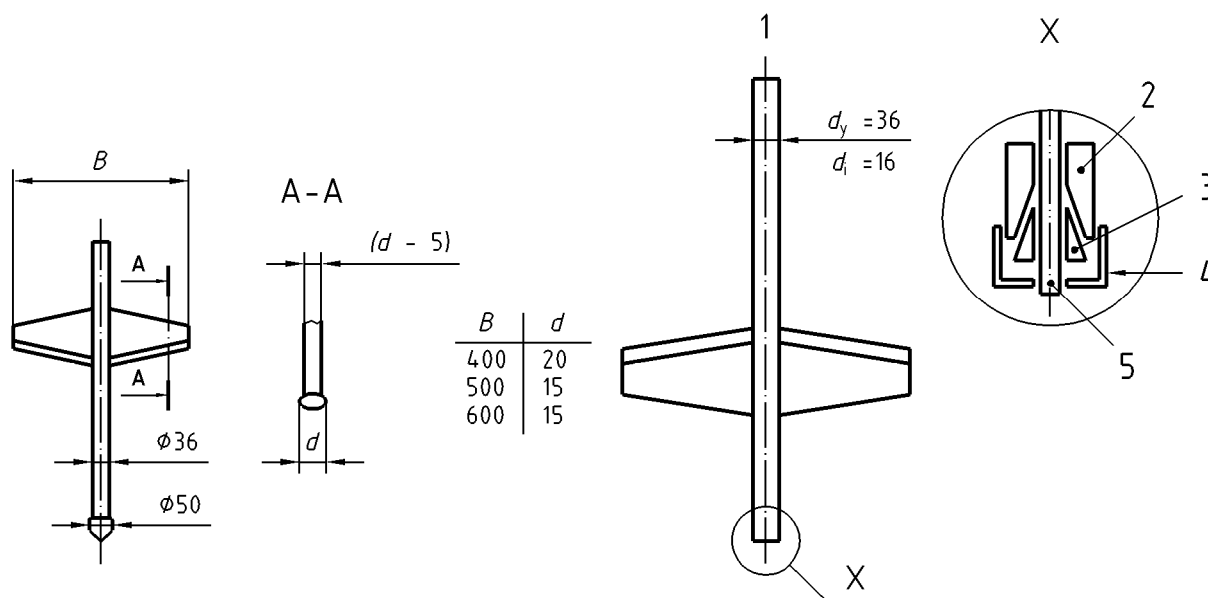
El ensayo de penetración de columna (véase la figura B.2) se lleva a cabo usando una sonda que se presiona en el centro de la columna a una velocidad de 20 mm/s y con un registro continuo de la resistencia a la penetración. La sonda está equipada con dos veletas enfrentadas. El método se suele utilizar en columnas con una longitud máxima de 8 m y con una resistencia a la compresión simple < 300 kPa. La sonda puede acabar en el suelo exterior de la columna para el caso de columnas más largas. Esto se puede evitar perforando previamente un agujero en el centro de la columna. La perforación debería realizarse sin percusión. Al usar la perforación, el ensayo de penetración de columna se puede utilizar para columnas con una resistencia a la compresión simple máxima de 600 kPa a 700 kPa y a una profundidad de 20 m a 25 m.

Se puede determinar la uniformidad de la columna a lo largo de toda su longitud con el ensayo de penetración de columna inverso. En este ensayo, se acopla una sonda, con unas veletas integradas iguales a las usadas en el ensayo de penetración de columna, a un cable situado debajo de la columna mientras ésta se construye. El cable, el que debería tener una resistencia de al menos 150 kN, corre a lo largo de toda la columna hasta la superficie del terreno. La resistencia de la columna se obtiene midiendo la resistencia obtenida mientras se tira de la sonda hasta la superficie. La retirada se debería realizar a una velocidad de 20 mm/s. La elección del tipo de veleta debería ser la misma que la sugerida para el ensayo de penetración de columna. Como se indica, el método se puede utilizar como medida de la variabilidad con la profundidad de la resistencia de la columna más que como una medida directa de la resistencia a cortante. El método está en proceso de desarrollo todavía.

B.5.3.4 Ensayos de conductividad hidráulica

Los ensayos con permeámetro a presión se usan de un modo similar a los ensayos presiométricos y pueden servir de base para la determinación de la permeabilidad de la columna en una dirección radial.

Se pueden utilizar varios tipos de ensayos de campo para evaluar las propiedades hidráulicas en el campo. Sin embargo, los equipos existentes para la determinación de la permeabilidad no están normalizados.



Leyenda

- 1 tubería de 127 mm (1/2')
- 2 Tubo, $d_y = 36$ mm roscado al revestimiento
- 3 Cuña para el tubo
- 4 Revestimiento roscado internamente a la sonda
- 5 Tubería de 127 mm (1/2')

Figura B.2 – Veletas utilizadas en los ensayos de penetración de columna convencionales (izqda.) e inversos

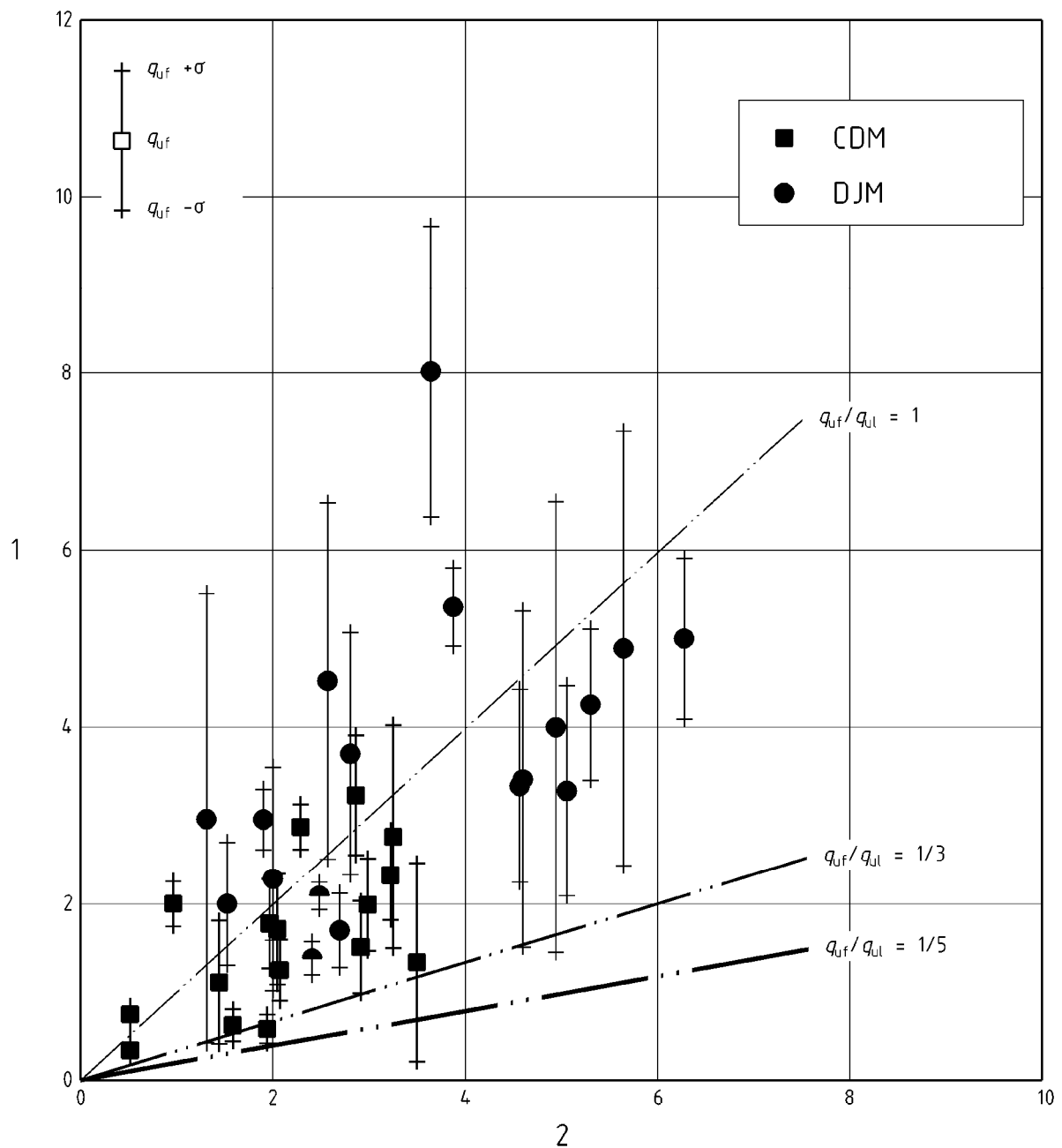
B.6 Correlación de varias propiedades del suelo tratado

B.6.1 Resistencia en campo y en laboratorio

Las diferentes condiciones de mezclado y de curado causan diferencias entre los suelos mezclados en campo y en laboratorio. Los procedimientos de los ensayos de laboratorio en Europa y en Japón son diferentes tal y como se menciona en el capítulo 5. En cada región, se utilizan herramientas de mezclado diferentes y esto hace difícil comparar de un modo general las resistencias de campo y de laboratorio. Sin embargo, si se usan las mismas herramientas de mezclado bajo un sistema de control de calidad normalizado, es posible comparar el suelo tratado en campo y en laboratorio, basándose en la experiencia acumulada.

De acuerdo a la experiencia con el método seco Sueco en arcillas plásticas blandas, la relación entre la resistencia de las muestras de mezclas de campo y de laboratorio está en el rango de 0,2 a 0,5. En suelos granulares, la relación entre la resistencia de las muestras de las mezclas de campo y de laboratorio parece ser significativamente mayor. En suelos granulares, el contenido de finos influye enormemente en esta relación.

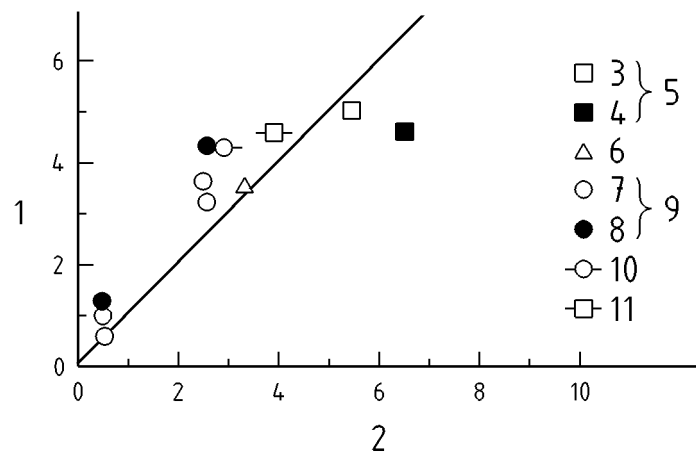
Para el método CDM (Método de Mezclado Profundo con Cemento) – el método de mezclado húmedo más común en Japón – la asociación CDM ha establecido un procedimiento de control de calidad y un número mínimo de rotación de las cuchillas. El método típico de mezclado en seco – el método DJM (Método de Mezclado Dry Jet) – emplea el útil de mezclado fabricada por el mismo fabricante. La experiencia japonesa de datos acumulados por las obras CDM y DJM en tierra se resumen en la figura B.3 y por las obras CDM en la figura B.4.



Leyenda

- 1 Resistencia en campo q_{uf} , MPa
- 2 Resistencia en laboratorio q_{ul} , MPa

Figura B.3 – Relación entre los resultados de los ensayos de resistencia en campo y en laboratorio para construcciones en tierra [19]



Leyenda

- 1 Resistencia a compresión simple de un suelo tratado *in situ*, q_{u5} , MPa
 - 2 Resistencia a compresión simple de un suelo tratado en laboratorio, q_{ul} , MPa
 - 3 Arcilla
 - 4 Arena
 - 6 Arcilla del puerto de Hatskaichi
 - 7 Arcilla limosa
 - 8 Limo arenoso
 - 10 Puerto de Chiba
 - 11 Puerto de Kitkyushu
- } 5 Muelle de Daikoku
- } 9 Puerto de Kanda

Figura B.4 – Relación entre los resultados de los ensayos de resistencia en campo y en laboratorio para obras marinas [5]

B.6.2 Correlación entre las características mecánicas y la resistencia a compresión simple

Para el diseño, se requieren frecuentemente los valores de la resistencia a flexión, resistencia a tracción, módulo de elasticidad y permeabilidad. Estas características se pueden obtener de probetas de suelo tratado *in situ* después de la construcción. Sin embargo en la etapa de diseño, estos valores deberían estimarse apropiadamente basándose en una base de datos fiable. Para el método húmedo japonés, existen datos abundantes recopilados por el Instituto de Tecnología de Desarrollo Costero de Japón [5]

B.7 Aspectos de diseño

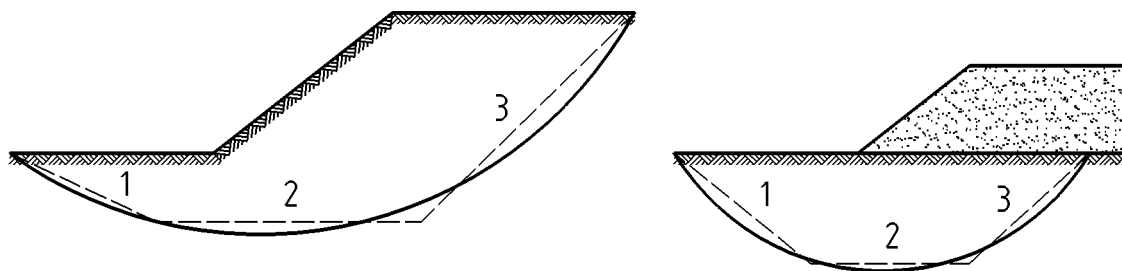
B.7.1 Estabilidad

B.7.1.1 Resistencia a cortante ponderada

Frecuentemente, el propósito de las columnas tratadas es estabilizar taludes, terraplenes o paredes de zanjas. En estos casos, las columnas deberían instalarse preferiblemente en un número de paredes a ambos lados, perpendiculares al talud, el terraplén o la zanja (véase el anexo A). La estabilidad se analiza basándose en las propiedades de la resistencia media ponderada del suelo sin tratar y de las columnas. Normalmente, se asume que la rotura tiene lugar a lo largo de una superficie de rotura plana o curva en la cual se movilizan la resistencia a cortante de las columnas y del terreno circundante.

B.7.1.2 Influencia de la localización de las columnas a lo largo de la superficie potencial de rotura

En el caso de columnas aisladas utilizadas con fines de estabilidad, es necesario considerar el riesgo de rotura a flexión de las columnas. Las columnas se comportarán de forma diferente si se sitúan en la zona activa, o más o menos en la zona de cortante pura, o en la zona pasiva de la superficie de rotura potencial (véase la figura B.5). En la zona activa, la carga axial en la columna contribuye al incremento de la resistencia a cortante o a flexión, mientras que en la zona pasiva se pueden incluso romper a tracción. Por tanto, las columnas en la zona activa ayudan principalmente a mejorar la condición de estabilidad. En las zonas de cortante y pasiva, las columnas que se disponen como pantallas de refuerzo o como un bloque son más efectivas, previniendo la rotura a cortante, que si se disponen de forma aislada.



Leyenda

- 1 Pasiva
- 2 Cortante
- 3 Activa

Figura B.5 – La carga axial de la columna en la zona activa incrementa su resistencia a flexión y a cortante. En la zona pasiva puede incluso romperse a tracción

B.7.1.3 Solapamiento de columnas

Las columnas colocadas con el fin de mejorar la estabilidad se sitúan normalmente en filas simples o dobles, a lo largo y perpendiculares a una pendiente, una excavación o un terraplén. Esto incrementa la eficacia en comparación con las columnas aisladas, de forma que el efecto negativo de la debilidad local de una columna se reduce, al igual que el riesgo del fallo de las columnas a flexión.

La resistencia a flexión de las filas de columnas individuales, debería ser lo suficientemente alta como para no ser la causa de la rotura. El solapamiento de las columnas en filas individuales para crear una pantalla incrementa la resistencia a flexión y el vuelco de las columnas se puede evitar incrementando la longitud de las filas y así el número de columnas por fila. Es importante que la resistencia cortante del suelo tratado en la zona de superposición sea lo suficientemente alta como para que el solapamiento de las columnas sea suficiente. Es importante que la verticalidad de las columnas secantes se mantenga en toda la longitud. La resistencia cortante del suelo estabilizado en la zona de solapamiento normalmente determina la resistencia lateral de las filas de columnas.

B.7.1.4 Separación de columnas

La rotura puede ocurrir en la zona de cortante debido a la separación de las columnas en la fila cuando la superficie de deslizamiento se localiza cerca de la parte superior de las columnas y la resistencia a tracción es baja dentro de la zona de solapamiento. Esta separación reduce la resistencia a cortante de la pantalla. Se espera que la resistencia a tracción del suelo tratado en la zona de solapamiento sea del 5% al 15% de la resistencia a compresión simple (puede ser mayor o menor dependiendo de la calidad y eficacia del mezclado profundo).

B.7.1.5 Efecto pasador de las filas de columnas

La resistencia de las columnas actuando como pasadores puede ser decisiva cuando la superficie de rotura se localiza cerca de la parte inferior de una fila. Cuando las columnas están separadas de las columnas adyacentes, la resistencia a cortante por columna en la fila será la misma que la resistencia a cortante de la columna aislada.

B.7.1.6 Vuelco de una fila de columnas que resisten por punta

La carga axial de las columnas situadas al final de una fila con columnas que resisten por punta puede ser muy alta cuando la fila de columnas está sometida a un movimiento rotacional. La carga axial máxima obtenida de este modo, debería ser menor que la carga correspondiente a la resistencia a compresión simple de la columna.

B.7.1.7 Aplicaciones de muros estructurales

Los muros estructurales con vigas de refuerzo se diseñan normalmente utilizando el principio de arqueado.

B.7.1.8 Aplicaciones del mezclado tipo bloque

Como las propiedades del suelo tratado *in situ* son completamente diferentes de aquéllas del terreno adyacente sin tratar, se asume que el suelo tratado es un conjunto rígido estructural enterrado en el terreno para transferir las cargas exteriores a un sustrato fiable (Kitazume *et al.*, 1996), véase la figura B.6. Por simplificar, el concepto de diseño es análogo al procedimiento de diseño para estructuras gravitatorias, tales como las estructuras de contención de hormigón.

El primer paso en el procedimiento incluye el análisis de estabilidad de la superestructura para asegurar que la superestructura y el suelo tratado actúan solidariamente.

El segundo paso incluye el análisis de estabilidad del suelo tratado debido a las acciones externas, en el que se evalúan la rotura por deslizamiento, vuelco y la capacidad resistente.

El tercer paso incluye el análisis de estabilidad interna en el que se analizan las tensiones inducidas en el suelo tratado debido a las fuerzas exteriores y se confirma que sean menores que los valores permitidos. Finalmente, se analiza el desplazamiento del suelo tratado.

En el diseño de la superestructura frente al sismo, el análisis de la intensidad del sismo se aplica en Japón; el ciclo dinámico de cargas se convierte en cargas estáticas multiplicando el peso unitario de la estructura por el coeficiente sísmico.

En el caso de utilizar modelos de tratamiento más complejos, basándose en la interacción entre el suelo tratado y no tratado entre las columnas, es deseable aplicar análisis de elementos finitos elasto-plásticos en 2-D y 3-D más sofisticados para examinar el desarrollo de las tensiones en el terreno mejorado y el desplazamiento del mismo. Por supuesto, la calidad de los resultados está fuertemente influenciada por la correcta elección de los parámetros de entrada.

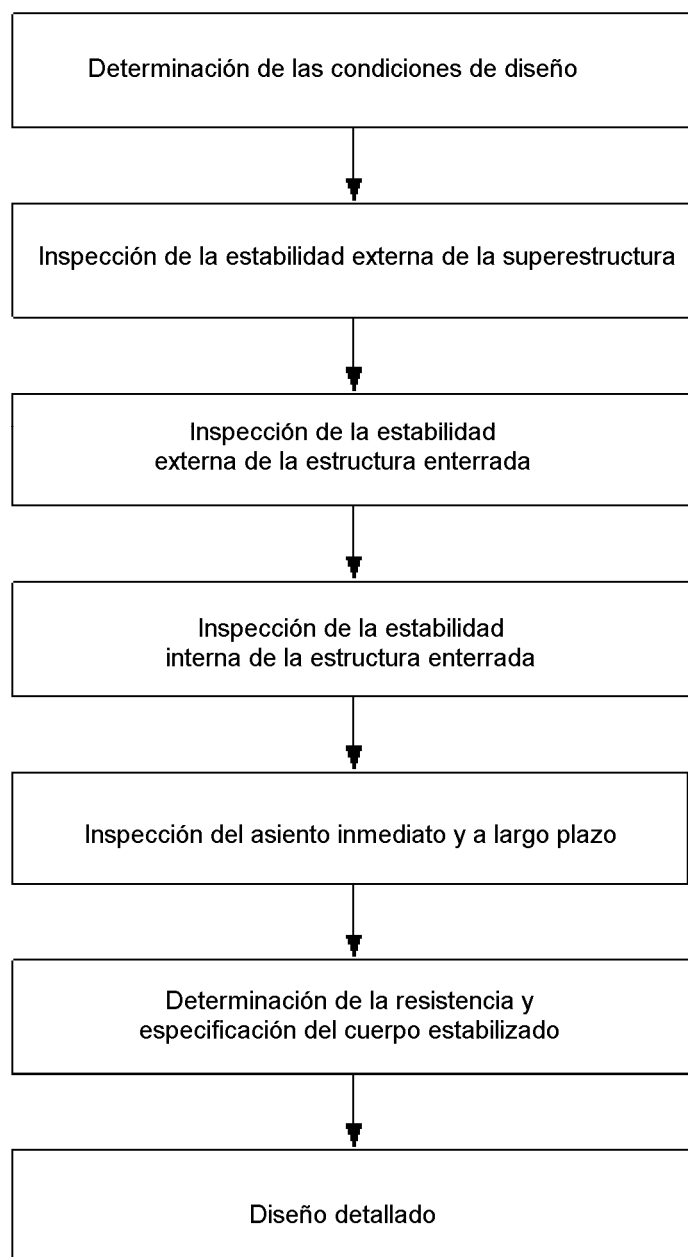


Figura B.6 – Diagrama de flujo del procedimiento de diseño japonés para estabilización de tipo bloque

B.7.2 Asientos

B.7.2.1 Asiento total

El diseño relacionado con la deformación de columnas de mezclado *in situ* o elementos o estructuras utilizados para cimentaciones o muros de contención deben estar de acuerdo con la Norma EN 1997-1.

Las columnas tratadas, colocadas para reducir los asientos de terraplenes, se colocan formando unas mallas triangulares o cuadradas. El análisis de los asientos se basa generalmente en la hipótesis de iguales condiciones de deformación – en otras palabras, se supone que el arqueado redistribuye la carga de modo que las deformaciones verticales a una cierta profundidad se igualan tanto en las columnas como en el suelo de alrededor.

Para un grupo de columnas, el asiento medio se reduce al contrarrestar a cortante las tensiones a cortante en el suelo sin tratar, movilizándolas a lo largo del perímetro del grupo. Sólo se requiere un pequeño desplazamiento relativo (unos pocos milímetros) para movilizar la resistencia a cortante del suelo. Al contrarrestar las tensiones de cortante se producirá una distorsión angular en el suelo mejorado a lo largo del perímetro del grupo y, consecuentemente, se inducirá un asiento diferencial dentro del grupo. Esta compensación – por lo tanto el asiento diferencial – se reducirá en el tiempo con el asiento de consolidación inducido en el suelo de alrededor. Por tanto normalmente no se tiene en cuenta en el análisis de asientos.

B.7.2.2 Velocidad de asiento

En el método seco, donde la permeabilidad de las columnas puede ser mayor que la permeabilidad del terreno adyacente, las columnas pueden acelerar el proceso de consolidación de un modo similar a los drenes verticales. Sin embargo, la velocidad de asiento no está determinado por el efecto de drenaje únicamente. Cuando la rigidez de un suelo cohesivo blando tratado y no tratado coexisten, el fenómeno dominante es la redistribución de las tensiones en el sistema con el tiempo. En el momento de la carga, la carga aplicada produce un exceso de presión intersticial. Debido al incremento gradual de la rigidez de las columnas, la transición gradual de la carga del suelo a las columnas provoca una reducción del límite de tiempo de la carga soportada por el suelo. En consecuencia, el exceso de presión intersticial en el suelo blando disminuye rápidamente, incluso sin el flujo de agua radial. Esta redistribución de tensiones es una de las mayores razones para la reducción de asientos y el incremento de la velocidad de asientos. Por tanto, incluso si la permeabilidad de las columnas es del mismo orden de magnitud que la del suelo adyacente, el proceso de consolidación se acelera debido a la presencia de columnas. Así, el reparto de cargas entre el suelo y las columnas incrementa el coeficiente medio de la consolidación unidimensional. La permeabilidad de la columna disminuye con el tiempo y con el incremento de la presión de confinamiento.

En el método húmedo, la conductividad hidráulica del suelo tratado es, generalmente, del mismo orden de magnitud o menor que la conductividad hidráulica del terreno sin tratar adyacente. Por lo tanto, el proceso de consolidación está determinado solamente por el flujo de agua vertical unidimensional. Sin embargo, debido a la redistribución de tensiones, la velocidad de asiento es mucho mayor que el calculado por la consolidación unidimensional.

B.7.3 Confinamiento

Un muro de confinamiento se forma al solapar columnas de forma que no haya filtraciones a través del muro. Es muy importante que se garantice la homogeneidad de las columnas y que se prevenga la filtración a través de la pantalla. En el diseño se debe dar una tolerancia suficiente al espesor del muro en el solapamiento y a la permeabilidad de las juntas de solapamiento. Normalmente se incorpora bentonita en el método húmedo, para así reducir la permeabilidad del suelo tratado.

Si el objetivo del mezclado profundo es confinar depósitos de residuos o suelos contaminados, la durabilidad del suelo tratado se convierte en uno de los aspectos de diseño más importantes. Se debería estudiar la reacción entre el suelo tratado y el contaminado, especialmente cuando el contaminante tiene una acidez alta.

ANEXO C (Informativo)**GRADO DE OBLIGACIÓN DE LAS DISPOSICIONES DE ESTA NORMA**

Las disposiciones de esta norma están marcadas de acuerdo con su grado de obligación:

- RQ: requisito.
- RC: recomendación.
- PE: permiso.
- PO: posibilidad y eventualidad.
- ST: afirmación

4.1.1	RQ	7.2.7	RC	8.6.3.1	RQ
4.1.2	RC	7.2.8	RQ	8.6.3.2	RQ
4.1.3	RQ	7.3.1	RQ	8.6.3.3	RQ
4.2.1	RQ	7.3.2	RQ	8.6.3.4	RQ
4.2.2	RQ	7.4.1	RQ	8.6.3.5	ST
4.2.3	RQ	7.4.2	RC	8.6.3.6	ST
5.1.1	RQ	7.4.3	RC	8.6.3.7	RQ
5.1.2	RQ	7.4.4	RQ	8.7.1	ST
5.1.3	RQ	7.4.5	RQ	8.7.2	RQ
5.1.4	RQ	7.5.1	RC	9.1.1	RC
5.1.5	RQ	7.5.2	RQ	9.1.2	RQ
5.2.1	RQ	7.5.3	RQ	9.2.1	RQ
5.2.2	RQ	7.5.4	RQ	9.2.2	RQ
5.2.3	RC	7.5.5	RQ	9.3.1	RQ
5.2.4	RC	8.1.1	RQ	9.3.2	RQ
6.1.1	ST	8.2.1	RQ	9.3.3	RC
6.1.2	RQ	8.2.2	RQ	9.3.4	RC
6.1.3	RQ	8.2.3	RQ	9.3.5	RC
6.1.4	RQ	8.3.1	RQ	9.3.6	RC
6.1.5	RQ	8.3.2	RQ	9.3.7	RQ
6.1.6	RQ	8.4.1.1	RQ	9.3.8	RQ
6.2.1	RQ	8.4.1.2	RQ	9.4.1.1	RQ
6.2.2	ST	8.4.1.3	ST	9.4.1.2	ST
7.1.1	RC	8.5.1	RQ	9.4.1.3	RQ
7.1.2	RC	8.5.2	RQ	9.4.1.4	RC
7.1.3	RQ	8.5.3	RQ	9.4.2.2	RQ
7.1.4	PE	8.6.1.1	ST	9.5.1	RC
7.1.5	RQ	8.6.1.2	RQ	9.5.2	RQ
7.1.6	RQ	8.6.1.3	RQ	9.6.1	RQ
7.1.7	ST	8.6.1.4	RQ	10.1.1	RQ
7.1.8	ST	8.6.1.5	RQ	10.1.2	RQ
7.2.1	RQ	8.6.2.1	RQ	10.2.1	RQ
7.2.2	RC	8.6.2.2	RQ	11.1.1	ST
7.2.3	RQ	8.6.2.3	RQ	11.1.2	RQ
7.2.4	RC	8.6.2.4	RQ	11.2.1	RQ
7.2.5	RQ	8.6.2.5	RQ	11.3.1	RC
7.2.6	RQ	8.6.2.6	RQ	11.4.1	RC

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Baker, S. (2000), *Deformation behaviour of lime/cement column stabilized clay*. Doctoral Thesis, Chalmers Univ. of Technology, Gothenburg.
- [2] Broms, B. (1991), Stabilisation of soil with lime columns. In *Foundation Engineering Handbook*, 2nd Edition, van Nostrand Reinhold, New York, Chapter 24, 833-855.
- [3] Broms B. (1992), Lime stabilisation. In *Ground Improvement*. (ed. M. P. Moseley), Blackie Academic & Professional, 65–99. Bruce, D. A., Bruce, M. E. & DiMillio, A. F. (2000). Deep mixing: QA/QC and verification methods. Grouting-Soil Improvement Geosystems including Reinforcement, *Finnish Geotechnical Society* (Editor Hans Rathmeyer), pp. 11-22.
- [4] Carlsten, P. (1995), *Lime and lime/cement columns*. SGF Rapport 4:95E.
- [5] CDIT (2002), *Deep Mixing Method. Principle, Design and Construction*. Coastal Development Institute of Technology, Japan.
- [6] EuroSoilStab (2002). *Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils*. Design guide soft soil stabilisation. CT97-0351. Project No. BE-96-3177. European Commission. Industrial & Materials Technologies Programme (Brite-EuRam III). Brussels.
- [7] Hoikkala, S., Leppänen, M. & Lahtinen, P. (1997). Blockstabilization of peat in road construction. *Proc. 14th ICSMFE*, Hamburg, Vol. 3, pp.1693-1696..
- [8] Kitazume, M., Okane, K. & Miyajima, S. (2000). Centrifuge model tests on failure envelope of column type DMM improved ground. *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 4, 43-55.
- [9] Kitazume, M., Omine, K., Miuyake, M. & Fujisawa, H. (1996). Japanese Geotechnical Society Technical Committee Report. Japanese design procedures and recent DMM activities. Grouting and deep mixing. *Proc. 2nd Int. Conf. Ground Improvement Geosystems*, Balkema 2: 925-930.
- [10] Kivelö, M. (1998). *Stabilization of embankments on soft soil with lime/cement columns*. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [11] Larsson, S. (2003). *Mixing process for ground improvement by deep mixing*. Doctoral. Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [12] Matsumoto, J., Ohbayashi, J. Harada, K., Tsuboi, H. & Matsui, T. (1998). Application examples of some innovative ground improvement techniques developed in Japan. *Proc. 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Techniques*, pp. 339-346. Mohrmann, Chr. (1994). Dammsanierung mit dem Deep-Soil-Mixing Verfahren in den USA (after Walker, A. D. “DSM saves the dam”, *Civil Engineering*, ASCE, Vol. 64, No. 12, 48-51).
- [13] Porbaha, A. (2000), State-of-the-art in deep mixing technology. design considerations. *Ground Improvement* 4, 111-125.
- [14] Porbaha, A. (2001), Effect of installation on quality of deep mixed soil cement columns. *Proc. of Soil Mixing Seminar at Deep Foundation Institute*, Clayton, Missouri, 95-109.
- [15] Porbaha, A., Tanaka, H. & Kobayashi, M. (1998), State-of-the-art in deep mixing technology, Part 2 : Applications. *Ground Improvement* 2, No. 3, 125-139.

- [16] Porbaha, A., Shibuya, S. & Kishida, T. (2000), State-of-the-art in deep mixing technology. Geomaterial characterization of deep mixing. *Ground Improvement* 4, No.3, 91-110.
- [17] Porbaha, A., Raybaut, J. L. & Nicholson, P. (2001), State-of-the-art in construction aspects of deep mixing technology. *Ground Improvement* 5, No. 3, 123-140.
- [18] Saitoh, S., Suzuki, Y., Nishioka, S. & Okumura, R. (1996). Required strength of cement improved ground. Grouting and Deep Mixing. *Proc. of IS-Tokyo, 2nd Int. Conf. Ground Improvement Geosystems*, Vol 1. pp. 557-562.
- [19] Sakai, S., Takano, S. & Ogawa, K. (1996), Consideration on the target strength of deep mixing methods. *Proc. 31st Japan National Conf. on Geot. Engng*, 131-132.
- [20] Sarhan, A. & Pampel, A. (1999). Optimierung des Fräs-Misch-Injektionsverfahren (FMI) unter erdstatischen Gesichtspunkten. *Geotechnik* 22, No. 4.
- [21] SGF Rapport 2:2000, *Kalk- och kalkcementpelare. Vägledning för projektering, utförande och kontroll* (Lime and lime/cement columns. Guidance for projecting, execution and control). Swedish Geotechnical Society.
- [22] Tanaka, Y., Tsuboi, H., Yamamoto, M. Harada, K. & Matsui, T. (2002). Innovative ground improvement technology in Japan. *Proc. 6th Int. Symp. on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development* (to be published).
- [23] Terashi, M. (1997). Theme lecture : Deep mixing method. Brief state-of-the-art. *Proc. 14th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng, hamburg*, Vol. 4, pp. 2475-2478.
- [24] Terashi, M. (2001), Development of deep mixing in the past quarter century. *Material Science for the 21st Century*, Vol. A, 180-193. The Society of Material Science, Japan.
- [25] Terashi, M. & Tanaka, H. (1981), Ground improvement by deep mixing method. *Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng*, Vol. 3, 777-780. Terashi, M. & Tanaka, H. (1983), Settlement analysis for deep mixing method. *Proc. 8th European Conf. Soil Mech. Found. Engng*, Vol. 2, 955-960.
- [26] Terashi, M. (2001), Development of deep mixing in the past quarter century. *Material Science for the 21st century*, Vol. A, 180-193. The Society of Material Science, Japan.
- [27] US Department of Transportation (2000), *An Introduction to the Deep Soil Mixing Methods as used in Geotechnical Applications*. Publication No. FHWA-RD-99-138, Federal Highway Administration.
- [28] Wildner, H., Kleist, F. & Strobl, Th. (1999). Das Mixed-in-Place-Verfahren für permanente Dichtungswände im Wasserbau. *Wasserwirtschaft* 89, No. 5.
- [29] EN ISO 9000, *Quality management systems. Fundamentals and vocabulary* (ISO 9000:2000).

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