

Noviembre 2001

TÍTULO

Ejecución de trabajos geotécnicos especiales

Inyecciones de alta presión

Jet grouting

Execution of special geotechnical works. Jet grouting.

Exécution des travaux géotechniques spéciaux. Colonnes, panneaux et structures de sol-ciment réalisés par jet.

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 12716 de mayo de 2001.

OBSERVACIONES

ANTECEDENTES

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

ICS 93.020

Versión en español

**Ejecución de trabajos geotécnicos especiales
Inyecciones de alta presión
Jet grouting**

Execution of special geotechnical works.
Jet grouting.

Exécution des travaux géotechniques
spéciaux. Colonnes, panneaux et
structures de sol-ciment réalisés par jet

Ausführung von besonderen
geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau).
Düsenstrahlverfahren
(Hochdruckinjektion,
Hochdruckbodenvermörtelung, Jetting).

Esta norma europea ha sido aprobada por CEN el 2001-04-16. 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 la Secretaría Central 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 a la Secretaría Central, tiene el mismo rango que aquéllas.

Los miembros de CEN son los organismos nacionales de normalización de los países siguientes: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, 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
SECRETARÍA CENTRAL: Rue de Stassart, 36 B-1050 Bruxelles

© 2001 Derechos de reproducción reservados a los Miembros de CEN.

ÍNDICE

	Página
ANTECEDENTES	5
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	6
2 NORMAS PARA CONSULTA	6
3 TÉRMINOS Y DEFINICIONES	6
4 NECESIDADES ESPECÍFICAS	12
5 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA	14
6 MATERIALES	15
7 CONSIDERACIONES DEL PROYECTO	15
7.1 Generalidades.....	15
7.2 Configuración geométrica	18
7.3 Características de resistencia y de deformación.....	18
7.4 Permeabilidad.....	18
8 EJECUCIÓN	19
8.1 Generalidades.....	19
8.2 Equipo	20
8.3 Trabajos preliminares	22
8.4 Perforación	22
8.5 Inyección de lechada de cemento a presión.....	22
8.6 Material sobrante de retorno	23
8.7 Colocación de la armadura	23
9 SUPERVISIÓN, ENSAYO Y CONTROL	23
9.1 Generalidades.....	23
9.2 Ensayos preliminares	24
9.3 Supervisión y ensayo del proceso.....	24
9.4 Ensayo sobre los elementos construidos.....	25
9.5 Control	26
10 DOCUMENTOS SOBRE LA EJECUCIÓN DEL TRABAJO	26
10.1 Documentos disponibles en obra.....	26
10.2 Documentos a preparar en obra	27
11 REQUISITOS ESPECIALES	27
11.1 Conformidad con las normas nacionales.....	27
11.2 Seguridad en el lugar de trabajo.....	28
11.3 Protección del medio ambiente	28
ANEXO A (Normativo) REQUISITOS ADICIONALES DEL PROYECTO	29
ANEXO B (Informativo) INTERVALOS DE LOS PARÁMETROS DE LA INYECCIÓN ...	30
ANEXO C (Informativo) ENSAYOS INDIRECTOS	31
ANEXO D (Informativo) EJEMPLOS DE ACTAS REALIZADOS A PIE DE OBRA DE LOS TRABAJOS DE INYECCIÓN	32
ANEXO E (Informativo) GRADO DE OBLIGACIÓN DE LAS DISPOSICIONES	35
BIBLIOGRAFÍA	37

ANTECEDENTES

Esta norma europea 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 la misma o mediante ratificación antes de finales de noviembre de 2001, y todas las normas nacionales técnicamente divergentes deben anularse antes de finales de noviembre de 2001.

El anexo A es normativo y los anexos B, C, D y E son informativos.

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, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma europea es aplicable a la ejecución, ensayo y control de los trabajos de inyección a presión. En el capítulo 7 se dan las consideraciones de proyecto estrictamente relacionadas con estos trabajos. En el anexo A se dan otros requisitos generales que podrían ser incluidos como, o sustituidos por, capítulos de futuras ediciones del Eurocódigo 7.

NOTA – El proceso de inyección a presión debe ser diferenciado del proceso de inyección descrito en la Norma Europea EN 12715.

2 NORMAS PARA CONSULTA

Esta norma europea incorpora disposiciones de otras publicaciones por su referencia, con o sin fecha. Estas referencias normativas se citan en los lugares apropiados del texto de la norma y se relacionan a continuación. Para las referencias con fecha, no son aplicables las revisiones o modificaciones posteriores de ninguna de las publicaciones. Para las referencias sin fecha, se aplica la edición en vigor del documento normativo al que se haga referencia (incluyendo modificaciones).

ENV 197-1:1992 – *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.*

prEN 1008:1997 – *Agua de mezcla para el hormigón. Especificación para la toma de muestras, ensayo y determinación de la idoneidad del agua en la industria del hormigón, incluyendo el agua procedente de las instalaciones de reciclado, así como el agua de mezcla para el hormigón.*

ENV 1992-1-1:1991 – *Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.*

ENV 1997-1:1994 – *Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales.*

3 TÉRMINOS Y DEFINICIONES

Para los fines de esta norma europea se aplican los términos y definiciones siguientes:

3.1 inyección a presión (jet grouting): El proceso de inyección a presión consiste en la desagregación del terreno o roca poco compacta y su mezcla y sustitución parcial con un agente de cementación; la desagregación se consigue mediante la inyección a alta presión de un fluido que puede ser el propio agente de cementación.

3.2 elemento inyectado: Volumen de terreno tratado a través de un solo taladro. Los elementos más comunes son:

- columna inyectada: un elemento inyectado de forma cilíndrica (figura 1 a);
- panel inyectado: un elemento inyectado de forma plana (figura 1 b).

3.3 estructura inyectada: Un conjunto de elementos inyectados que están parcial o totalmente enlazados. Las estructuras más comunes que se forman son:

- elementos inyectados solapados: una estructura en forma de muro o pared (figura 2 a);
- losa inyectada: una estructura horizontal formada fundamentalmente por inyección vertical (figura 2 b);
- paraguas inyectado: una estructura formada por inyección horizontal – véase el apartado 3.8 y la figura 2 c;
- bloque inyectado: una estructura tridimensional.

3.4 sistema sencillo: El proceso de inyección a presión en el cual la desagregación y la cementación del terreno se consigue mediante la inyección a alta presión de un solo fluido, normalmente una lechada de cemento (figura 3 a).

3.5 sistema doble (aire): El proceso de inyección en el cual la desagregación y la cementación del terreno se consigue mediante la inyección a alta presión de un fluido (normalmente una lechada de cemento) asistida por una inyección de aire que lo recubre como un segundo fluido (figura 3 b).

3.6 sistema doble (agua): El proceso de inyección en el cual la desagregación del terreno se consigue mediante la inyección de agua a alta presión, y la cementación se obtiene simultáneamente por la inyección independiente de lechada de cemento (figura 3 c).

3.7 sistema triple: El proceso de inyección en el cual la desagregación del terreno se consigue mediante la inyección de agua a alta presión asistida por una inyección de aire que la recubre, y la cementación se obtiene simultáneamente por la inyección independiente de lechada de cemento (figura 3 d).

NOTA – En casos especiales el agua se puede sustituir por otros líquidos o suspensiones apropiados.

3.8 inyección horizontal: Tratamiento realizado mediante un taladro horizontal o parcialmente horizontal (dentro de $\pm 20^\circ$ con respecto al plano horizontal).

3.9 torre de inyección: Torre giratoria capaz de regular automáticamente la rotación y la traslación de la sarta de inyección y de la lanza hidráulica.

3.10 sarta de inyección: Vástagos unidos, con conducto interior simple, doble o triple, que transportan el o los fluidos de inyección a la lanza hidráulica.

3.11 lanza hidráulica: Herramienta montada en el extremo de la sarta de inyección, que realiza la inyección de los fluidos en el terreno.

3.12 boquilla: Dispositivo fabricado especialmente, que va montado en la lanza hidráulica y que está diseñado para transformar el flujo del fluido a alta presión que circula por la sarta de inyección en el chorro a alta velocidad dirigido sobre el terreno.

3.13 radio de influencia: Distancia eficaz de desagregación del terreno, por medio de la inyección, medida a partir del eje de la lanza de inyección.

3.14 material sobrante de retorno: Mezcla sobrante de partículas del terreno y de los fluidos introducidos, que se ha originado durante el proceso de inyección y que, normalmente, fluye a la superficie del suelo a través del espacio anular del taladro de la inyección.

3.15 parámetros de la inyección: A continuación se definen los parámetros de la inyección:

- presión del fluido o fluidos dentro de la sarta de inyección;
- caudal del fluido o fluidos dentro de la sarta de inyección;
- composición de la lechada de cemento;
- velocidad de rotación de la sarta de inyección;
- velocidad de extracción o de inserción de la sarta de inyección.

3.16 preinyección: Método con el que se facilita la inyección de un elemento por medio de una fase de desagregación preliminar, con una inyección de agua y/u otros fluidos.

NOTA – La preinyección también es conocida generalmente como prelavado o precorte.

3.17 secuencia sucesiva de trabajo en fresco: Secuencia de trabajo en la cual los elementos inyectados se construyen de forma sucesiva sin esperar a que la lechada de cemento se endurezca en los elementos solapados (figura 4 a).

3.18 secuencia primaria-secundaria: Secuencia de trabajo en la cual la ejecución de un elemento solapado no puede comenzar antes de un periodo de tiempo de endurecimiento especificado o hasta que se obtenga una resistencia predeterminada de los elementos adyacentes construidos con anterioridad (figura 4 b).

3.19 material inyectado: El material que constituye el cuerpo de un elemento inyectado.

3.20 inyección armada: Columnas inyectadas armadas con acero u otro material de alta resistencia.

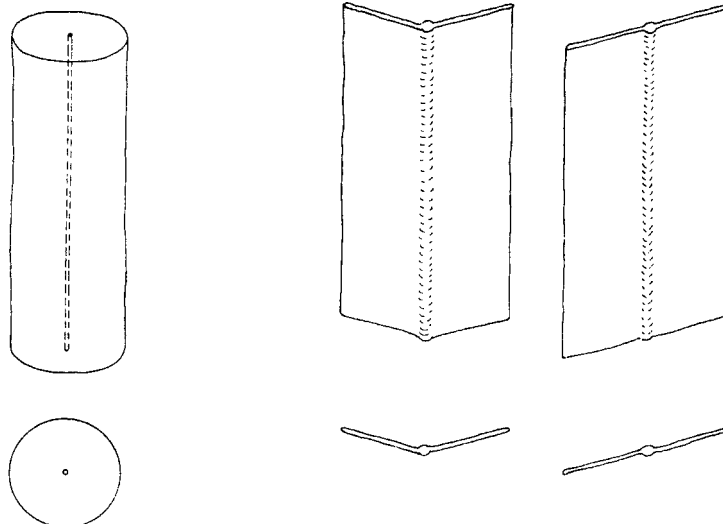


Fig. 1 a) – Columna inyectada a presión

Fig. 1 b) – Panel inyectado a presión

Fig. 1 – Ejemplos de elementos inyectados a presión

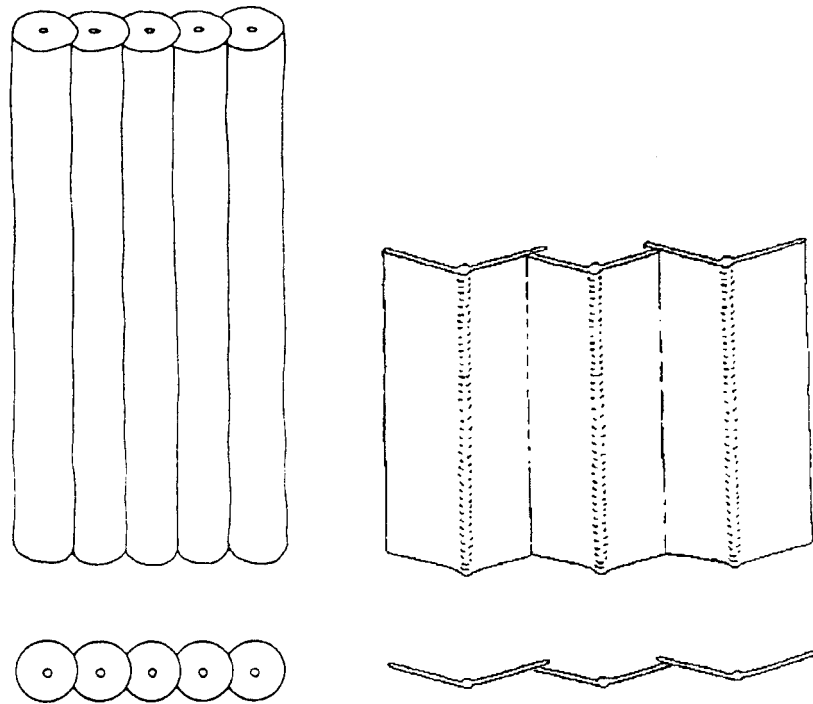


Fig. 2 a) – Elementos solapados inyectados a presión

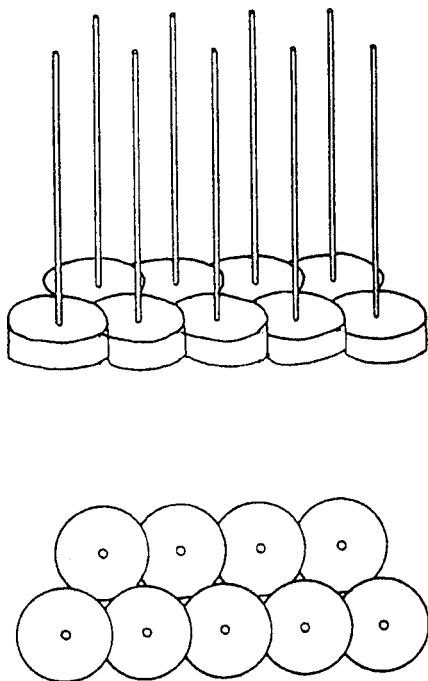


Fig. 2 b) – Losa inyectada a presión

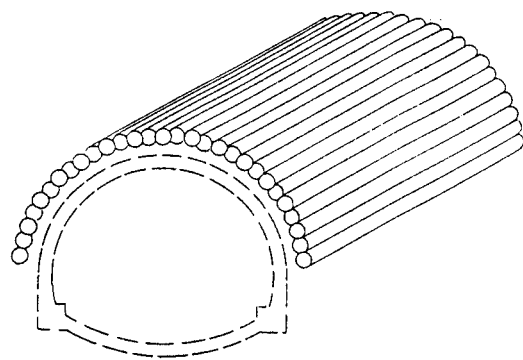
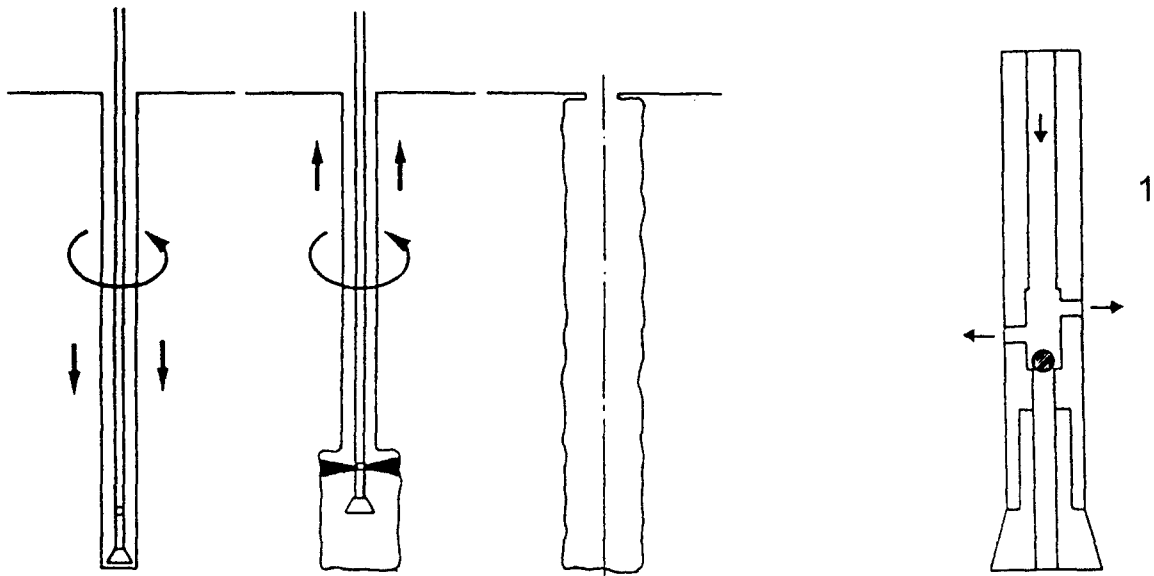


Fig. 2 c) – Paraguas inyectado a presión

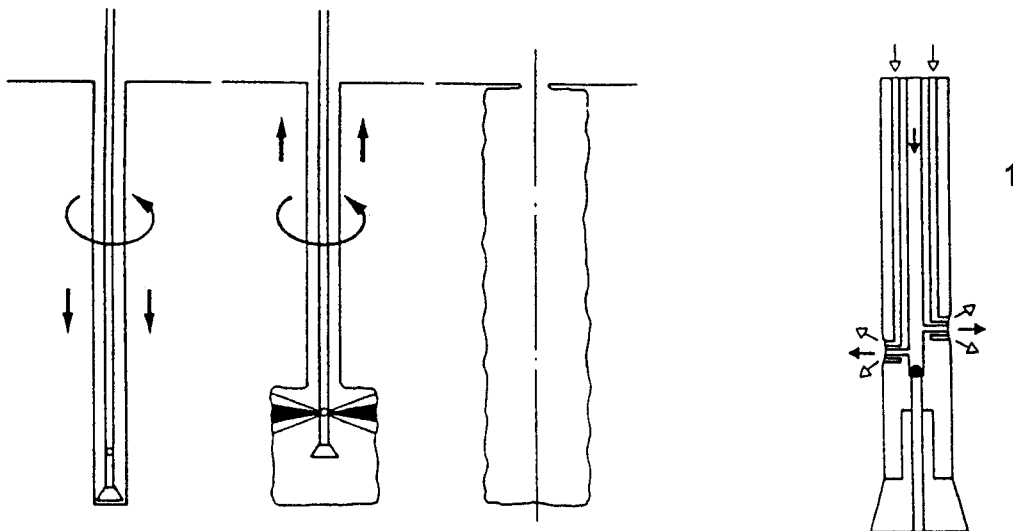
Fig. 2 – Ejemplos de estructuras inyectadas a presión



Leyenda

1 Lanza hidráulica

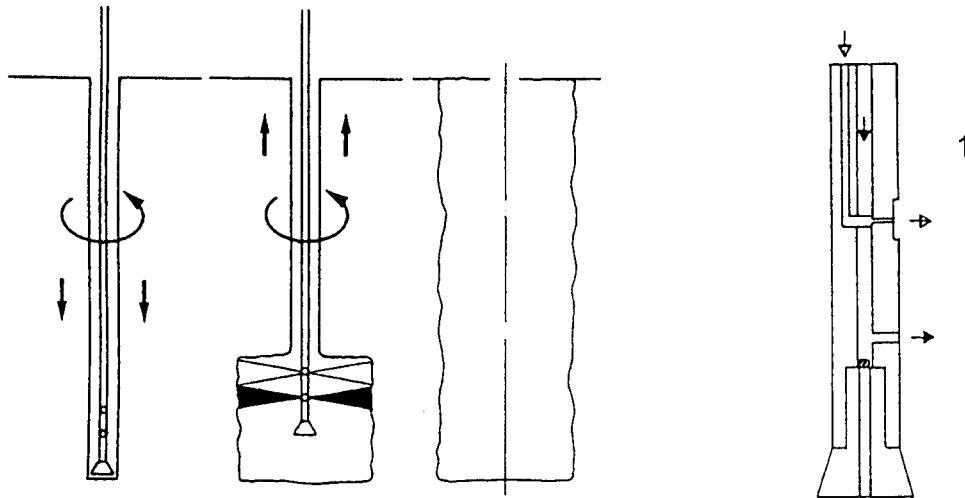
Fig. 3 a) – Sistema sencillo



Leyenda

1 Lanza hidráulica

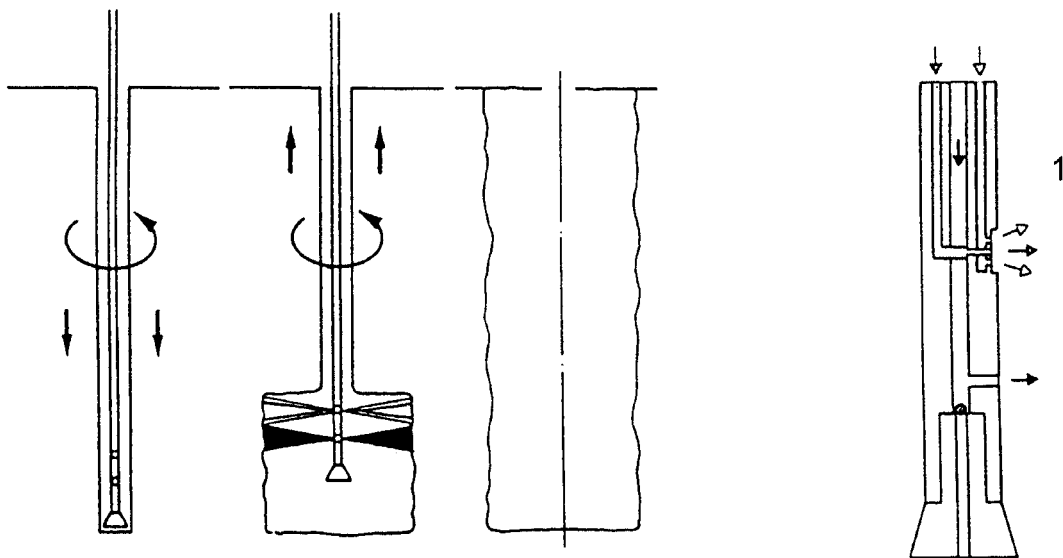
Fig. 3 b) – Sistema doble (aire)



Leyenda

1 Lanza hidráulica

Fig. 3 c) – Sistema doble (agua)



Leyenda

1 Lanza hidráulica

Fig. 3 d) – Sistema triple

Fig. 3 – Esquemas de sistemas de inyección a presión

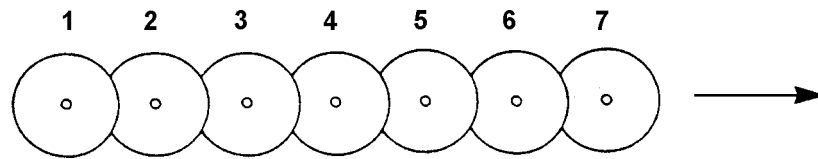


Fig. 4 a) – Secuencia sucesiva de trabajo en fresco

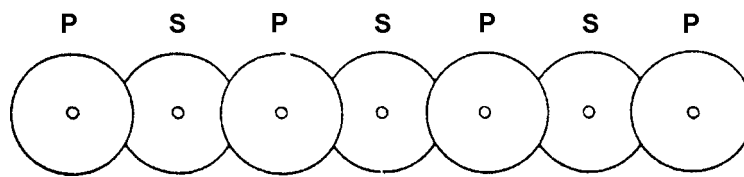


Fig. 4 b) – Secuencia primaria-secundaria

Fig. 4 – Secuencias de trabajo

4 NECESIDADES ESPECÍFICAS

4.1 La información siguiente debe ser definida antes de comenzar las actividades de proyecto o de ejecución:

- descripción detallada de la estructura del terreno y sus propiedades geotécnicas conforme a la complejidad del trabajo a realizar;

y, si es adecuado:

- condiciones hidrogeológicas;
- condiciones del entorno de la obra (estructuras adyacentes, estructuras y servicios enterrados, líneas aéreas de transporte de energía y otras restricciones de trabajo, accesos);
- requisitos medioambientales; en particular eliminación o retirada del material sobrante de retorno;
- deformación aceptable de las estructuras que van a ser apuntaladas o de las estructuras adyacentes.

4.2 Las hipótesis del proyecto, de acuerdo con el capítulo 2 de la Norma Europea Experimental ENV 1997-1-1:1994, deben ser verificadas, y modificadas si fuese necesario, conforme a la información que se vaya obteniendo durante la fase de ejecución.

4.3 Debido a la naturaleza de los trabajos de inyección, el cliente, el contratista principal, un contratista especialista o un ingeniero asesor, pueden realizar la totalidad o parte del proyecto.

4.4 En los documentos del contrato debe estar claramente especificadas la asignación del proyecto, las actividades de supervisión y de ejecución y las responsabilidades de todas las partes implicadas.

4.5 El proyecto y la ejecución deben incluir, según corresponda, las actividades relacionadas en la tabla 1. El orden en que aparecen dichas actividades no representa necesariamente una secuencia en el tiempo.

Tabla 1
Lista recomendada de actividades en el proyecto y ejecución
de la inyección de lechada de cemento a presión (jet grouting)

Nº	Actividad
1	Obtención de datos de investigación del lugar para la ejecución de los trabajos de inyección.
2	Decisión sobre el método de inyección, comprobaciones y ensayos preliminares si son necesarios; obtención de una especificación.
3	Obtención de las autoridades y terceras partes, de todas las autorizaciones legales necesarias para la ejecución.
4	Proyecto completo de la estructura a inyectar y definición de la categoría geotécnica.
5	Consideración de las fases provisionales de ejecución que sean importantes.
6	Valoración de los datos de investigación del lugar con respecto a las hipótesis del proyecto.
7	Valoración de la viabilidad de construcción del proyecto.
8	Realización de las comprobaciones que sean necesarias y de todos los ensayos pertinentes.
9	Evaluación de los resultados de las comprobaciones y ensayos preliminares.
10	Selección del sistema de inyección.
11	Valoración del sistema de inyección y definición de los procedimientos de trabajo.
12	Definición de las dimensiones, ubicación y orientación de los elementos a inyectar.
13	Instrucciones relativas a la secuencia de trabajo, si fuesen necesarias.
14	Definición de la secuencia de trabajo.
15	Instrucción a todas las partes implicadas en lo relativo a los elementos esenciales según los criterios del proyecto que deben recibir una atención especial.
16	Especificación para el control de los efectos de los trabajos de inyección sobre las estructuras adyacentes (tipo y precisión de los instrumentos, frecuencia de las mediciones) y para interpretar los resultados.
17	Definición de los límites tolerables de los efectos de los trabajos de inyección sobre las estructuras adyacentes.
18	Ejecución de los trabajos de inyección, incluyendo el control de los parámetros de inyección.
19	Supervisión de los trabajos, incluyendo la definición de los requisitos de calidad.
20	Control de los efectos de los trabajos de inyección sobre las estructuras adyacentes y presentación de los resultados.
21	Control de calidad de los trabajos.

5 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA

5.1 La inyección es un método de tratamiento del terreno y debe ser proyectada sobre la base de las características geotécnicas del terreno; por tanto, es esencial realizar una investigación geotécnica precisa.

5.2 Toda investigación geotécnica debe ser realizada de acuerdo con los requisitos y recomendaciones de la Norma Europea Experimental ENV 1997-1:1994, en particular con respecto a las categorías geotécnicas que figuran en los apartados 2.1, 3.2 y 3.3 de la misma.

5.3 Cuando sea posible, la investigación geotécnica debe ser ampliada al contorno del lugar, de forma que la estructura del suelo pueda ser interpolada entre los ejes investigados, mejor que la extrapolación se haga fuera de ellos.

5.4 Se debe prestar una consideración especial a las siguientes condiciones geotécnicas:

- estratos o lentejones sedimentarios cohesivos, firmes o consistentes;
- alto contenido orgánico;
- terrenos esponjosos;
- arcillas muy sensibles o movedizas;
- estratos o lentejones sedimentarios cementados;
- posición de la capa o capas freáticas;
- presencia de acuíferos artesianos o confinados;
- altos gradientes hidráulicos;
- terreno o agua agresivos;
- densidad de estratos granulares;
- guijarros y/o piedras;
- grandes huecos o alta permeabilidad;
- sedimentos o residuos químicos.

5.5 Además de la litología y estratigrafía del terreno, de acuerdo con la Norma Europea Experimental ENV 1997-1:1994, también se deben determinar las siguientes características y parámetros, bien en laboratorio y/o bien mediante ensayos a pie de obra, según sea aplicable

- distribución granulométrica, contenido de humedad, límites Atterberg;
- densidad, por medición directa o indirecta;
- resistencia al deslizamiento de capas, por medición directa o indirecta.

5.6 Para identificar las variaciones de densidad se deben realizar ensayos mecánicos a pie de obra.

6 MATERIALES

- 6.1** A no ser que se especifique otra cosa, las propiedades de los materiales deben satisfacer las normas europeas.
- 6.2** Normalmente, se adoptan mezclas compuestas de agua y de cemento.
- 6.3** Se pueden utilizar aglomerantes hidráulicos distintos al cemento.
- 6.4** En las mezclas de agua/cemento la relación en peso agua/cemento debe estar comprendida entre 0,5 y 1,5.
- 6.5** A la mezcla agua/cemento se pueden añadir aditivos reductores de agua, estabilizadores, plastificantes, impermeabilizantes o antilavado.
- 6.6** A la mezcla también se pueden añadir otros materiales, tales como bentonita, fillers o cenizas volantes.
- 6.7** Cuando en la mezcla se vaya a utilizar bentonita, antes de añadir el cemento se debe preparar una suspensión de agua/bentonita.
- 6.8** Normalmente, cualquier tipo de agua con potabilidad reconocida es aceptable para preparar las mezclas de inyección.
- 6.9** Las aguas procedentes de fuentes que no sean de potabilidad reconocida deben ser analizadas, a fin de asegurar que no producen efectos adversos en el fraguado, endurecimiento o durabilidad de la mezcla y, cuando sea aplicable, que no favorecen la corrosión de la armadura del hormigón.
- 6.10** Si el cemento no cumple con la Norma Europea Experimental ENV 197-1:1992, se deben realizar los ensayos apropiados con el fin de comprobar que se cumplen los requisitos de tiempo de fraguado, endurecimiento, resistencia y durabilidad, según lo establecido en la especificaciones del proyecto.
- 6.11** Se debe extremar el cuidado para comprobar que no existan partículas grandes en los materiales de inyección, dado que los mismos pueden bloquear las boquillas.
- 6.12** Los criterios de aceptación y los métodos de ensayo del agua, según lo requerido en el apartado 6.9 anterior, deben estar de acuerdo con el proyecto de Norma Europea prEN 1008:1997.
- 6.13** Cuando la armadura del hormigón se realiza con barras de acero, el material debe cumplir con lo establecido en los capítulos 3 y 6, según corresponda, de Norma Europea Experimental ENV 1992-1-1:1991.
- 6.14** Cuando para la armadura se utilice un material distinto a las barras de acero, dicho material debe cumplir las normas nacionales o las especificaciones técnicas del proyecto.

7 CONSIDERACIONES DEL PROYECTO

7.1 Generalidades

7.1.1 La inyección se puede aplicar con distintas finalidades, tanto en trabajos temporales como permanentes. Por ejemplo:

- realización de cimientos para estructuras que se vayan a construir (figura 5 a);
- apuntalamiento de cimientos existentes (figura 5 b);
- construcción de barreras de baja permeabilidad;
- construcción de estructuras de retención o de apoyo;

- complementación de otros trabajos geotécnicos;
- refuerzo de una masa de terreno.

7.1.2 El proyecto de los trabajos de inyección debe especificar que las brocas de los taladros han de estar situados por encima de la capa freática.

7.1.3 Cuando las bocas de los taladros estén situados por debajo de la capa freática o altura artesiana, se deben adoptar medidas especiales para evitar la colocación de tuberías a través de los taladros.

7.1.4 En el proyecto debe estar claramente definida la finalidad de los trabajos de inyección. Las propiedades físicas especificadas y la configuración geométrica de los elementos o estructuras inyectados deben ser las adecuadas para conseguir dicha finalidad.

7.1.5 Las condiciones técnicas que puedan influir en la secuencia de trabajo de los elementos deben ser especificadas.

7.1.6 Cuando sea aplicable, en los planos de ejecución se deberá mostrar la secuencia detallada de ejecución.

7.1.7 Si el proyecto de los trabajos de inyección no puede ser completado debido a una deficiente investigación a pie de obra, y no es posible obtener la información que falta mediante una investigación adicional del terreno, se deberá especificar un ensayo preliminar adecuado del terreno a pie de obra.

7.1.8 Cuando no se disponga de experiencia previa para comparar, se debe realizar un ensayo preliminar representativo a pie de obra, utilizando el equipo, materiales y técnicas que se hayan propuesto para los trabajos principales de inyección.

7.1.9 Para asegurar un resultado coherente en la prueba preliminar a pie de obra, se deberá construir, al menos, un elemento inyectado, siguiendo un procedimiento de trabajo establecido. En condiciones de terreno muy heterogéneas, se deben realizar más elementos de prueba y utilizar diferentes procedimientos de trabajo.

7.1.10 Cuando el material inyectado vaya a estar sometido a condiciones severas, tales como grandes esfuerzos o resistencia a causa de un entorno ambiental agresivo, los ensayos preliminares a pie de obra deben ir precedidos por ensayos de laboratorio especificados sobre muestras del terreno que va a ser tratado, y la lechada de cemento debe ir mezclada en las proporciones adecuadas a la gama de trabajo prevista.

7.1.11 Para ensayos mecánicos sobre material inyectado se deberán especificar las condiciones de ensayo de las muestras y el criterio de aceptación.

7.1.12 Las tolerancias sobre los parámetros de rendimiento especificados deben tener en cuenta la precisión de los métodos de ensayo propuestos, especialmente cuando estos métodos sean indirectos, tal como los citados en el anexo C.

7.1.13 Siempre que la aceptación esté definida en base a ensayos sobre muestras de sondeo, en el proyecto se debe especificar el criterio para la colocación y el cálculo de tiempo de las tomas de muestras propuestas en la estructura inyectada.

7.1.14 Los parámetros del proyecto deben tener en cuenta las dificultades de construcción que puedan reducir la eficacia de la mezcla de inyección.

7.1.15 Con objeto de evitar fallos locales del terreno, o asientos, o levantamientos inaceptables del terreno, se debe considerar la secuencia y régimen de ejecución, los tiempos de fraguado y de endurecimiento, y el diámetro de las columnas.

7.1.16 El proyecto debe definir los límites aceptables de asentamiento, de desplazamiento lateral u horizontal de alguna capa del terreno, la distorsión de las estructuras y los servicios que posiblemente puedan resultar afectados por los trabajos de inyección.

7.1.17 El proyecto de los trabajos de inyección debe cumplir lo establecido en el anexo A.

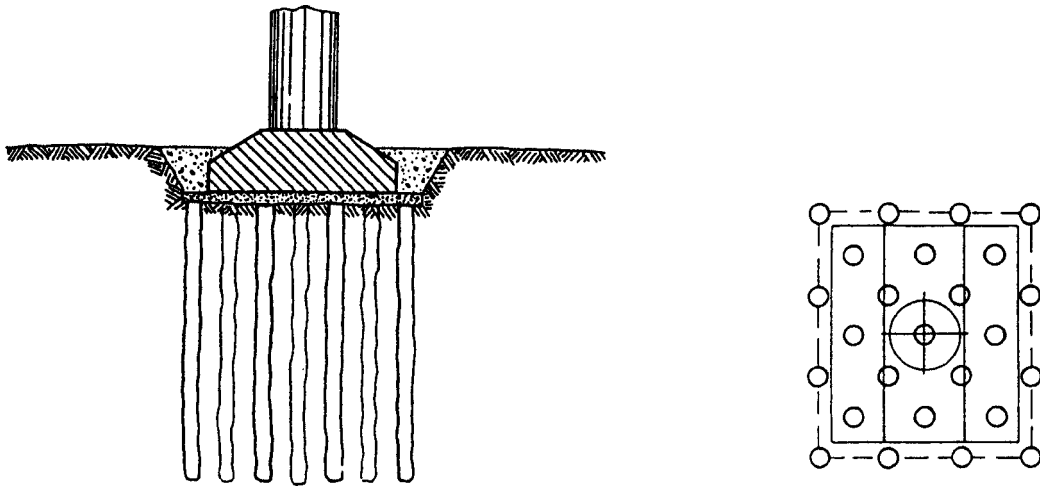


Fig. 5 a) – Cimentación de la estructura a construir

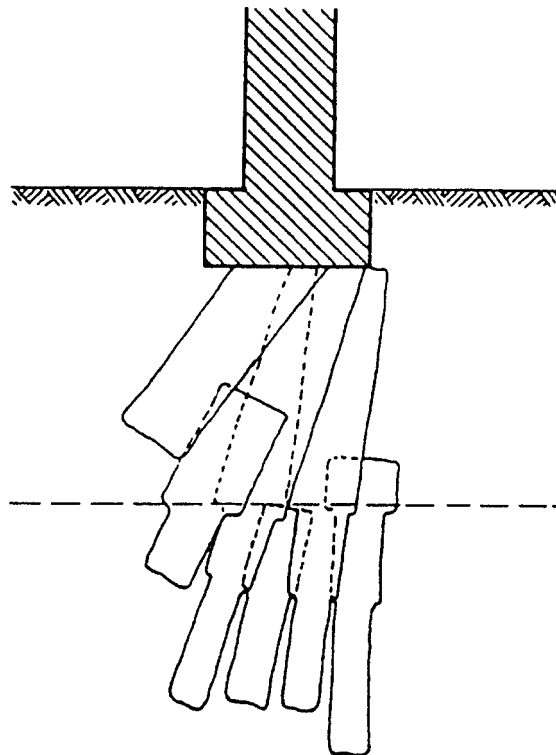


Fig. 5 b) – Apuntalamiento de cimentación existente

Fig. 5 – Ejemplos de aplicaciones

7.2 Configuración geométrica

7.2.1 Las dimensiones de la sección de un elemento inyectado no solamente dependen del sistema de inyección elegido y de los parámetros utilizados, sino también del tipo de terreno y de su heterogeneidad.

7.2.2 El proyecto debe tener en cuenta las tolerancias de construcción indicadas en los apartados 8.4.3, 8.4.4, y 8.5.6, o deberá proponer valores diferentes para las mismas.

7.2.3 En los planos del proyecto debe aparecer claramente lo siguiente:

- las dimensiones mínimas de las secciones de los elementos inyectados que se van a obtener en los diferentes estratos del terreno que irán apareciendo;
- las tolerancias en la posición y en la inclinación de los ejes de los elementos (véanse los apartados 8.4.3 y 8.4.4).

7.2.4 Las dimensiones máximas de las secciones también deben ser consideradas y relacionadas con el espaciado del elemento, a fin de asegurar la integridad de la estructura inyectada.

7.2.5 Si algún obstáculo subterráneo identificado no puede ser suprimido, el área afectada deberá ser marcada en los planos del proyecto, y el tratamiento de la inyección adyacente debe ser proyectado de forma que se eviten daños inaceptables.

7.3 Características de resistencia y de deformación

7.3.1 La resistencia de un material inyectado depende tanto del sistema de inyección seleccionado como de los parámetros utilizados, y también del tipo de terreno y de su heterogeneidad.

7.3.2 En aplicaciones de apuntalamiento se debe tener en cuenta la estabilidad y la deformación, en el período transitorio previo al fraguado, de las columnas inyectadas debajo de las cimentaciones.

7.3.3 Cuando las deformaciones de los elementos inyectados o de las estructuras inyectadas constituyan una preocupación importante, el proyecto deberá indicar los parámetros a medir en los ensayos de aceptación especificados, la gama de sus valores y los valores medios aplicables (valor medio sobre el elemento, sobre partes más grandes de la estructura, sobre toda la estructura).

7.3.4 La resistencia mínima estadística requerida de la masa debe ser establecida en la fase de proyecto, teniendo en consideración la variabilidad de las condiciones del terreno.

7.3.5 En muchos casos, debido a la limitada experiencia previa, será imposible ajustar un grado práctico de dispersión. En estas circunstancias la dispersión solamente puede ser identificada mediante ensayos a pie de obra.

7.3.6 Cuando se vayan a utilizar métodos indirectos para comprobar los resultados, los criterios de aceptación deben ser expresados en el proyecto, en términos de parámetros reales a medir.

7.3.7 Las columnas inyectadas se pueden reforzar mediante elementos de alta resistencia (barras, tubos, perfiles) instalados durante o después de las operaciones de inyección de lechada de cemento a presión.

7.4 Permeabilidad

7.4.1 Cuando los trabajos de inyección de lechada de cemento a presión se utilicen para el control de aguas freáticas, los resultados dependen de la precisión geométrica de los elementos y de la permeabilidad del material inyectado.

7.4.2 Los requisitos de permeabilidad deben ser expresados en el proyecto en términos de valores límites de parámetros realmente medidos en ensayos de aceptación especificados.

El proyecto debe especificar las condiciones de medición de la permeabilidad del material inyectado, y de la permeabilidad de toda la estructura inyectada.

7.4.3 La permeabilidad total de una estructura inyectada debe ser evaluada teniendo en cuenta los efectos de deformación debidos a la excavación o a las condiciones de carga a escala global.

8 EJECUCIÓN

8.1 Generalidades

8.1.1 La ejecución de los trabajos de inyección requiere el conocimiento y la experiencia necesarios en este tipo de construcción.

NOTA – La alta presión utilizada en los procesos de inyección tiene por objeto generar un chorro a alta velocidad para desagregar el terreno, sin que se aplique al terreno circundante.

8.1.2 Método de ejecución de una columna inyectada. Las fases de ejecución generalmente consisten en:

- perforación de un taladro de una longitud determinada;
- introducción hasta el fondo del taladro una lanza hidráulica conectada a la sarta de inyección. Esto es innecesario en aquellos casos en que la sarta de inyección y la lanza hidráulica se utilizan para la perforación;
- inyección del fluido o fluidos de desagregación y de cementación a través de la lanza hidráulica, simultáneamente con la rotación de los vástagos y del dispositivo extractor, teniendo preestablecidas la velocidad de rotación y de extracción, la presión de bombeo y el caudal de cada fluido.

8.1.3 Método de ejecución de un panel inyectado. Las fases de ejecución son las mismas que se han definido para las columnas inyectadas, con la excepción de que durante la inyección los vástagos se extraen sin rotación o con una rotación alterna entre 2 ángulos límite. El panel resultante está colocado en un plano sobre el eje de perforación, o está formado por dos o más secciones sobre planos que intersectan el eje de perforación (figura 1 b).

8.1.4 Métodos de ejecución alternativos. Si las condiciones del terreno lo requieren, se pueden adoptar métodos de ejecución alternativos para los procesos de columnas y para los de panel. Entre los métodos alternativos, el más usual es el de preinyección. Un elemento también se puede realizar en pasos secuenciales: primeramente se completa el tratamiento para una longitud dada a partir de la embocadura del taladro y se espera hasta que haya alcanzado una cierta resistencia. Luego, después de volver a perforar el terreno tratado, se repite el proceso hasta un nivel más profundo, y así hasta que se alcanza la longitud proyectada del tratamiento.

8.1.5 Exposición del método

8.1.5.1 Antes de iniciar los trabajos de inyección, se debe presentar una exposición del método elegido. Esta exposición del método debe contener, como mínimo, la siguiente información:

- identificación, objetivo y extensión de los trabajos de inyección;
- descripción del terreno;
- forma del elemento inyectado que se requiere;
- sistema de inyección;
- proyecto del tratamiento de inyección;
- procedimiento de trabajo (perforación, inyección, secuencia de ejecución);

- parámetros de la inyección;
- materiales (para la perforación y la inyección);
- precauciones a tomar para evitar asentamiento o crecimiento inaceptables, especialmente en terrenos fangosos y arcillosos;
- emplazamiento y áreas de trabajo;
- planta y equipo;
- gestión del material sacado de la excavación;
- procedimientos de control de calidad, según sean requeridos por el contrato;
- las medidas a tomar para garantizar la exactitud del sondeo;
- procedimientos relativos a posibles interrupciones durante las operaciones de inyección;
- las medidas a tomar para garantizar que el nivel de acabado de la lechada de cemento se mantiene durante el fraguado inicial del material inyectado;
- posibles modificaciones de los parámetros de la inyección durante los trabajos;
- los métodos de ensayo;
- los documentos de trabajo (planos, informes).

8.1.5.2 Para los trabajos de inyección de categoría geotécnica 3 (apartado 2.1 de la Norma Europea Experimental ENV 1997-1:1994) se debe presentar una declaración del método a seguir, que incluya la información relacionada en el apartado **8.1.5.1**.

8.1.6 En el anexo B están relacionadas las gamas de los parámetros de la inyección, generalmente adoptadas para los diferentes sistemas.

8.2 Equipo

8.2.1 El equipo de inyección generalmente está formado por:

- la torre de perforación;
- la torre de inyección (frecuentemente es también la torre de perforación), equipada con la sarta de inyección, la lanza hidráulica y los dispositivos que permiten accionar la sarta de inyección a las velocidades de rotación y traslación predeterminadas;
- la planta de mezclado y de bombeo, que suministran el fluido (o fluidos) de inyección;
- los conductos de alta presión, que conectan la bomba de inyección a la torre de inyección;
- el equipo para el control de las presiones, de los caudales y volúmenes de fluidos, de los regímenes de rotación y de extracción del material sobrante, y la profundidad.

8.2.2 El equipo de inyección debe ser apto para realizar la operación de inyección de acuerdo con el proceso elegido, asegurando:

- el movimiento de traslación y de rotación de la sarta de inyección con la velocidad indicada en el proyecto;
- el suministro a la sarta de inyección de los fluidos procedentes de la planta, a la presión y caudal requeridos.

8.2.3 La longitud de la sarta de inyección y la altura del mástil correspondiente no deben ser menores que la longitud, según proyecto, del elemento a inyectar. Si a causa de profundidades mayores o por limitaciones de acceso es necesario dividir la sarta de inyección, se deberá hacer en el mínimo número de elementos, a fin de minimizar la necesidad de interrumpir la operación de inyección.

8.2.4 La sarta de inyección consiste en:

- para el sistema sencillo, un conducto que transporta la mezcla de cemento a alta presión hasta la lanza hidráulica;
- para el sistema doble, dos conductos que transportan por separado los dos fluidos (mezcla de aire y cemento o mezcla de agua y cemento) hasta la lanza hidráulica;
- para el sistema triple, tres conductos para llevar el agua a alta presión, el aire comprimido, y la mezcla de cemento hasta la lanza hidráulica.

Los conductos múltiples se montan en el mismo vástago.

8.2.5 La lanza hidráulica comprende:

- para el sistema sencillo, una o más boquillas circulares para inyectar la lechada de cemento. Las boquillas múltiples están situadas al mismo nivel o a distintos niveles, con ángulos mutuos alternados constantes;
- para el sistema doble (aire), una o más boquillas dobles (situadas al mismo nivel o a distintos niveles con ángulos mutuos alternados constantes) que permiten la inyección simultánea de aire y de la lechada de cemento. La boquilla de aire consiste en un anillo alrededor de la boquilla circular de la lechada de cemento;
- para el sistema doble (agua), una o más boquillas para la inyección de agua a alta presión y una o más boquillas, más profundas, para enviar la mezcla de cemento;
- para el sistema triple, una o más boquillas dobles que permiten la inyección simultánea de aire y de agua, y una o más boquillas sencillas, situadas a un nivel más profundo, que permiten la inyección de la lechada de cemento.

En general, las boquillas de aire-agua y las boquillas de lechada de cemento, están colocadas formando pareja a 180° una de otra. Las parejas múltiples están instaladas formando ángulos mutuos constantes.

8.2.6 La planta de mezclado y de elaboración de la lechada de cemento para la inyección, para los diferentes sistemas, comprende principalmente:

- para el sistema sencillo: almacenaje del cemento y de otros materiales, la planta de mezclado coloidal, los depósitos agitadores, y la bomba de alta presión para la lechada;
- para el sistema doble (aire): igual que para el sistema de fluido sencillo más un compresor de aire;
- para el sistema doble (agua): igual que para el sistema de fluido sencillo, más una bomba de agua de alta presión y una bomba para la lechada de cemento;
- para el sistema triple: igual que para el sistema de fluido doble (agua), más un compresor de aire.

8.3 Trabajos preliminares

8.3.1 Se debe disponer de una plataforma de trabajo estable y seca.

8.3.2 La posición de cada sondeo a inyectar debe estar localizada e identificada de forma precisa.

8.3.3 Se debe disponer de un sistema de recogida y eliminación del material sobrante de retorno.

8.3.4 Para el tratamiento horizontal se deben tomar las medidas necesarias para mantener la estabilidad de la cara de trabajo.

8.3.5 Las disposiciones del proyecto relativas a la configuración geométrica y a la condición estructural de las estructuras próximas, deben ser verificadas con precisión antes de que se realicen los trabajos de inyección.

8.4 Perforación

8.4.1 La perforación se puede realizar con aire, con agua, con lodos, con lechadas de cemento, o con espumas, como medio lavador. Si se requiere se puede usar entubación.

8.4.2 Cuando el pozo de sondeo sea inestable, o haya pérdidas significativas del fluido de perforación, o cuando las condiciones del terreno no sean las idóneas para impedir que haya material de retorno en exceso, se deberán adoptar medidas preventivas adecuadas.

8.4.3 La desviación del punto de inicio de la perforación respecto a la posición teórica debe ser inferior a 50 mm; en caso contrario debe estar declarado en las especificaciones del proyecto.

8.4.4 La desviación de la perforación respecto al eje teórico debe ser del 2% o menor para profundidades de hasta 20 m. Para profundidades mayores y para inyección horizontal se aplicarán tolerancias diferentes.

8.4.5 El espacio anular entre el pozo perforado y la sarta de inyección debe ser suficiente para permitir que el material sobrante de retorno fluya libremente a la boca del pozo de sondeo

8.4.6 Cuando se encuentren obstrucciones inesperadas en el subsuelo, se deberán tomar las medidas apropiadas para evitar efectos no deseados en la fase de inyección.

8.5 Inyección de lechada de cemento a presión

8.5.1 La inyección debe ser realizada y supervisada por personal entrenado y experimentado.

8.5.2 Para el método de panel, la dirección de los elementos adyacentes se debe desviar respecto al plano medio para facilitar la conexión entre los paneles y, en consecuencia, la continuidad del muro.

8.5.3 Para el método de panel, la orientación de las boquillas de inyección debe estar controlada de forma precisa.

8.5.4 Cuando la pérdida de agua sea crítica para la inyección, se deberá verificar la zona de contacto con el terreno o estructura circundante.

8.5.5 En las aplicaciones apuntaladas se deberán tomar medidas para asegurar que se tiene un contacto final íntimo entre la superficie superior de la columna inyectada y la cara inferior de la cimentación.

8.5.6 La inyección se debe realizar con un espesor suficiente entre la boquilla superior y la superficie del terreno, para evitar una posible hidrofracturación local.

NOTA – El espesor anterior puede variar desde 0,5 m para pozos de sondeo verticales, hasta 2,0 m para pozos de sondeo horizontales, y puede ser reducida si existe una fijación adecuada a la superficie, tal como una placa o un muro.

8.5.7 Para inyección horizontal, la boca del pozo de sondeo se debe tapar tan pronto como la inyección esté completada.

8.5.8 Cuando por alguna razón se interrumpa la inyección de un elemento, el reinicio debe ser acometido empleando procedimientos que aseguren la continuidad del elemento.

8.6 Material sobrante de retorno

8.6.1 Durante la inyección se debe mantener una observación visual del flujo y características del material sobrante de retorno en la boca del pozo de sondeo.

8.6.2 Se puede obtener un control adicional midiendo las propiedades físicas o químicas del material sobrante de retorno.

8.6.3 Si durante la inyección se observa un comportamiento inesperado del material sobrante de retorno, se deben revisar los parámetros y/o el método de inyección.

8.6.4 Una reducción inesperada del material sobrante de retorno debe ser investigada y tratada de forma inmediata. Esto puede ser debido a obstrucción del espacio anular del pozo de sondeo que se está inyectando.

8.7 Colocación de la armadura

La armadura se puede instalar en el material fresco inyectado durante o inmediatamente después de terminadas las operaciones de inyección. Alternativamente, también se puede instalar en una perforación realizada sobre el elemento después del endurecimiento.

9 SUPERVISIÓN, ENSAYO Y CONTROL

9.1 Generalidades

9.1.1 Para fines de control se deben verificar las siguientes características de los elementos inyectados:

– configuración geométrica;

y, cuando corresponda:

– la resistencia, deformabilidad, permeabilidad o densidad del material inyectado.

9.1.2 Generalmente, no es práctico o posible medir las dimensiones y las propiedades del material directamente sobre un número estadísticamente significativo de elementos inyectados.

9.1.3 El control de calidad mínimo de la inyección consistirá en el informe de los parámetros de la inyección y en la observación del material sobrante de retorno de todos los elementos inyectados.

9.1.4 Se puede asumir que, en condiciones de terreno comparables, los mismos parámetros de la inyección producen las mismas dimensiones de los elementos, propiedades y material sobrante de retorno.

9.1.5 En los trabajos de inyección, después de que se hayan construido los cinco primeros elementos, las medidas de las dimensiones y las propiedades del material se deben tomar sobre un número limitado de elementos, para establecer la relación entre los parámetros de la inyección y las propiedades del elemento.

9.1.6 Cuando se disponga de experiencia para comparar (según lo definido en el apartado 1.5.2 de la Norma Europea Experimental ENV 1997-1:1994) sobre el mismo sistema de inyección, en condiciones de suelo similares, los ensayos después de la ejecución se pueden omitir si las especificaciones del proyecto no los requieren y está dispuesto que el control de los parámetros de inyección se aplique a los elementos inyectados del trabajo.

9.2 Ensayos preliminares

9.2.1 Cuando no se disponga de experiencia comparable, se deberá proyectar y realizar un adecuado ensayo preliminar a pie de obra. Éste deberá abarcar todas las condiciones pertinentes probables que se puedan encontrar en el lugar de la instalación, a fin de:

- permitir una selección del sistema más efectivo y de los parámetros de la inyección;
- verificar que los resultados son conformes a los requisitos del proyecto, empleando el sistema y los parámetros de inyección seleccionados.

9.2.2 Cuando se realicen ensayos preliminares, si la excavación es posible, se deberá efectuar la valoración de las características geométricas y mecánicas mediante inspección visual de los elementos inyectados expuestos y mediante ensayos de laboratorio sobre muestras recogidas por extracción de testigos o por excavación.

9.2.3 Cuando se realicen ensayos preliminares, si los elementos inyectados no pueden ser expuestos, la valoración de los resultados (principalmente las dimensiones de los elementos) se debe efectuar por extracción de testigos o por medición directa antes del fraguado o por ensayos indirectos.

9.2.4 Si la extracción de testigos o los ensayos indirectos anteriores se aplican para comprobar la configuración geométrica "según se construye" de los elementos de los trabajos principales, y es posible la inspección visual de los elementos preliminares, los mismos métodos se deben aplicar también a los elementos preliminares, y sus resultados deben ser comparados mediante inspección visual para comprobar la fiabilidad de los métodos.

9.2.5 Los ensayos indirectos y los ensayos de laboratorio realizados sobre muestras recogidas por extracción de testigos deben ser seleccionados cuidadosamente, considerando las limitaciones prácticas de la fiabilidad de dichos ensayos.

9.2.6 En el anexo C se facilita una relación de algunos ensayos indirectos que se pueden realizar.

9.3 Supervisión y ensayo del proceso

9.3.1 Los manómetros y otros instrumentos utilizados para medir los parámetros de la inyección deben ser calibrados antes de comenzar los trabajos.

9.3.2 La presión de los fluidos, normalmente, se miden como presión de la bomba. En los casos en que existan largas canalizaciones o un tratamiento muy profundo, será necesario tener en cuenta las pérdidas de carga.

9.3.3 En contratos de larga duración, el control de calidad puede requerir la calibración periódica de los instrumentos.

9.3.4 La inclinación de los elementos inyectados se debe calcular midiendo la inclinación de la sarta de inyección en la superficie antes y durante la inyección, si en el proyecto no se ha especificado otra cosa.

9.3.5 El caudal del material sobrante de retorno y sus características deben ser observados visualmente y se anotará la descripción de ambas circunstancias.

9.3.6 La densidad del material sobrante de retorno debe ser medida y anotada periódicamente. Las causas de cualquier resultado inesperado deben ser examinadas.

9.3.7 Se deben tomar muestras representativas del material sobrante de retorno y se enviarán para ser sometidas a ensayos de compresión.

9.3.8 Sobre la mezcla de lechada de cemento se deben realizar los siguientes ensayos:

- ensayos preliminares:
 - densidad;
 - decantación (en 3 horas sobre un cilindro de 60 mm de diámetro y 1 000 cm³ de volumen;

- viscosidad Marsh;
- tiempo de fraguado;
- ensayos de compresión simple sobre muestras cilíndricas (relación altura /diámetro 2,0) a 3 días, 7 días, y 28 días; 56 días si se emplean mezclas de endurecimiento muy lento;
- ensayos durante la fase de trabajo:
 - densidad (al menos dos veces en una jornada de trabajo); viscosidad Marsh (diario);
 - decantación (diario).

9.4 Ensayo sobre los elementos contruidos

9.4.1 Ensayo para evaluar la configuración geométrica

9.4.1.1 La inspección visual y la medición directa son los métodos más efectivos para la valoración de las dimensiones. Esto requiere grandes excavaciones, preferiblemente a lo largo de todo el elemento y, por tanto, es difícilmente viable de realizar sobre elementos a incorporar en el trabajo.

9.4.1.2 Cuando la inspección visual no es posible, la información sobre las dimensiones transversales de un elemento se puede obtener a partir de la extracción de testigos o por perforación con medición del régimen de perforación, inclinada hacia el eje del elemento.

9.4.1.3 La longitud de un elemento se puede calcular por extracción de testigos, por perforación o por ensayo de penetración paralelo a su eje. Esto es tanto más difícil cuanto mayor sea la esbeltez, y está prácticamente excluido cuando la relación de la longitud al diámetro exceda de 15.

9.4.1.4 Cuando se realice la extracción de testigos, se debe medir la inclinación del eje de extracción, y la localización y la inclinación del eje del elemento inyectado que han tenido que ser determinadas previamente.

9.4.1.5 La extracción de testigos solamente debe ser realizada después de que haya transcurrido un tiempo de endurecimiento suficiente.

9.4.1.6 Para el método de extracción de testigos, el equipo utilizado y el tamaño de los testigos debe ser tal que asegure que se obtienen muestras representativas. Se necesitan precauciones especiales cuando se realice la extracción de testigos de elementos inyectados formados en terrenos arcillo-limosos o en terrenos heterogéneos (por ejemplo, que contienen guijarros) o si el material inyectado es de baja resistencia.

9.4.2 Ensayos mecánicos

9.4.2.1 Cuando se realicen ensayos a pie de obra para medir las características mecánicas del material inyectado (penetrómetro, manómetro o cualquier otro ensayo que requiera perforación), la posición del instrumento de medición debe estar definida y establecida con respecto a la configuración geométrica del elemento.

9.4.2.2 Los ensayos de compresión se deben realizar sobre muestras que tengan una relación de altura a grosor de 2,0.

9.4.2.3 Cuando sea aplicable, la resistencia de compresión de las estructuras inyectadas debe ser evaluada mediante ensayo sobre cuatro muestras tomadas de la estructura por cada 1 000 m³ de su volumen, si en el proyecto no se especifica otra cosa.

9.4.2.4 Cuando las propiedades mecánicas se obtienen a partir de ensayos sobre testigos, se debe tener cuidado para prever los efectos de la toma de muestras, de la preparación de la muestra y de los procedimientos de ensayo.

9.4.2.5 La tendencia de la resistencia y del rendimiento a aumentar con el tiempo depende, en gran medida, del tipo de terreno, con una evolución más lenta cuanto mayor sea el contenido de finos.

9.4.2.6 Los ensayos brasileños de tracción¹⁾ y los ensayos de corte también se pueden realizar sobre testigos, si es requerido por una aplicación específica.

9.4.2.7 Los ensayos de carga a pie de obra de los elementos inyectados pueden ser adecuados cuando éstos no se utilizan como cimentaciones profundas.

9.4.2.8 Los ensayos mecánicos deben ser realizados en tiempos adecuados después del fraguado del material inyectado, teniendo en cuenta tanto los requisitos de construcción como la influencia de la naturaleza del terreno sobre el tiempo de endurecimiento del material inyectado.

9.4.2.9 Las muestras tomadas para ensayos mecánicos se deben almacenar bajo condiciones de humedad y de temperatura controladas.

9.4.3 Ensayos de permeabilidad

9.4.3.1 La permeabilidad global de las estructuras inyectadas debe ser evaluada mediante ensayos de bombeo y/o lecturas piezométricas.

9.4.3.2 La permeabilidad global de una estructura inyectada alrededor y/o por debajo de una excavación, de las categorías geotécnicas 2 y 3, debe ser evaluada mediante ensayos de bombeo y lecturas piezométricas antes de que se realice cualquier excavación por debajo del nivel freático original.

9.4.3.3 La permeabilidad de los elementos se puede medir mediante ensayos de agua en el taladro.

9.5 Control

9.5.1 El control de los parámetros de la inyección durante la ejecución de los trabajos de inyección es esencial para el control de calidad de los resultados.

9.5.2 Para aplicaciones de categorías geotécnicas 2 y 3, los siguientes parámetros deben ser registrados continuamente para todos los elementos, excepto para periodos cortos debidos a fallos inevitables del equipo:

- presiones y caudales de los fluidos;
- velocidades de traslación y de rotación de la lanza hidráulica.

9.5.3 Cuando los trabajos de inyección se tengan que realizar en situaciones en que haya alto riesgo de deformaciones inaceptables de las estructuras adyacentes, se deben emplear sistemas de control y de alarma.

9.5.4 En aplicaciones de apuntalamiento, los elementos a apuntalar deben ser controlados por nivelación repetida o por sensores automáticos de asentamiento.

10 DOCUMENTOS SOBRE LA EJECUCIÓN DEL TRABAJO

10.1 Documentos disponibles en obra

10.1.1 Los siguientes documentos deben estar disponibles en obra antes del inicio de los principales trabajos de inyección:

- especificaciones técnicas;
- planos de ejecución;
- exposición del método, si se requiere (véase el apartado 8.1.5);

1) El ensayo brasileño se realiza sobre una muestra cilíndrica (relación altura/grosor = 0,5) sometida a compresión a lo largo de un plano diametral, y se interpreta en términos de resistencia a la tracción del material ensayado.

- un informe geotécnico que describa las condiciones del suelo;
- especificación técnica de la planta de inyección;
- una descripción de las características de los materiales;
- un informe sobre los ensayos preliminares, si se han realizado.

10.1.2 Los planos de ejecución de los trabajos de inyección deben contener la siguiente información:

- el perfil del terreno;
- la forma de los elementos;
- el número de elementos, con una referencia numérica clara para cada uno de ellos;
- la situación y orientación de cada elemento, y las tolerancias sobre la posición;
- la situación de posibles obstrucciones subterráneas, servicios y drenajes;
- la secuencia de ejecución, cuando sea importante.

10.2 Documentos a preparar en obra

10.2.1 Para futuras referencias, se deben recopilar y conservar los registros de ejecución de los trabajos de inyección. Estos registros deben comprender, para cada elemento:

- parámetros de la inyección;
- comentarios sobre el material sobrante de retorno;
- características no previstas;
- fecha y tiempo de ejecución.

NOTA - En el anexo D se dan ejemplos de los registros a preparar en obra.

10.2.2 Cuando se hayan realizado pruebas preliminares a pie de obra, se debe preparar un informe detallado en el que se incluyan todos los resultados obtenidos con referencia a las condiciones predominantes del terreno y al tamaño de los elementos inyectados que se van a construir.

10.2.3 El plan y todos los registros de ejecución de la inyección se deben conservar después de la terminación de los trabajos.

11 REQUISITOS ESPECIALES

11.1 Conformidad con las normas nacionales

La ejecución de los trabajos de inyección debe estar conforme con todas las normas nacionales, y las especificaciones o requisitos legales referentes a:

- seguridad en el lugar de trabajo;
- seguridad de los procedimientos de trabajo;
- seguridad operacional de la perforación, de la inyección y de los equipos y herramientas auxiliares;
- protección ambiental.

11.2 Seguridad en el lugar de trabajo

11.2.1 Se deben tomar las medidas adecuadas para proteger la salud y la seguridad de los operarios y de todas las personas presentes en el lugar de trabajo y en el entorno adyacente.

11.2.2 La legislación de los países de la Comunidad Europea debe ser respetada; se deben determinar los riesgos contra la salud y de seguridad asociados a la inyección, en base al lugar de trabajo específico.

11.3 Protección del medio ambiente

11.3.1 Se deben tomar las medidas necesarias para limitar o evitar efectos adversos en el medio ambiente.

NOTA – Se debe prestar atención a las normas nacionales y a los requisitos establecidos por la ley relativos a la protección ambiental.

11.3.2 Se deben considerar los siguientes riesgos para el medio ambiente:

- movimiento inducido en el suelo o en las estructuras adyacentes;
- contaminación de las aguas de superficie y freáticas;
- cambios inaceptables en el flujo natural de las aguas freáticas;
- contaminación del aire;
- ruido.

11.3.3 Los métodos de manipulación del material sobrante, incluyendo:

- la recogida en la superficie del pozo de sondeo;
- el almacenaje temporal en el lugar de la obra;
- el posible tratamiento;
- la retirada o desecho final;

deben ser los adecuados para minimizar los efectos adversos para el medio ambiente.

ANEXO A (Normativo)

REQUISITOS ADICIONALES DEL PROYECTO

A.1 El proyecto debe tener en cuenta los esfuerzos previstos en el elemento inyectado y los efectos de variabilidad del terreno sobre la resistencia de los elementos.

A.2 El proyecto debe verificar la estabilidad total de las estructuras y elementos inyectados utilizados para apuntalamiento o como muros de contención, incluyendo el concepto de coeficiente de seguridad parcial definido en la Norma Europea Experimental ENV 1997-1:1994.

ANEXO B (Informativo)

INTERVALOS DE LOS PARÁMETROS DE LA INYECCIÓN

Los parámetros de la inyección generalmente adoptados por los diferentes sistemas están dentro de los intervalos siguientes:

Parámetros de la inyección	Fluido sencillo	Fluido doble (aire)	Fluido doble (agua)	Fluido triple
Presión de la lechada (MPa)	30 a 50	30 a 50	>2	>2
Caudal de la lechada (l/min)	50 a 450	50 a 450	50 a 200	50 a 200
Presión del agua (Mpa)	N/A	N/A	30 a 60	30 a 60
Caudal del agua (l/min)	N/A	N/A	50 a 150	50 a 150
Presión del aire (Mpa)	N/A	0,2 a 1,7	N/A	0,2 a 1,7
Caudal de aire (m ³ /min)	N/A	3 a 12	N/A	3 a 12
N/A No aplicable				

El efecto de desagregación se obtiene por la alta velocidad del chorro, dependiendo principalmente de la presión del fluido usado para la desagregación: lechada de cemento en sistemas de fluido sencillo o de fluido doble (aire) y sistemas de fluido doble (agua) y fluido triple.

Para los sistemas de fluido sencillo y fluido doble (aire) la presión de la lechada de cemento, generalmente, está entre 30 Mpa y 50 MPA, como se define en la tabla anterior. También se han adoptado límites inferiores, por debajo de 10 Mpa en casos particulares, tales como en columnas de pequeño diámetro inyectadas en terrenos poco consistentes.

NOTA – Las desarrollos más recientes de los equipos de bombeo permiten que el fluido de desagregación alcance una presión de 70 Mpa y caudales de 650 l/min.

ANEXO C (Informativo)

ENSAYOS INDIRECTOS

C.1 Se pueden realizar ensayos geofísicos de perforación transversal con el objetivo de comprobar la continuidad de una serie de elementos inyectados solidarios uno con otro.

C.2 Cuando se requiera una alta precisión en la configuración geométrica, la alineación de los sondeos para ensayos geofísicos o extracción de testigos se puede comprobar mediante mediciones de la desviación del pozo de sondeo.

C.3 Cuando se realicen ensayos de perforación transversal se deben medir también las velocidades de las ondas P (perpendiculares) y de las ondas S (transversales).

C.4 Los valores de los módulos de Young E y de cizallamiento G del alargamiento en el campo de las microdeformaciones ($\varepsilon < 10^{-4}$) se pueden obtener indirectamente a partir de las mediciones de velocidad de propagación de las ondas en los ensayos de perforación transversal.

C.5 La configuración geométrica de un elemento inyectado también se puede evaluar mediante CPT's (ensayos de penetración de cono estático) realizados sobre el elemento antes del fraguado. Este método se aplica principalmente a elementos inyectados construidos en terreno con alta resistencia a la penetración comparados con la baja resistencia del material inyectado fresco.

C.6 En determinados casos se pueden emplear otros métodos; por ejemplo, los SPT's (ensayos de penetración normalizados), cono dinámico, o manómetro.

ANEXO D (Informativo)**EJEMPLOS DE ACTOS REALIZADOS A PIE DE OBRA DE LOS TRABAJOS DE INYECCIÓN**

NOTA – Los informes diarios presentados en este anexo son un ejemplo de documentos técnicos empleados a pie de obra como actas de la ejecución de columnas inyectadas, que reflejan una de las posibles elecciones de la organización del lugar de trabajo y del modo de operación de la sarta de inyección.

Se presentan dos informes, ya que frecuentemente una planta de mezclado y de bombeo alimenta alternativamente a una torre en la fase de inyección, mientras una o más torres distintas están realizando trabajos de perforación en el mismo lugar.

La sarta de inyección puede ser extraída mediante un movimiento continuo o mediante un movimiento paso a paso. El segundo modo se refleja en el informe de la torre de inyección que se da en éste anexo, en el que se registra una longitud del paso (generalmente pocos centímetros) y un tiempo por paso (generalmente con gamas de pocos segundos hasta 40 o más segundos, dependiendo del diámetro de la columna, del tipo de terreno y del sistema de inyección).

Informe diario de la planta de inyección

LUGAR: ZONA FECHA: Turno de a	Tipo de bomba: Supervisor: Firma:																									
Instrucciones del supervisor																										
	Valor	Operario																								
Presión del agua (bar)			Control de la lechada <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width:50%;">Hora</th> <th style="width:50%;">Densidad (kg/l)</th> </tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </table>				Hora	Densidad (kg/l)																		
Hora	Densidad (kg/l)																									
Caudal de agua (l/min)																										
Presión de la lechada (bar)																										
Caudal de la lechada (l/min)																										
	Lechada A	Lechada B																								
Cemento/amasada (kg)																										
Agua/amasada (kg)																										
Masa de la amasada (kg)																										
Volumen de la amasada (l)																										
Densidad de la lechada de cemento (kg/l)																										
Controles del operario																										
Columna Nº	Contador inicio perforación	Contador fin perforación	Contador inicio preinyección	Contador fin preinyección	Contador inicio inyección	Contador fin inyección	Hora inicio inyección	Hora fin inyección	Presión del agua	Presión de la lechada																
Paradas						Nº de amasadas preparadas =																				
Hora de inicio	Hora de fin	Naturaleza de la parada				Otras observaciones																				
						Operario: Firma:																				

Informe diario de la torre de inyección

LUGAR: _____ ZONA _____					Tipo de torre: _____											
FECHA: _____					Supervisor: _____											
Turno de _____ a _____					Firma: _____											
Instrucciones del supervisor										Secuencia de ejecución de las columnas						
					Preinyección		Inyección		Perforación							
Profundidad del pie de la columna (m)																
Profundidad de la cabeza de la columna (m)																
Diámetro de la boquilla (mm)																
Longitud del paso (cm)																
Duración del paso (s)																
Velocidad de rotación (rpm)																
Presión del agua (bar)																
Caudal de agua (l/min)																
Presión de la lechada (bar)																
Caudal de la lechada (l/min)																
Presión del aire (bar)																
Controles de perforación																
Columna N°	Inclinación de la columna	Hora inicio perforación	Hora fin perforación	Profundidad fin perforación	Hora inicio pre-inyección	Hora fin pre-inyección	Hora inicio inyección	Hora fin inyección	Profundidad fin inyección	Presión del agua	Presión de la lechada	Longitud del paso	Duración del paso	Presión del aire		
Mediciones del material sobrante de retorno																
Columna N°	Profundidad	Densidad del material sobrante de retorno	Nº de muestras moldeadas	Otras observaciones												
				Perforador: _____ Firma: _____												

ANEXO E (Informativo)

GRADO DE OBLIGACIÓN DE LAS DISPOSICIONES

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

- RQ: requisito;
- RC: recomendación;
- PE: autorización;
- PO: posiblemente y eventualmente;
- ST: declaración.

1 Objeto y campo de aplicación: ST	7 Consideraciones del proyecto	8 Ejecución
	7.1 : Generalidades	8.1 Generalidades
	7.1.1 : ST	8.1.1 : ST
2 Normas para consulta: ST	7.1.2 : RC	8.1.2 : ST
	7.1.3 : RQ	8.1.3 : ST
3 Términos y definiciones	7.1.4 : RQ	8.1.4 : ST
3.1 – 3.20: ST	7.1.5 : RQ	8.1.5 Exposición del método
	7.1.6 : RC	8.1.5.1 : RC
4 Necesidades específicas	7.1.7 : RQ	8.1.5.2 : RQ
4.1 : RQ	7.1.8 : RQ	8.1.6 : ST
4.2 : RQ	7.1.9 : RC	8.2 Equipo
4.3 : PO	7.1.10 : RC	8.2.1 : ST
4.4 : RQ	7.1.11 : RQ	8.2.2 : RQ
4.5 : RC	7.1.12 : RC	8.2.3 : RC
	7.1.13 : RQ	8.2.4 : ST
5 Investigación geotécnica	7.1.14 : RC	8.2.5 : ST
5.1 : RQ	7.1.15 : RQ	8.2.6 : ST
5.2 : RQ	7.1.16 : RC	8.3 Trabajos preliminares
5.3 : RC	7.1.17 : RQ	8.3.1 : RC
5.4 : RQ	7.2 Configuración geométrica	8.3.2 : RQ
5.5 : RQ	7.2.1 : ST	8.3.3 : RC
5.6 : RC	7.2.2 : RQ	8.3.4 : RQ
	7.2.3 : RQ	8.3.5 : RQ
6 Materiales	7.2.4 : RC	8.4 Perforación
6.1 : RQ	7.2.5 : RQ	8.4.1 : ST
6.2 : ST	7.3 Características de resistencia y de deformación	8.4.2 : RQ
6.3 : PO	7.3.1 : ST	8.4.3 : RQ
6.4 : RC	7.3.2 : RQ	8.4.4 : RC
6.5 : PO	7.3.3 : RQ	8.4.5 : RC
6.6 : PO	7.3.4 : RC	8.4.6 : RC
6.7 : RC	7.3.5 : ST	8.5 Inyección de lechada de cemento a presión
6.8 : ST	7.3.6 : RQ	8.5.1 : RQ
6.9 : RQ	7.3.7 : PO	8.5.2 : RC
6.10 : RQ	7.4 Permeabilidad	8.5.3 : RQ
6.11 : RC	7.4.1 : ST	8.5.4 : RC
6.12 : RQ	7.4.2 : RQ	8.5.5 : RQ
6.13 : RQ	7.4.3 : RC	8.5.6 : RC
6.14 : RQ		

8.5.7 : RQ
 8.5.8 : RQ
 8.6 : Material sobrante de retorno
 8.6.1 : RQ
 8.6.2 : PO
 8.6.3 : RC
 8.6.4 : RQ
 8.7 Colocación de la armadura: PO

9 Supervisión, ensayo y control

9.1 : Generalidades
 9.1.1 : RC
 9.1.2 : ST
 9.1.3 : RQ
 9.1.4 : PE
 9.1.5 : RC
 9.1.6 : PE
 9.2 Ensayos preliminares
 9.2.1 : RQ
 9.2.2 : RC
 9.2.3 : RC
 9.2.4 : RC
 9.2.5 : RC
 9.2.6 : ST
 9.3 Supervisión y ensayo del proceso
 9.3.1 : RQ
 9.3.2 : RC
 9.3.3 : PO
 9.3.4 : RQ
 9.3.5 : RQ
 9.3.6 : RC
 9.3.7 : RC
 9.3.8 : RC
 9.4 Ensayo sobre los elementos
 construidos
 9.4.1 Ensayo para evaluar la configuración geométrica

9.4.1.1 : ST
 9.4.1.2 : PO
 9.4.1.3 : PO
 9.4.1.4 : RC
 9.4.1.5 : RQ
 9.4.1.6 : RQ
 9.4.2 Ensayos mecánicos
 9.4.2.1 : RQ
 9.4.2.2 : RQ
 9.4.2.3 : RC
 9.4.2.4 : RC
 9.4.2.5 : ST
 9.4.2.6 : PO
 9.4.2.7 : PO
 9.4.2.8 : RQ
 9.4.2.9 : RC
 9.4.3 Ensayos de permeabilidad
 9.4.3.1 : RC
 9.4.3.2 : RQ
 9.4.3.3 : PO
 9.5 Control
 9.5.1 : ST
 9.5.2 : RQ
 9.5.3 : RQ
 9.5.4 : RC

10 Documentos sobre la ejecución del trabajo

10.1 Documentos disponibles en obra
 10.1.1 : RQ
 10.1.2 : RQ
 10.2 Documentos a preparar en obra
 10.2.1 : RQ
 10.2.2 : RQ
 10.2.3 : RQ

11 Requisitos especiales

11.1 Conformidad con las normas nacionales
 11.1.1 : RQ
 11.2 Seguridad en el lugar de trabajo
 11.2.1 : RQ
 11.2.2 : RQ
 11.3 Protección del medio ambiente
 11.3.1 : RQ
 11.3.2 : RQ
 11.3.3 : RQ

Anexo A (Normativo) Requisitos adicionales del proyecto

A.1 : RQ
 A.2 : RQ

Anexo B (Informativo) Intervalos de los parámetros de la inyección

Anexo C (Informativo) Ensayos indirectos

C.1 : PO
 C.2 : PO
 C.3 : RC
 C.4 : ST
 C.5 : PO
 C.6 : PO

Anexo D (Informativo) Ejemplos de actas realizados a pie de obra de los trabajos de inyección

Anexo E (Informativo) Grado de obligación de las disposiciones

BIBLIOGRAFÍA

EN 196 – *Métodos de ensayo de cementos.*

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Dirección C Génova, 6
28004 MADRID-España

Teléfono 91 432 60 00

Fax 91 310 40 32

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A UNIVERSIDAD POLITECNICA MADRID