

Octubre 2008

### TÍTULO

**Ejecución de trabajos geotécnicos especiales**

**Tratamiento del terreno mediante vibración en profundidad**

*Execution of special geotechnical works. Ground treatment by deep vibration.*

*Exécution de travaux géotechniques spéciaux. Amélioration des massifs de sol par vibration.*

### CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 14731:2005.

### OBSERVACIONES

Esta norma anula y sustituye a la Norma EN 14731:2005 (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 49465:2008

© AENOR 2008  
Reproducción prohibida

LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

**AENOR**

Génova, 6  
28004 MADRID-España

Asociación Española de  
Normalización y Certificación

info@aenor.es  
www.aenor.es

Tel.: 902 102 201  
Fax: 913 104 032

26 Páginas

**Grupo 17**



Versión en español

## **Ejecución de trabajos geotécnicos especiales Tratamiento del terreno mediante vibración en profundidad**

**Execution of special geotechnical works.  
Ground treatment by deep vibration.**

**Exécution de travaux géotechniques  
spéciaux. Amélioration des massifs  
de sol par vibration.**

**Ausführung von besonderen geotechnischen  
Arbeiten (Spezialtiefbau).  
Baugrundverbesserung durch  
Tiefenrüttelverfahren.**

Esta norma europea ha sido aprobada por CEN el 2005-08-08.

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**

## ÍNDICE

	Página
<b>PRÓLOGO .....</b>	<b>6</b>
<b>1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>2 NORMAS PARA CONSULTA.....</b>	<b>7</b>
<b>3 TÉRMINOS Y DEFINICIONES .....</b>	<b>7</b>
<b>4 INFORMACIÓN NECESARIA PARA LA EJECUCIÓN DEL TRABAJO .....</b>	<b>9</b>
4.1 Generalidades .....	9
4.2 Información especial para tratamientos del terreno con vibración en profundidad..	9
<b>5 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA.....</b>	<b>9</b>
5.1 Generalidades .....	9
5.2 Información específica para la compactación vibratoria en profundidad .....	10
5.3 Información específica para las columnas de grava vibradas .....	10
<b>6 MATERIALES Y PRODUCTOS .....</b>	<b>11</b>
6.1 Generalidades .....	11
6.2 Materiales para la compactación vibratoria en profundidad.....	11
6.3 Materiales para columnas de grava vibradas.....	11
<b>7 CONSIDERACIONES RELATIVAS AL DISEÑO.....</b>	<b>11</b>
7.1 Generalidades .....	11
7.2 Elección del método de tratamiento.....	12
7.3 Verificación del diseño .....	13
7.4 Extensión y distribución del tratamiento .....	13
7.5 Secuencia del tratamiento.....	13
<b>8 EJECUCIÓN .....</b>	<b>14</b>
8.1 Método de ejecución.....	14
8.2 Preparación del emplazamiento.....	14
8.3 Replanteo .....	14
8.4 Tratamiento .....	14
<b>9 SUPERVISIÓN, ENSAYOS Y CONTROL.....</b>	<b>15</b>
9.1 Supervisión y control .....	15
9.2 Ensayos.....	16
<b>10 REGISTROS .....</b>	<b>17</b>
10.1 Registros relacionados con la ejecución del tratamiento del terreno.....	17
10.2 Registros a la finalización del tratamiento del terreno .....	18
<b>11 REQUERIMIENTOS ESPECIALES.....</b>	<b>18</b>
11.1 Generalidades .....	18
11.2 Seguridad .....	18
11.3 Protección ambiental .....	18
11.4 Afecciones a estructuras adyacentes.....	19
<b>ANEXO A (Informativo) COMPACTACIÓN VIBRATORIA EN PROFUNDIDAD.....</b>	<b>20</b>

<b>ANEXO B (Informativo) INSTALACIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA VIBRADAS.....</b>	<b>22</b>
<b>B.1 Generalidades .....</b>	<b>22</b>
<b>B.2 Proceso de alimentación superior seco .....</b>	<b>22</b>
<b>B.3 Proceso húmedo.....</b>	<b>23</b>
<b>B.4 Proceso de alimentación por el fondo seco .....</b>	<b>24</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>26</b>

## PRÓLOGO

Esta Norma EN 14731:2005 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 marzo de 2006, y todas las normas nacionales técnicamente divergentes deben anularse antes de finales de marzo de 2006.

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 europea se aplica a la planificación, ejecución, ensayo y control del tratamiento del terreno mediante vibración en profundidad logrado con vibradores en profundidad y sondas de compactación.

Esta norma europea cubre los siguientes tipos de tratamiento:

- compactación vibratoria en profundidad para densificar el terreno existente;
- columnas de grava vibradas para formar una estructura de terreno compuesto reforzado por medio de la inserción de material granular que se debe densificar. Generalmente, las columnas de grava tienen un diámetro mayor que 0,6 m y menor que 1,2 m.

Esta norma europea cubre los siguientes métodos de tratamiento:

- métodos en los que se introducen en el terreno vibradores en profundidad con pesos oscilatorios que producen vibraciones horizontales;
- métodos en los que se introducen en el terreno sondas de compactación usando un vibrador que permanece en la superficie del terreno y que en la mayoría de los casos oscila de forma vertical.

Los métodos de tratamiento se detallan en los anexos A y B.

Los siguientes métodos de tratamiento, entre otros, no se incluyen en esta norma europea:

- métodos en los que se instalan columnas de grava o de arena por medio de impactos o cápsula vibrante superior, dirigida;
- métodos en los que se forman columnas muy rígidas tanto añadiendo desde cemento a material granular, como usando hormigón o cualquier otro tipo de ligante;
- compactación dinámica y otros métodos en los cuales se aplica alguna forma de tratamiento a la superficie del terreno.
- compactación con explosivos.

## 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 791 *Equipos de perforación. Seguridad.*

EN 996 *Equipos de pilotaje. Requisitos de seguridad.*

EN 1990 *Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras.*

EN 1997-1:2004 *Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales.*

prEN 1997-2 *Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 2: Proyecto asistido por ensayos de laboratorio.*

## 3 TÉRMINOS Y DEFINICIONES

Para los fines de esta norma, se aplican los términos y definiciones siguientes.

En los anexos A y B se dan descripciones adicionales de algunos de los métodos de tratamiento del terreno.

**3.1 compactación vibratoria en profundidad**

Tipo de tratamiento del terreno por medio de vibración en profundidad en el cual el principal objetivo es la densificación del suelo. El tratamiento se aplica a muchos suelos granulares y tiene como resultado el incremento de la resistencia y la rigidez, la reducción de la permeabilidad y de la susceptibilidad a la licuefacción.

**3.2 columnas de grava vibradas<sup>1)</sup>:**

Tipo de tratamiento del terreno por medio de vibración en profundidad en el cual se usa un vibrador en profundidad para formar columnas de grava continuas desde la profundidad máxima de penetración hasta la superficie del terreno y así formar una estructura columna de grava/suelo que debería tener un incremento en resistencia y rigidez en comparación con el terreno sin tratar. El tratamiento se aplica a un amplio rango de suelos y además, en suelos granulares se puede conseguir alguna densificación. En el anexo B se describen tres procesos de instalación: proceso de alimentación superior seco, proceso húmedo y proceso de alimentación por el fondo seco.

**3.3 vibrador:**

Pieza del equipo que se introduce en el terreno para provocar vibraciones en profundidad ; normalmente se introduce en el terreno un vibrador en profundidad que contenga pesos oscilatorios o una sonda de compactación utilizando un vibrador superior que permanece en superficie

**3.4 vibrador en profundidad:**

Componente básico del equipo de tratamiento del terreno que se usa en la instalación de las columnas de grava vibradas y en la vibrocompactación, que vibra horizontalmente por medio de un peso excéntrico que rota sobre su eje longitudinal y que penetra en el terreno. Se puede facilitar la penetración en el terreno usando aire o agua.

**3.5 vibrador superior (vibro-hincador):**

Vibrador que permanece por encima de la superficie del terreno.

**3.6 sonda de compactación:**

Herramienta para la compactación vibratoria profunda que se introduce en el terreno para transmitir vibraciones desde un vibrador superior que permanece en la superficie del terreno; para facilitar el proceso de compactación, se pueden añadir aletas, drenaje o agua.

**3.7 vibrocompactación en profundidad:**

Técnica en la que se utiliza un vibrador en profundidad para compactar suelo granular con formación de columnas de grava o sin ella.

**3.8 proceso de alimentación superior seco:**

Método de instalación de columnas de grava vibradas en el que el agujero formado por el vibrador en profundidad permanece abierto, y se alimenta directamente con material granular especificado desde la parte superior del agujero y se compacta con el vibrador por fases (el proceso se describe en el anexo B).

**3.9 proceso húmedo:**

Método de instalación de columnas de grava vibradas en el que el agua quita el material blando, estabiliza el agujero y permite alcanzar al material granular especificado la punta del vibrador en profundidad donde se compacta (el proceso se describe en el anexo B).

**3.10 proceso de alimentación por el fondo seco:**

Método de instalación de columnas de grava vibradas en el que el material granular especificado se introduce directamente a la punta del vibrador a través de una tubería de alimentación acoplada al vibrador, con el vibrador permaneciendo en el terreno durante la construcción de la columna para mantener la estabilidad del agujero (el proceso se describe en el anexo B).

---

1) Normalmente se denominan vibrocolumnas de grava.



## **4 INFORMACIÓN NECESARIA PARA LA EJECUCIÓN DEL TRABAJO**

### **4.1 Generalidades**

#### **4.1.1 Toda la información necesaria debe estar disponible antes de la ejecución del trabajo**

#### **4.1.2 Esta información debería incluir**

- a) cualquier restricción legal u obligatoria;
- b) situación de las líneas de la malla principal o puntos de referencia para el replanteo;
- c) condiciones de las estructuras, rutas y servicios adyacentes a la obra;
- d) 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, incluyendo las condiciones de contorno, topografía, accesos, pendientes y restricciones de gálibo;
- b) estructuras subterráneas existentes, servicios, contaminantes y limitaciones arqueológicas conocidas;
- c) restricciones ambientales, incluyendo ruido, vibración, desplazamientos, polución y efectos debidos a las variaciones climatológicas estacionales incluyendo capas superficiales congeladas;
- d) actividades de construcción en ejecución o futuras tales como rebajamientos del nivel freático, túneles, excavaciones profundas y elevaciones del nivel del emplazamiento.

#### **4.1.4 Cualquier otra información que se requiera se describe en los capítulos 5, 6, 7 y 8**

### **4.2 Información especial para tratamientos del terreno con vibración en profundidad**

La información requerida en relación a los aspectos prácticos de la ejecución del tratamiento del terreno debe incluir:

- los objetivos específicos de diseño del proyecto que se quieren conseguir con la ejecución del tratamiento del terreno;
- requisitos de suministro de agua y disposición de lodo para el proceso húmedo de instalación de columnas de grava vibradas.

## **5 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA**

### **5.1 Generalidades**

**5.1.1** Toda investigación del emplazamiento se debe realizar de acuerdo con la Norma EN 1997-1, el proyecto de Norma prEN 1997-2 y con el diseño del proyecto.

**5.1.2** El alcance y profundidad de la investigación del emplazamiento debe ser suficiente para determinar las condiciones características del terreno y la topografía del emplazamiento y para localizar e identificar todas las formaciones del terreno, capas, otras características geológicas y los niveles de agua freática que afecten a la ejecución de los trabajos.

**5.1.3** Se debe disponer de toda la información de las investigaciones del emplazamiento de acuerdo con los requisitos del capítulo 4.

**5.1.4** Algunos rellenos pueden ser heterogéneos y se puede requerir un examen en pozos de prueba para una descripción geotécnica representativa.

**5.1.5** Se deberían identificar los obstáculos, capas duras, adoquines y bloques en el terreno que puedan influir o impedir la inserción del vibrador.

**5.1.6** Se debe identificar la presencia de condiciones del terreno que afecten a la ejecución del tratamiento, incluyendo:

- capas duras;
- suelos sensibles a alteraciones;
- suelos con potencial de asientos colapsables al humedecerse;
- suelos con potencial de licuefacción;
- rellenos que asientan bajo su propio peso.

**5.1.7** Se debería identificar cualquier contaminante en el suelo o en el agua freática.

## **5.2 Información específica para la compactación vibratoria en profundidad**

**5.2.1** Se debe prestar especial consideración al rango de suelos granulares tratables y a la localización y extensión de cualquier capa que restrinja o reduzca la eficacia del proceso de tratamiento incluyendo arcillas, limos, capas orgánicas y capas que impidan el drenaje.

**5.2.2** Cuando haya presencia de arcillas, limos o suelos orgánicos, pueden necesitarse algunas o todas las propiedades mencionadas en el apartado 5.3.

**5.2.3** Las siguientes propiedades geotécnicas del suelo granular pueden ser relevantes en el diseño y ejecución del tratamiento del terreno por medio de la compactación vibratoria en profundidad:

- distribución granulométrica y contenido de finos;
- índice de densidad *in situ* (densidad relativa);
- permeabilidad;
- facilidad de trituración de las partículas;
- unión de las partículas causada por la cementación, succión o cohesión.

## **5.3 Información específica para las columnas de grava vibradas**

**5.3.1** Se debería prestar especial atención a la determinación de las propiedades físicas y geotécnicas requeridas en el diseño y ejecución del tratamiento del terreno de columnas de grava vibradas, por ejemplo:

- compresibilidad;
- límites de consistencia;
- resistencia a cortante sin drenaje;
- sensibilidad.

**5.3.2** Algunas condiciones del terreno necesitan una consideración particular, incluyendo:

- localización y extensión de turbas y suelos orgánicos;
- presencia de rellenos biodegradables incluyendo residuos domésticos.

## **6 MATERIALES Y PRODUCTOS**

### **6.1 Generalidades**

Los materiales aportados pueden ser arenas y gravas naturales, rocas de machaqueo o materiales reciclados tales como ladrillo u hormigón machacado. En el apartado 9.2.4 se describen los ensayos del control de calidad.

### **6.2 Materiales para la compactación vibratoria en profundidad**

**6.2.1** Puede que se necesite añadir material durante la compactación vibratoria en profundidad. Este material puede ser material granular compactado en el emplazamiento o importado.

**6.2.2** Los materiales añadidos deben ser lo suficientemente duros y químicamente inertes como para permanecer estables durante el proceso de tratamiento y su posterior vida útil en las condiciones de suelo y de nivel freático previstas.

### **6.3 Materiales para columnas de grava vibradas**

El material a utilizar para formar las columnas de grava debe ser:

- suficientemente duro y químicamente inerte como para permanecer estable durante el proceso de tratamiento y su posterior vida útil en las condiciones de suelo y de nivel freático previstas;
- con granulometría apropiada para la compactación para formar una columna densa totalmente ligada al terreno circundante y que cumpla otros requisitos como el drenaje;
- compatible con la planta utilizada y que fluya libremente a través de los sistemas de distribución en la alimentación por el fondo y longitudinal sin arquearse para no bloquear estos sistemas.

En la siguiente tabla se indican las granulometrías típicas utilizadas en los diferentes procesos:

<b>Proceso</b>	<b>Gradación (mm)</b>
Alimentación superior seca	40 a 75
Proceso húmedo	25 a 75
Alimentación por el fondo seco	8 a 50

## **7 CONSIDERACIONES RELATIVAS AL DISEÑO**

### **7.1 Generalidades**

**7.1.1** El diseño de un tratamiento del terreno por vibración profunda se debe hacer de acuerdo con las Normas EN 1990 y EN 1997-1, y con el proyecto de Norma prEN 1997-2.

**7.1.2** Se debe evaluar la información de las condiciones del terreno para determinar la idoneidad del terreno para la vibración en profundidad.

**7.1.3** La siguiente información se debe definir en el diseño del tratamiento del terreno:

- objetivo técnico del tratamiento (por ejemplo, incrementar la capacidad portante, reducir el asiento, reducir el potencial de licuefacción, reducir el potencial de colapso del asiento en condiciones húmedas o reducir la permeabilidad);
- las propiedades geotécnicas requeridas del suelo tratado (por ejemplo, resistencia a cortante, rigidez o permeabilidad);
- criterio con el que se deciden la profundidad, el espaciado o la extensión del tratamiento;
- comportamiento a alcanzar y modo en que se evalúa el tratamiento en términos de parámetros medibles;
- las propuestas para recompactar en caso de ser necesario, cuando se realice una excavación después del tratamiento.

**7.1.4** Debido a la naturaleza del terreno es esperable que haya cambios incluso después del tratamiento y esto se debería tener en cuenta.

**7.1.5** Se debe anticipar y tener en cuenta en el diseño el levantamiento o el asentamiento que ocurra durante el tratamiento. Es probable que se produzcan asientos significativos cuando no se añada relleno durante la compactación vibratoria en profundidad y éstos deben estimarse.

**7.1.6** Se deben evaluar los cambios producidos en el nivel del terreno después del tratamiento y el efecto que éstos pueden tener en el tratamiento.

**7.1.7** Algunos procesos de vibración en profundidad requieren grandes cantidades de agua. Se deben considerar en el diseño los efectos, si los hubiera, de bombear agua dentro del terreno en el volumen del tratamiento y del terreno adyacente.

**7.1.8** Se debe considerar en el diseño la posibilidad de efectos adversos en sistemas de cimentación adyacentes, edificios y servicios, movimientos de tierras, pendientes, estructuras de contención y estructuras enterradas, surgencias por movimientos del terreno, presiones intersticiales o vibraciones inducidas por el tratamiento del terreno.

**7.1.9** En los casos en los que los efectos adversos en edificios e infraestructuras adyacentes sean importantes, se debería realizar una investigación previa como se describe en el apartado 11.4.

**7.1.10** Cuando se requiera que las columnas de grava trabajen como drenes, se debería prever adecuadamente el drenaje superficial. Si la superficie del suelo existente no es la adecuada, se debería hacer un manto de drenaje. Se debería prestar atención a las propiedades drenantes de la plataforma de trabajo.

**7.1.11** Cuando la compactación vibratoria en profundidad no se realiza para compactar la capa superficial, se deberían utilizar rodillos y piones para compactar esta capa. Alternativamente, la compactación se puede ejecutar desde un nivel superior a la cimentación final.

## **7.2 Elección del método de tratamiento**

**7.2.1** El método elegido para ejecutar el tratamiento del terreno debe ser capaz de cumplir con los requisitos del diseño. En los anexos A y B se proporcionan descripciones de los procesos de tratamiento.

**7.2.2** Cuando la experiencia previa del método de tratamiento en el tipo de suelo predominante en el emplazamiento es limitada, se aconseja realizar pruebas preliminares para demostrar la viabilidad del método de tratamiento o para optimizar su diseño.

**7.2.3** Solamente se debe utilizar el proceso de alimentación superior seco cuando permanezca abierto el agujero hecho por el vibrador en profundidad. En otras condiciones se debe utilizar el proceso de alimentación por el fondo seco o el proceso húmedo.

### **7.3 Verificación del diseño**

**7.3.1** Se recomienda verificar que se hayan alcanzado los objetivos del tratamiento.

**7.3.2** Antes del comienzo del tratamiento del terreno se deberían identificar los medios adecuados para verificar que los objetivos requeridos del tratamiento se han alcanzado, en términos de los resultados de los ensayos definidos.

**7.3.3** En el apartado 9.2 se describen métodos apropiados de ensayo.

**7.3.4** Se deben especificar el tipo y frecuencia de los ensayos compatibles con los requisitos para el control de calidad y el comportamiento del tratamiento. La ejecución e interpretación de los ensayos geotécnicos de laboratorio y de campo deben cumplir con los requisitos del proyecto de Norma prEN 1997-2.

**7.3.5** Los ensayos, aunque son necesarios, pueden no ser suficientes para verificar la idoneidad del tratamiento; se requiere una supervisión, seguimiento y registros apropiados. A menudo suele ser apropiado realizar una aproximación observacional, y el diseño no estará totalmente completo hasta que no se gane algo de experiencia en el emplazamiento.

### **7.4 Extensión y distribución del tratamiento**

**7.4.1** El diseño de la distribución debe incluir la extensión y localización de los puntos de tratamiento y los niveles superior e inferior del tratamiento.

**7.4.2** Cada punto de tratamiento debe identificarse con un número de referencia y su localización en el plano se debe relacionar con puntos o líneas de referencia fijos.

**7.4.3** Normalmente se encuentran obstáculos naturales y artificiales y esta posibilidad se debe considerar en el diseño.

**7.4.4** Normalmente se puede aceptar una desviación horizontal respecto a la localización del plano de hasta 150 mm.

**7.4.5** Puede ser necesario extender el tratamiento más allá del área de la cimentación de la estructura a construir sobre el suelo tratado. Este sería el caso en el que, por ejemplo, un objetivo principal del tratamiento sea reducir la vulnerabilidad a la licuefacción en un terremoto.

**7.4.6** Para soporte de cimentaciones, la profundidad del tratamiento se debe determinar de la siguiente manera:

- en un tratamiento a gran profundidad el vibrador en profundidad o la sonda de compactación debe penetrar hasta un estrato competente identificado en las investigaciones del emplazamiento;
- en un tratamiento a media profundidad, la profundidad del tratamiento debe ser la adecuada para mejorar la profundidad del terreno cargado por el sistema de cimentación especial para alcanzar los requisitos de la capacidad portante y los criterios de asientos totales y diferenciales. Se debe evaluar el movimiento que ocurre bajo la cota del tratamiento.

### **7.5 Secuencia del tratamiento**

La secuencia en la que el tratamiento se debería ejecutar, en puntos individuales de tratamiento y en la dirección general del proceso a lo largo de áreas grandes, se debería considerar en la etapa de diseño con respecto a la efectividad del tratamiento y la presencia de estructuras y servicios adyacentes, enterrados o elevados.

## **8 EJECUCIÓN**

### **8.1 Generalidades**

Los trabajos se deben realizar de acuerdo con los procedimientos escritos. El método de tratamiento y el equipo empleado deben ser los adecuados para alcanzar la profundidad del tratamiento y los objetivos del diseño en las condiciones del terreno impuestas. Se deben tener en cuenta las actividades concurrentes en el emplazamiento y todo el movimiento de equipos necesario para realizar el tratamiento del terreno correctamente. Los trabajos de ejecución deben estar a cargo de personal entrenado y experimentado.

### **8.2 Preparación del emplazamiento**

**8.2.1** El emplazamiento se debe preparar de modo que las operaciones se realicen de forma segura y eficiente. Antes del comienzo de los trabajos, se deben identificar los servicios enterrados y aéreos y marcarlos claramente y recolocarlos.

**8.2.2** Se debe identificar cualquier obstáculo natural o artificial cerca de la superficie antes del comienzo del tratamiento del terreno y rotura y rellenar los huecos resultantes con el material granular especificado, o se debe modificar la distribución del tratamiento para acomodar los obstáculos.

**8.2.3** Las plataformas de trabajo se deben diseñar, preparar y mantener de manera adecuada y segura para el movimiento y trabajo del equipo de tratamiento. El material usado en las plataformas de trabajo debe ser adecuado para las condiciones de terreno en las cuales se coloca y no debe impedir la penetración del vibrador.

**8.2.4** Se aplicarán consideraciones especiales cuando se trabaje sobre agua.

### **8.3 Replanteo**

Todos los puntos del tratamiento se deben replantear con las tolerancias especificadas. Se deben comprobar los niveles de la plataforma de trabajo relativos a los niveles de tratamiento superior e inferior especificados.

### **8.4 Tratamiento**

#### **8.4.1 Generalidades**

**8.4.1.1** Se debe realizar el tratamiento del terreno penetrando en el terreno con un vibrador. El método de instalación apropiado se debe determinar considerando las condiciones del terreno y freáticas de acuerdo con el apartado 7.2.

**8.4.1.2** En ciertas circunstancias puede ser necesario pretaladrar o preexcavar.

**8.4.1.3** Cuando se encuentren obstáculos imprevistos bajo el nivel del terreno, se debe determinar si el obstáculo se debe retirar o si los puntos de tratamiento se deben reubicar o adaptar. Cuando se decida retirar el obstáculo, el agujero se debe rellenar con material granular adecuado para la compactación.

#### **8.4.2 Compactación vibratoria en profundidad**

La compactación en profundidad se alcanza penetrando en el terreno con un vibrador en profundidad o con una sonda de compactación. Se puede ayudar a la penetración y la retirada con agua o aire. Se puede utilizar el método de tratamiento con o sin la adición de relleno granular desde la superficie del terreno. La compactación vibratoria en profundidad se describe en el anexo A.

#### **8.4.3 Columnas de grava vibradas**

**8.4.3.1** Se deben formar columnas continuas desde la profundidad máxima requerida de penetración hasta el nivel de diseño superior como mínimo. Se tiene que construir una columna de grava compacta añadiendo cargas discretas y sucesivas de material granular especificado y compactando cada una de ellas a un nivel de consumo de potencia elegido.

**8.4.3.2** Se debería seleccionar el proceso de tratamiento más apropiado de los tres principales métodos para la instalación de columnas de grava descritos en el anexo B, denominados: proceso de alimentación superior seco, proceso húmedo y proceso de alimentación por el fondo seco.

**8.4.3.3** Cuando se utilice el proceso de alimentación por el fondo seco no se debe retirar el vibrador del terreno durante la construcción de la columna.

**8.4.3.4** Cuando se utilice el proceso húmedo, la demanda de agua es considerable y se debe determinar su suministro. Se debe disponer del lodo de acuerdo con las regulaciones locales. Cuando se haya cogido el lodo de lagunas, al finalizar el tratamiento del terreno las lagunas se deben rellenar y restituir el emplazamiento.

**8.4.3.5** Con el proceso húmedo, el vibrador debe permanecer en el agujero durante la formación de la columna de grava.

**8.4.3.6** Las columnas de grava se deben construir lo más verticales posibles. El vibrador en profundidad no se debe desviar de la vertical más de 1 en 20 durante la formación de la columna.

## **9 SUPERVISIÓN, ENSAYOS Y CONTROL**

### **9.1 Supervisión y control**

#### **9.1.1 Generalidades**

**9.1.1.1** Se debe establecer un control de calidad adecuado para la supervisión y control. La supervisión del tratamiento del terreno se debe llevar a cabo por personas adecuadamente cualificadas y experimentadas y de acuerdo con el capítulo 4 de la Norma EN 1997-1:2004.

**9.1.1.2** Debe estar disponible un plan de supervisión en el emplazamiento del tratamiento del terreno. Como mínimo, debe contener:

- procedimientos escritos, que incluyan una lista de parámetros de control críticos;
- condiciones del emplazamiento y del terreno y partidas importantes de las bases del diseño;
- cualquier obstáculo en el terreno que dificulte o impida la penetración del vibrador en el terreno.

**9.1.1.3** Se debe evaluar el efecto en el diseño de cualquier cambio en los procedimientos de tratamiento especificados cuando se encuentren condiciones imprevistas o se disponga de nueva información de las condiciones del suelo, y se deben acordar las acciones antes de realizar el cambio.

**9.1.1.4** Se deben seguir y registrar los parámetros de control críticos durante el proceso de tratamiento. Se debe utilizar un registro continuo. Se deben controlar la lista de los parámetros de ejecución del capítulo 10. Se debe incluir en los procedimientos escritos una auscultación adecuada cuando se hayan identificado efectos adversos en el terreno adyacente.

#### **9.1.2 Compactación vibratoria en profundidad**

Además de los puntos enumerados en el apartado 9.1.1, se deberían controlar los siguientes aspectos como medio de evaluar el tratamiento y la información que se puede usar al controlar el tratamiento:

- cuando se trae el relleno, la cantidad de relleno traído, su origen, tipo y granulometría;
- cuando no se trae el relleno, el asiento de la superficie del terreno.

### 9.1.3 Columnas de grava vibradas

**9.1.3.1** Se deben anotar las variaciones significativas del consumo de material granular para formar columnas de la misma longitud y se deben considerar sus efectos en el diseño.

**9.1.3.2** Se debe anotar cualquier cambio en el suministro o especificación de los materiales y sus efectos en el diseño considerado.

## 9.2 Ensayos

### 9.2.1 Generalidades

**9.2.1.1** El primer propósito de realizar ensayos es evaluar el comportamiento del tratamiento. Con las columnas de grava se realizan algunos ensayos adicionales para los fines del control de calidad.

**9.2.1.2** La elección del método de ensayo debería estar influenciada por los objetivos del tratamiento del terreno.

**9.2.1.3** En algunas situaciones, el tiempo transcurrido entre el tratamiento y el ensayo tiene un efecto importante en el resultado del ensayo.

**9.2.1.4** Se debe especificar el método de ensayo utilizando, cuando sea posible, la referencia internacional de los procedimientos de ensayo, tales como los enumerados en el proyecto de Norma prEN 1997-2. Previamente a la ejecución se deben definir los parámetros a controlar, las localizaciones de los ensayos, la frecuencia de los ensayos y los criterios de aceptación. Los ensayos deben ser apropiados para la cantidad de tratamiento, variabilidad de las condiciones del terreno, tipo de cimentación, profundidad de influencia de la carga de cimentación y cualquier otro factor relevante.

**9.2.1.5** Se debe registrar el número y tipo de ensayos, su localización y profundidad. Se deben presentar copias firmadas de estos registros y de los resultados de los ensayos tal y como se requiera en el contrato.

### 9.2.2 Compactación vibratoria en profundidad

**9.2.2.1** Se deberían utilizar ensayos *in situ* para comprobar el comportamiento cuando se puedan medir los cambios en las propiedades del terreno y relacionarlos directamente con los criterios dados en los documentos contractuales o los datos obtenidos del pretratamiento usando la misma técnica.

**9.2.2.2** Pueden llevarse a cabo uno o más de los siguientes ensayos *in situ*:

- ensayos de penetración con el cono (CPT y CPTU) realizados para proporcionar un registro continuo de la resistencia a la penetración, relación de fricción y, para el CPTU, la presión intersticial inducida;
- ensayos dilatométricos (DMT) realizados para determinar el módulo de deformación;
- penetración dinámica (DP) realizada para proporcionar un registro de la resistencia a la penetración;
- ensayos presiométricos (PMT) realizados para determinar el módulo de deformación y/o las presiones límite;
- ensayos de penetración estándar (SPT) realizados para determinar la resistencia a la penetración.

Los parámetros provenientes de estos ensayos *in situ* se pueden correlacionar empíricamente con los parámetros que controlan el comportamiento del conjunto, pero una comparación de los ensayos *in situ* realizada antes y después del tratamiento no reflejará necesariamente la mejora real en el conjunto del terreno tratado.

**9.2.2.3** Cuando se realiza a una escala adecuada y a lo largo de un periodo apropiado, los ensayos de carga pueden dar una medida directa de los parámetros que controlan el comportamiento del conjunto tal y como se describe en el apartado 9.2.3.



**9.2.2.4** Otros tipos de ensayos pueden ser apropiados para aplicaciones y condiciones de terreno particulares, incluyendo ensayos geofísicos, como medidas de la velocidad de ondas sísmicas, muestreo y ensayos de laboratorio y ensayos de permeabilidad de los sondeos.

### **9.2.3 Columnas de grava vibradas**

**9.2.3.1** Si las columnas de grava se instalan en suelos granulares se pueden aplicar los ensayos relacionados en el apartado 9.2.2. Se deben definir previamente a la ejecución los parámetros a controlar, las localizaciones de los ensayos, la frecuencia de los ensayos y los criterios de aceptación.

**9.2.3.2** Los ensayos de carga a gran escala incluyen ensayos de placa de carga grande y ensayos de zona:

- los ensayos de placa de carga grande se deberían realizar cargando una placa rígida o una probeta de hormigón realizada *in situ* lo suficientemente grande para abarcar una o más columnas y el terreno que interviene;
- los ensayos de zona se deberían realizar cargando un área grande de terreno tratado, normalmente construyendo y cargando una cimentación a tamaño real o colocando un terraplén para simular cargas extendidas.

Previamente a los ensayos se debería especificar la localización, los parámetros a medir, el procedimiento de carga, los incrementos de carga, la duración del ensayo y los ciclos de carga/recarga.

**9.2.3.3** Se deberían realizar ensayos de placa de carga por columna usando una placa situada concéntricamente sobre las columnas individuales, cargadas en incrementos con los asientos de la placa medidos en comparación con una viga de referencia estable.

### **9.2.4 Materiales**

**9.2.4.1** Se debería comprobar la dureza del material granular utilizado para formar las columnas. Cuando se requiera, se deberían realizar ensayos de acuerdo con los procedimientos para los ensayos de las propiedades mecánicas y físicas de los áridos dados en la Norma EN 1097.

**9.2.4.2** Cuando se requiera, se debería determinar la distribución granulométrica del material granular de acuerdo con el proyecto de Norma prEN 1997-2.

## **10 REGISTROS**

### **10.1 Registros relacionados con la ejecución del tratamiento del terreno**

Se deben guardar registros diarios del proceso de tratamiento y deben estar disponibles en el emplazamiento del tratamiento del terreno. Los registros deben mostrar:

- número de referencia y localización del punto de tratamiento;
- fecha y hora del trabajo en cada punto de tratamiento;
- condiciones meteorológicas;
- método de tratamiento, tipo de referencia del equipo y del personal;
- profundidad de penetración en cada localización;
- tiempo requerido para alcanzar la mayor profundidad y los detalles de los tiempos y profundidades durante la retirada;

- consumo de la potencia de vibración durante la penetración y compactación de material granular o suelo para vibradores en profundidad;
- obstáculos y retrasos;
- cualquier condición imprevista encontrada;
- presencia de levantamientos o asientos en la superficie del terreno;
- cuando se instalen columnas de grava, la cantidad usada en cada columna;
- con los procesos húmedos o de alimentación por el fondo, cualquier ocasión en la que se haya tenido que retirar el vibrador en profundidad del suelo durante la construcción de la columna.

## **10.2 Registros a la finalización del tratamiento del terreno**

En los registros finales del emplazamiento se debe incluir lo siguiente:

- la posición ejecutada y la profundidad de cada punto de tratamiento, anotando cualquier desviación fuera de las tolerancias especificadas;
- directivas particulares asociadas con el diseño y la ejecución que sean relevantes para el posterior uso del terreno tratado;
- cuando se instalen columnas de grava, la fuente, el tipo y la calidad del material granular.

## **11 REQUISITOS ESPECIALES**

### **11.1 Generalidades**

Sólo se consideran aquellos aspectos de la seguridad del emplazamiento y la protección del medio ambiente que sean específicos del tratamiento del terreno por vibración en profundidad. Se deben cumplir todas las normas europeas y nacionales, especificaciones y requisitos normativos relativos a la seguridad y al medio ambiente que sean aplicables.

### **11.2 Seguridad**

**11.2.1** El tratamiento del terreno se debe realizar de una forma segura, de acuerdo con la Norma EN 791 en la seguridad del equipo de perforación y/o con la Norma EN 996 en la seguridad del equipo de pilotaje.

**11.2.2** El proceso de tratamiento incluye personal operando cerca de equipo pesado con piezas suspendidas del brazo de una grúa; se deben respetar las prácticas de trabajo seguro.

**11.2.3** Cuando el proceso de tratamiento suponga un riesgo de licuefacción, se debe prestar especial atención a la estabilidad de las bases de las máquinas y a la estabilidad global del emplazamiento, especialmente cuando se trabaje en las proximidades de laderas o excavaciones.

### **11.3 Protección ambiental**

Las alteraciones y/o los daños ambientales se pueden causar por ruido, polvo, vibración y disposición de efluentes. Se deben tomar medidas para limitar o evitar tales efectos adversos cuando se requiera. Cuando se inyecte agua en el terreno durante el tratamiento del terreno, se deben definir claramente todos los requisitos de las autoridades.

**11.4 Afecciones a estructuras adyacentes**

**11.4.1** Donde se localicen edificios, estructuras y servicios en o cerca de los límites de un área de tratamiento del terreno, se deben tener en cuenta los efectos del tratamiento sobre ellos por la vibración y el movimiento del terreno.

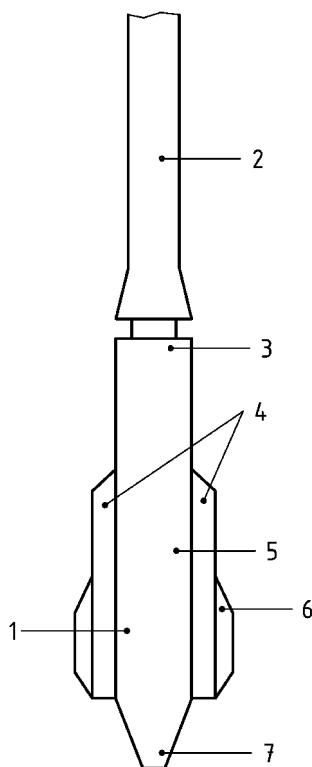
**11.4.2** Se debería observar y documentar el estado de las estructuras adyacentes e instalaciones previamente a la ejecución del tratamiento del terreno y controlarlas durante el tratamiento del terreno. En casos apropiados, se debería buscar asesoramiento de expertos previamente al comienzo del tratamiento.

**11.4.3** Cuando se requiera, se debe realizar el control de la vibración durante el proceso de tratamiento con acuerdo previo de los niveles límites.

**ANEXO A (Informativo)****COMPACTACIÓN VIBRATORIA EN PROFUNDIDAD**

Normalmente se restringe la compactación vibratoria en profundidad a suelos granulares; al incrementar el contenido de finos, se reducirá la eficiencia de la compactación. Normalmente se ha comprobado que un contenido en finos mayor del 10% causa dificultades. Los suelos que presentan adherencia entre partículas debido a la cementación, succión o cualquier otra causa pueden no ser adecuados para este tipo de tratamiento de terreno. En algunos casos, la eficiencia de la compactación se puede incrementar usando lavado de agua o mediante combinación de drenes verticales. Sólo es posible la compactación hasta la superficie aplicando medidas adicionales.

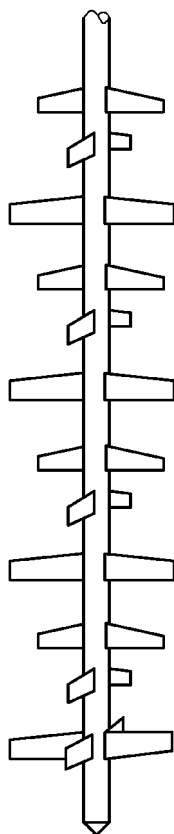
La compactación en profundidad de suelos granulares se puede alcanzar por métodos que utilicen tanto un vibrador en profundidad (como el mostrado en la figura A.1) o un vibrador superior. Los métodos que utilizan un vibrador en profundidad tienen un principio similar a los métodos descritos en el anexo B, no siempre se vaya a formar una columna de grava.

**Leyenda**

- 1 Peso excéntrico (dentro)
- 2 Tubo de extensión
- 3 Aislante
- 4 Jets de agua o de aire
- 5 Motor (dentro)
- 6 Aletas para evitar que se tuerza
- 7 Nariz cónica

**Figura A.1 – Vibrador en profundidad**

Cuando se use un vibrador superior, éste se conecta a la parte superior de una sonda de compactación, la cual se diseña para transferir las vibraciones al suelo tan eficientemente como sea posible. Hay varios tipos diferentes de sondas de compactación, incluyendo una aleta vibratoria (figura A.2) y otras sondas flexibles. Se pueden utilizar vibradores convencionales para pantallas, pero se han desarrollado vibradores especiales. A pesar de que el vibrador superior normalmente vibra verticalmente, la sonda causará aceleraciones horizontales que localmente pueden ser mayores que las verticales. La compactación se incrementa cuando se crea la resonancia entre el sistema vibrador (vibrador y sonda de compactación) y el suelo de alrededor. Por medio de sensores de vibración colocados en el terreno y un vibrador con frecuencia ajustable, se puede adaptar la frecuencia para amplificar las vibraciones del terreno; este método se conoce como compactación por resonancia.



**Figura A.2 – Aleta vibratoria**

La compactación se alcanza insertando la sonda en los puntos de tratamiento, normalmente situados en una malla triangular o rectangular. Son típicas las separaciones de 1 m a 4 m dependiendo del tipo y el tamaño de sonda de compactación y capacidad del vibrador. En cada punto de tratamiento la sonda se introduce en el suelo a la profundidad a la cual se requiere la compactación. La compactación se obtiene durante la penetración o durante la penetración y extracción. El tiempo de compactación en cada punto varía típicamente de 5 min a 40 min y el tiempo requerido se incrementa con el contenido de finos del suelo. La compactación se puede efectuar haciendo varias pasadas, con espacios menores en las últimas pasadas.

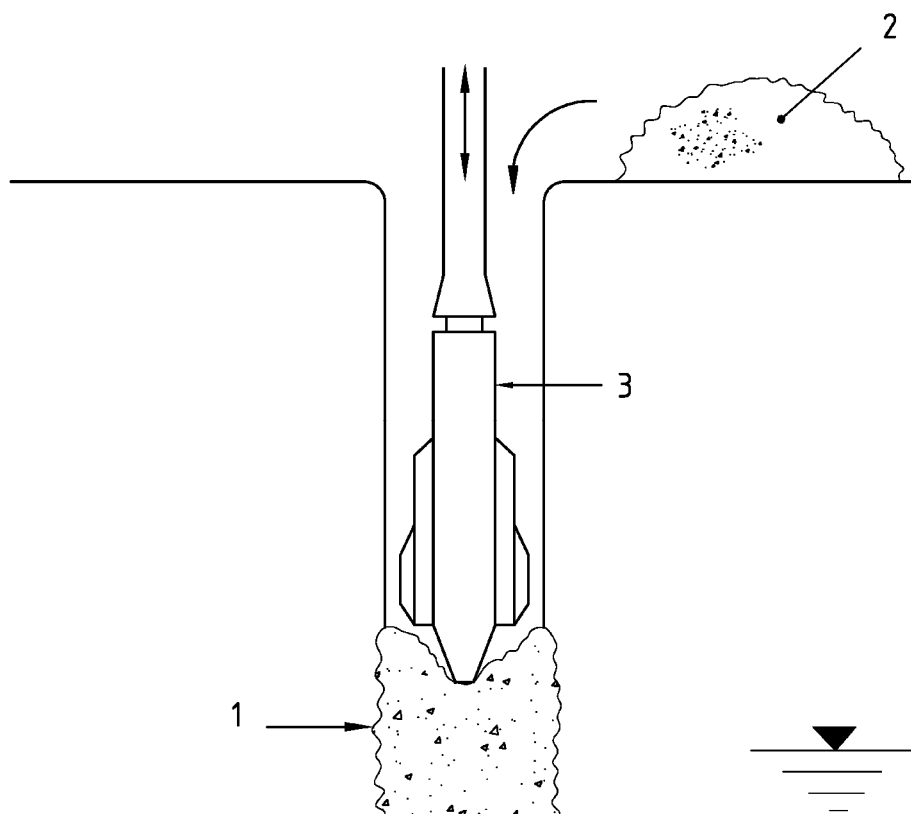
**ANEXO B (Informativo)****INSTALACIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA VIBRADAS****B.1 Generalidades**

Hay tres métodos principales de instalación de columnas de grava vibradas, el proceso de alimentación superior seco, el proceso húmedo y el proceso de alimentación por el fondo seco, y se describe para cada método la instalación de una columna individual. Con los procesos de columnas de grava vibradas, se repite la instalación de columnas para columnas posteriores a un espacio predeterminado para efectuar el tratamiento deseado. Los tres procesos usan un tipo similar de vibrador en profundidad, que es un peso excéntrico ensamblado, rotando rápidamente dentro de una carcasa pesada de acero tubular. La disposición general del vibrador en profundidad se muestra en la figura A.1. La nariz del vibrador está afilada para ayudar a la penetración en el terreno mientras que las alas verticales impiden que el vibrador rote durante la penetración.

Se dan como típicas las siguientes descripciones. En la práctica, puede haber pequeñas diferencias en detalles.

**B.2 Proceso de alimentación superior seco**

En suelos granulares, normalmente este método sólo es posible por encima del nivel freático. Todo el ensamblaje se cuelga de una grúa montada en un carril y el vibrador se baja al terreno. La penetración del relleno y/o el suelo subyacente blando se efectúa por una combinación del peso del vibrador, la alta frecuencia de la vibración y el aire comprimido. Un compresor aporta aire a la vibración en profundidad, el cual emerge de unas toberas en la tubería principal de acero justo por encima de la punta del vibrador. La disposición general se muestra en la figura B.1. Después de alcanzar la profundidad requerida, se sujeta el vibrador en el terreno durante un tiempo corto y luego se deja. Se echa una pequeña carga de material granular limpio e inerte en el agujero y el vibrador se baja otra vez para compactar el material granular y entrelazarlo con el suelo de alrededor. Añadiendo cargas pequeñas y sucesivas de material granular y compactando cada una hasta los niveles elegidos de consumo de potencia, se construye una columna de grava densa hasta el nivel del terreno. Las granulometrías típicas para el material granular están dentro del rango de 40 mm a 75 mm.

**Leyenda**

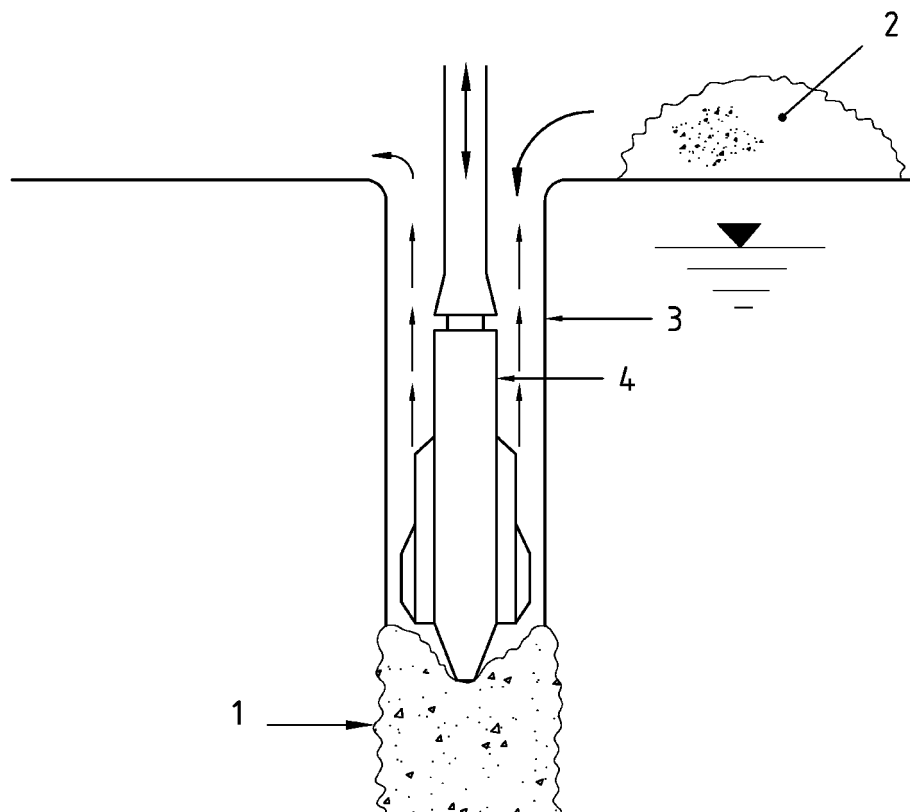
- 1 Columna de grava formada
- 2 Pila de relleno granular
- 3 Vibrador

**Figura B.1 – Proceso de alimentación superior seco**

**B.3 Proceso húmedo**

El proceso húmedo se usa cuando no se puede utilizar el proceso de alimentación superior seco debido a suelos inestables. El vibrador en profundidad es similar al utilizado en el proceso seco pero está equipado con alimentador de agua. La disposición general se muestra en la figura B.2. El vibrador en profundidad se suspende de una grúa adecuada, se baja al terreno y se abren los jets de agua. El vibrador penetra rápidamente a través de los suelos blandos bajo su propio peso ayudado por el aporte de agua y las vibraciones. El vibrador se deja parcialmente y de vez en cuando se levanta para purgar los suelos blandos que se acumulan cerca del agujero. Después de formarse un agujero abierto, se mantiene el vibrador en el terreno y el flujo de agua se reduce mientras se amontona material granular inerte limpio alrededor de la parte superior del agujero de vibración en el nivel del terreno. Entonces el material granular baja entre el vibrador y el suelo de alrededor para permitir la construcción de la columna en pasos pequeños de elevación y repenetración. Es importante mantener el flujo de agua hasta que la vibración alcance la superficie del terreno. El vibrador compacta el relleno granular y lo entrelaza ajustadamente con el suelo adyacente. El ciclo se repite hasta que se construye una columna de grava hasta el nivel del terreno. Las granulometrías típicas para el material granular están dentro del rango de 25 mm a 75 mm.

El proceso húmedo tiene problemas considerables de suministro de agua, zanjas de drenaje, lagunas de decantación y la disposición final del efluente de una manera aceptable para la autoridades.



## Leyenda

- 1 Columna de grava
- 2 Pila de grava
- 3 Flujo de agua
- 4 Vibrador

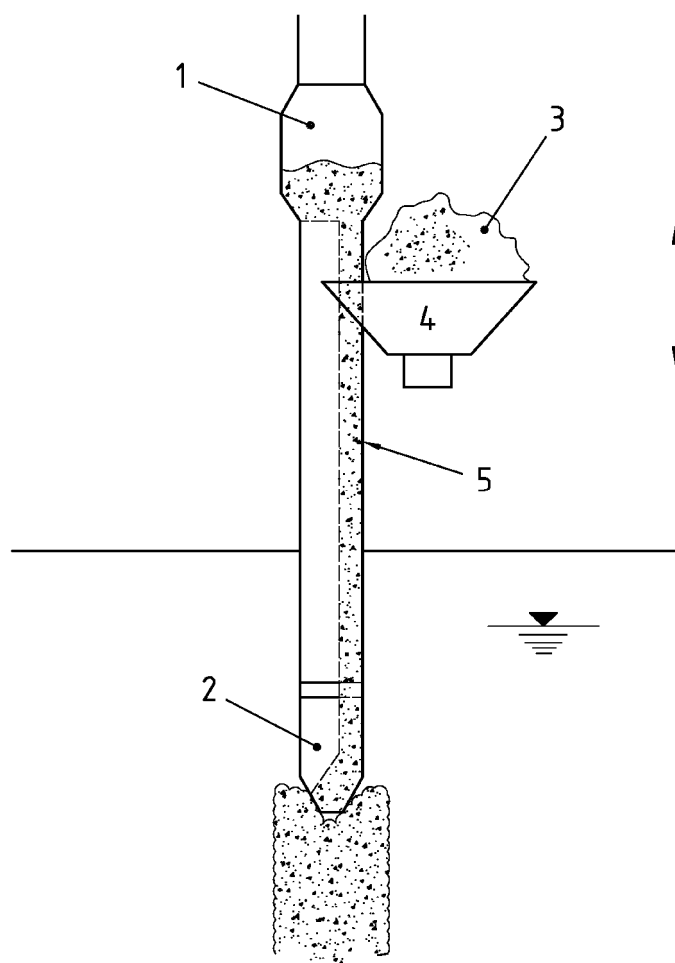
Figura B.2 – Proceso húmedo

**B.4 Proceso de alimentación por el fondo seco**

Como el vibrador permanece en el agujero durante la construcción de la columna, el proceso puede operar con éxito en condiciones de huecos inestables y se puede usar en vez del proceso húmedo en la mayoría de los casos. El vibrador en profundidad de alimentación por el fondo tiene un tubo de suministro pesado localizado en la parte inferior en un lado y permanentemente fijo, formando un conjunto integrado vibrador/suministrador de material granular. El tubo de suministro se dobla hacia el interior en la punta del vibrador para asegurar una localización central para el suministro de material granular. La disposición general se muestra en la figura B.3.

El ciclo de operaciones para el proceso seco completo es como sigue. El vibrador se coloca en la localización del punto de tratamiento, y todo el sistema se carga con material granular. Con el material granular en el tubo de suministro actuando como un tapón en la punta del vibrador, ayudado cuanto sea necesario por aire comprimido, y bajo la acción combinada de la vibración y su peso, usando una fuerza de tiro inferior adicional si es necesario, el vibrador penetra en el terreno a la profundidad requerida. Se forma entonces la columna de grava y se compacta elevando el vibrador, aguantando la elevación por un tiempo corto para permitir correr el material granular, y forzando entonces la vibración al cargar el material para compactarlo y ligarlo estrechamente al suelo de alrededor. Esto se repite, cargando el sistema con material granular cuando sea necesario, hasta que se forme una columna de grava compacta hasta el nivel del terreno. Las granulometrías típicas del material granular están dentro del rango de 8 mm a 50 mm.





## Leyenda

- 1 Cámara de presión
- 2 Vibrador
- 3 Pila de grava
- 4 Cubeta de alimentación de grava
- 5 Tubo de alimentación de grava

**Figura B.3 – Proceso de alimentación por el fondo seco**

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] EN 1097-1, *Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval)*
- [2] EN 1097-2, *Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 2: Methods for the determination of the resistance to fragmentation*
- [3] prEN 1998, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance*



---

---

**AENOR** Asociación Española de  
Normalización y Certificación

Génova, 6  
28004 MADRID-España

[info@aenor.es](mailto:info@aenor.es)  
[www.aenor.es](http://www.aenor.es)

Tel.: 902 102 201  
Fax: 913 104 032