

INTEVIA

Instituto Técnico de la Vialidad y del Asfalto

Jornada sobre

MEJORA DEL TERRENO DE CIMENTACIÓN

Madrid, 16 de Diciembre de 2.003

**INYECCIONES DE FRACTURACIÓN
Y
DE COMPACTACIÓN**

Fernando MUZÁS LABAD

**Profesor Titular de Mecánica del Suelo y Cimentaciones
E.T.S. de Arquitectura – Universidad Politécnica de Madrid**

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. PLANIFICACIÓN DE UN TRATAMIENTO. TÉCNICAS DE INYECCIÓN
3. TECNOLOGÍA DE LA INYECCIÓN
4. INYECCIONES POR FRACTURACIÓN HIDRÁULICA
5. INYECCIONES DE COMPACTACIÓN
6. EJEMPLO DE APLICACIÓN

BIBLIOGRAFÍA

FIGURAS

FIGURAS

1. Límites de inyectabilidad basados en la permeabilidad del terreno.
2. Límites de inyectabilidad basados en la granulometría del terreno.
3. Tecnología de inyección en rocas fisuradas.
4. Tecnología de inyección en suelos. Tubo - manguito.
5. Inyección por fracturación hidráulica.
6. Inyección con desplazamiento.
7. Planta de la Nave de Pescados de Mercamadrid.
8. Sección transversal de la Nave de Pescados de Mercamadrid.
9. Curvas típicas de asientos durante el tratamiento de la Nave de Pescados de Mercamadrid.

1. INTRODUCCIÓN

Las inyecciones son un método de mejora del terreno que consiste en la introducción dentro del mismo, a través de perforaciones, de productos capaces de mejorar sus características mecánicas y / o su impermeabilidad.

Evidentemente, la tecnología de un tratamiento mediante inyecciones, depende, en primer lugar de las características del medio a tratar, pero también deben tenerse en cuenta las características y propiedades del producto de inyección así como la manera en la que este producto se puede introducir en el medio.

La mejor manera para diferenciar toda la problemática es comparar el tratamiento del terreno mediante inyecciones con las inyecciones que se aplican en el cuerpo humano, con las inyecciones intravenosas o intramusculares, y los problemas que se derivan según la viscosidad del producto a inyectar y la velocidad con la que se lleva a cabo la inyección.

En los apartados siguientes se pasa revista, en primer lugar y de manera sucinta, a los distintos conceptos enunciados anteriormente, para acometer de manera más detallada el objeto fundamental de la exposición.

2. TÉCNICAS DE INYECCIÓN

La **planificación de un tratamiento mediante inyecciones** se efectúa atendiendo a los siguientes aspectos:

1. Finalidad de las inyecciones (Impermeabilización y/o consolidación para disminuir la deformabilidad y/o aumentar la resistencia)
2. Características del medio a tratar.

3. Productos a utilizar (naturaleza, propiedades a corto y largo plazo, campo de aplicación, limitaciones según el medio a tratar)
4. Tecnología del tratamiento (método de inyección y parámetros de inyección)
5. Establecimiento de los objetivos a alcanzar
6. Disposición del tratamiento y procedimiento a seguir
7. Ejecución y control del tratamiento
8. Comprobación de resultados

En función de las características del medio a tratar y de la forma en que el producto de inyección se introduce en el terreno, cabe diferenciar las siguientes **técnicas de inyección**:

1. Relleno de huecos
2. Impregnación de poros y fisuras (en inglés **permeation**)
3. Recompresión del terreno mediante lantejones creados por fracturación hidráulica (en francés **claquage** o ,en inglés, **squeeze grouting**)
4. Compactación del terreno por desplazamiento (en inglés **compaction grouting**)
5. Excavación y mezcla del terreno con chorro a alta velocidad (en inglés **jet grouting**)

En el primer caso (**relleno de huecos**) el producto de inyección se introduce prácticamente por gravedad hasta rellenar los huecos existentes. Si éstos son de gran

tamaño resulta aconsejable utilizar mezclas de lechadas con áridos o productos especiales de gran rendimiento volumétrico.

En el segundo caso, (**impregnación**) la inyección se limita a rellenar los poros o fisuras del terreno, utilizando productos capaces de introducirse en los mismos.

En el tercer caso (**fracturación hidráulica**) el producto de inyección no es capaz de penetrar en los poros del terreno, sino que se introduce en las fisuras que se van creando en el mismo, al romperse por efecto de la presión utilizada, creándose lentejones que recomprimen el terreno.

En el cuarto caso (**compactación**) se utiliza una mezcla de gran viscosidad y el terreno no se rompe como en el caso anterior, sino que se desplaza y comprime lateralmente.

Finalmente, en el último caso (**jet-grouting**) la lechada se introduce mediante un chorro a alta velocidad que consigue la excavación del terreno y su mezcla con dicha lechada.

Naturalmente, para establecer, en cada caso, la tecnología del tratamiento y elegir el producto de inyección adecuado, es preciso conocer las **características del medio a tratar**, siendo interesante determinar los siguientes parámetros:

1. **En rocas fisuradas:** tamaño y disposición de las fisuras; permeabilidad medida mediante el *ensayo lugeon*.
2. **En rocas con grandes huecos:** tamaño aproximado de los mismos.
3. **En suelos:** granulometría, porosidad y permeabilidad medida mediante *ensayo lefranc*.
4. **En todos los casos:** condiciones del agua subterránea, fundamentalmente, la naturaleza química (por si puede afectar al producto de inyección) y la

velocidad de circulación, ya que, si es alta, hay que proceder primero a su detención en los alrededores de la zona a tratar.

Los **productos de inyección** generalmente utilizados son mezclas de cemento y agua, pero existen los tipos siguientes:

1. **Suspensiones de cemento en agua** que pueden ser estables o inestables, en función de la dosificación ($C/A > 1$) o de la incorporación de aditivos o de otros productos (arcilla o bentonita).
2. **Productos líquidos** constituidos por una suspensión coloidal de productos inorgánicos o de productos hidrocarbonados, o también por una solución de monómeros orgánicos.

No pueden utilizarse estos productos indiscriminadamente, sino que su aplicación debe elegirse en función de la permeabilidad y de la granulometría del terreno, si se pretende hacer inyecciones de impregnación (Figura 1 y Figura 2).

Es conveniente conocer también las principales **propiedades de las mezclas de inyección**, definidas, en general, por los aspectos o los parámetros siguientes:

1. Estabilidad y posibilidad de segregación, ya que si la velocidad de circulación de la lechada es pequeña puede haber sedimentación y paralización del proceso de inyección.
2. Tamaño de las partículas, que debe ser adecuado al de los huecos, fisuras o poros del terreno que se desea inyectar.
3. Viscosidad, ya que puede determinar la presión y la velocidad de inyección.
4. Propiedades reológicas, es decir, el comportamiento de la lechada a lo largo del tiempo.

5. Tiempo de fraguado, que marca el plazo de máxima utilización.
6. Volumen del producto fraguado, ya que, frecuentemente, las lechadas de inyección son mezclas con agua, que puede decantarse o irse al terreno contiguo.
7. Resistencia del producto fraguado.
8. Permanencia a lo largo del tiempo del producto fraguado.

3. TECNOLOGÍA DE LA INYECCION

El método de inyección a utilizar depende fundamentalmente de las características del medio a tratar, pudiendo estar el taladro revestido o no. La inyección se efectúa a través de un tubo de inyección que dispone, en su extremo inferior, de un obturador para el cierre contra el terreno o la tubería de revestimiento. En esencia, con el método y dispositivo operativo, se trata de evitar que el producto de inyección escape al exterior del taladro por el camino más fácil, como puede ser el contacto entre el terreno y el tubo de revestimiento, si existe, o el obturador y el exterior del tubo de inyección.

En **rocas fisuradas**, normalmente el taladro no está revestido y se hace descender el tubo de inyección a la profundidad deseada, donde se efectúa la obturación por encima de la zona a tratar (Figura 3). El proceso se puede llevar a cabo por **fases ascendentes**, si no existe riesgo de que escape el producto de inyección, o por **fases descendentes**, si existe este riesgo, procediendo luego a la reperforación de la zona tratada. En ocasiones, y utilizando un obturador especial, puede efectuarse la inyección mediante lo que se conoce como circulación doble, que permite que el producto no sedimente en el área de inyección dentro del taladro.

En **rocas con grandes huecos** se trata de rellenar cavidades, operación que puede realizarse por gravedad.

En el caso de **la inyección de suelos**, la técnica generalmente utilizada es la que se conoce como de **tubo – manguito** (Figura 4). En este caso en el taladro se instala previamente una tubería de acero o de plástico, equipada con válvulas anti-retorno dispuestas cada 30 cm, aproximadamente, que se constituyen mediante perforaciones en la tubería que se cierran exteriormente con manguitos de goma. Esta tubería se introduce en la perforación y se sella contra el terreno mediante una mezcla de bentonita - cemento, de baja resistencia, que se inyecta por el fondo de la tubería y se hace circular por la corona exterior del tubo, hasta que sale a la superficie. A continuación se lava con agua el interior quedando preparado para la inyección que puede efectuarse a la profundidad que se desee.

La inyección se lleva a cabo introduciendo luego una tubería de inyección equipada con un obturador doble que permite efectuar la inyección en la zona de manguito de goma que se desee. La presión de inyección se eleva hasta que la válvula de goma se abre y se rompe la vaina de bentonita - cemento del exterior de la tubería de revestimiento, efectuándose la inyección en la zona de terreno contigua. La inyección se puede efectuar de manera ascendente o descendente, procediendo al lavado del interior del tubo - manguito al terminar las operaciones, lo cual permite efectuar la reinyección en cualquier momento.

Finalmente cabe citar un último método en el que la tubería de revestimiento sirve como tubería de inyección introduciendo la lechada por el fondo de la misma la cual se va retirando poco a poco hacia el exterior a medida que progresa la inyección que, lógicamente, se efectúa por fases ascendentes. En este caso la tubería de revestimiento y de inyección se instala en el terreno a percusión equipándola previamente de una puntaza en la punta que queda perdida en el terreno al retirar la tubería hacia el exterior para efectuar la inyección en un tramo. Debido a ello este método se conoce con el nombre de **puntaza perdida**.

4. INYECCIONES POR FRACTURACIÓN HIDRÁULICA

Son inyecciones en las que el producto de inyección penetra en el terreno a través de las fisuras que se producen en él como consecuencia de un fenómeno de rotura por fracturación hidráulica, creando lantejones del material inyectado, que recomprimen transversalmente el terreno (Figura 5).

Por comparación con las inyecciones que se aplican al cuerpo humano, este tipo puede asimilarse a las inyecciones intramusculares. El producto de inyección busca sitio para alojarse y el tejido duele más o menos, en función de la viscosidad del producto y la velocidad de inyección.

El fenómeno de la fracturación hidráulica se produce siguiendo, en general, los siguientes principios:

1. Cuando la presión de la lechada supera el doble de la tensión natural existente inicialmente en el terreno, lo somete a tracción, produciendo roturas radiales alrededor del taladro, frecuentemente en un número del orden de 3.
2. La lechada se mueve buscando los menores niveles de tensión, es decir que tiene tendencia a subir hacia la superficie.
3. En la circulación de la lechada influyen, además, otros factores como son: las superficies de debilidad del terreno, las discontinuidades naturales o artificiales y la preconsolidación.

La inyección por fracturación hidráulica, normalmente se realiza aplicando la tecnología conocida como de **tubo – manguito**, aunque también se puede llevar a cabo mediante la inyección denominada de **puntaza perdida**, técnicas que han sido descritas anteriormente. Normalmente, su aplicación tiende a recomprimir un terreno natural alterado por fenómenos de disolución, o descomprimido por una excavación subterránea o de otro tipo, o también un relleno artificial no compactado, siendo habitual que estas inyecciones se denominen como **inyecciones de compensación**.

La **planificación de un tratamiento mediante inyecciones**, se realiza atendiendo a los siguientes aspectos:

1. Extensión del tratamiento, tanto en planta como en alzado, en función de la problemática existente y de los objetivos a conseguir.
2. Disposición operativa, es decir situación en planta y alzado de los taladros.
3. Pronósticos y previsiones a alcanzar con el tratamiento.
4. Pliegos de condiciones respecto a las características de las mezclas a utilizar y al proceso de inyección que se debe seguir.
5. Cuadros de precios que contemplen adecuadamente las distintas operaciones a realizar y la valoración de los volúmenes inyectados.
6. Sistema de contratación.
7. Medidas de control y comprobación de resultados.

Para el **control de las mezclas de inyección** hay que atender a:

1. Dosificación de los distintos componentes, normalmente: cemento, bentonita y agua.
2. Viscosidad inicial de la mezcla y su evolución a lo largo del tiempo
3. Decantación, es decir existencia de agua libre al estar la mezcla en reposo.
4. Rigidez que va teniendo la mezcla a lo largo del tiempo.
5. Resistencia del producto inyectado a corto y largo plazo.

Para definir el proceso de inyección es preciso establecer previamente los siguientes **parámetros de la inyección**:

1. Presión máxima a utilizar en cada manguito y fase de inyección.
2. Velocidad de inyección, para no alcanzar de manera inmediata el valor de la presión máxima.
3. Absorción, es decir volumen de mezcla a inyectar en cada manguito y fase de inyección.

Para proyectar el tratamiento de la zona prevista, es preciso definir la **disposición de los taladros**, estableciendo:

1. Separación entre taladros.
2. Orientación, cuando no se puede acceder con taladros verticales.
3. Número de filas de taladros y su relación mutua.

Finalmente, cabe indicar que el **control de un tratamiento mediante inyecciones** puede llevarse a cabo mediante los procedimientos siguientes:

1. Pruebas de permeabilidad
2. Reconocimientos geofísicos
3. Ensayos in situ
4. Nivelaciones de precisión, si el terreno está asentando o existe riesgo de levantamiento.
5. Perforación y toma de muestras del terreno tratado.

5. INYECCIONES DE COMPACTACIÓN

Son inyecciones en las que el producto de inyección compacta el terreno provocando el desplazamiento lateral del mismo, alrededor del taladro de inyección, tal como se representa en la Figura 6.

La inyección puede efectuarse por fases descendentes introduciendo la tubería de inyección, a presión, a través de las zonas previamente tratadas, o por fases ascendentes utilizando la tecnología descrita anteriormente como de **puntaza perdida**, en la que la inyección se efectúa por la parte inferior del tubo de inyección, el cual se va desplazando progresivamente hacia el exterior.

Las particularidades de esta tecnología son las siguientes:

1. La lechada debe ser muy viscosa, para que no penetre por unas supuestas roturas del terreno, ni circule por el espacio anular entre el taladro y la tubería de inyección. El asiento en el cono de Abrams puede ser de 0 a 7 cm.
2. Se requieren elevadas presiones capaces de desplazar radialmente el terreno, utilizando una bomba especial para trabajar con morteros viscosos. Se suelen alcanzar presiones cercanas a los 40 kg/cm².
3. La inyección se efectúa a velocidad lenta, con caudales inferiores a 30 litros por minuto.

Esta técnica encuentra su principal aplicación en suelos preferentemente arenosos para resolver problemas de recalce actuando bajo zapatas o bajo grupos de pilotes, en este caso para mejorar la capacidad portante de la punta o la resistencia lateral de los mismos. También ha encontrado aplicación en obras subterráneas, alrededor de túneles o por encima de las claves, para recompactar el terreno descomprimido por las obras de excavación, constituyendo, también, al igual que en el caso de las inyecciones por fracturación hidráulica, **inyecciones de compensación**.

En la bibliografía se incluye la referencia de una obra de recalce realizada en España, con aplicación de esta técnica.

6. EJEMPLO DE APLICACIÓN

A título de ejemplo se presenta a continuación el tratamiento llevado a cabo en 1980 y 1981 en la Nave de Pescados de Mercamadrid. El tratamiento efectuado fue publicado en 1985 en la Revista de Obras Públicas, en un artículo en el que se describe con detalle la problemática existente, el tratamiento realizado y los controles efectuados para comprobar la eficacia del tratamiento.

La Nave de Pescados, cuya planta se representa en la Figura 7, se encuentra situada sobre las formaciones terciarias de Madrid, constituidas por horizontes subhorizontales de arcillas o margas grises duras con intercalaciones de capas de yeso que pueden alcanzar varios metros de espesor. En el área considerada estas capas de yeso sufrieron fenómenos de carstificación, debido a la circulación de agua a través de grietas y fallas, que dieron lugar a la formación de dolinas y frentes de disolución, que originaron perfiles del terreno como el de la Figura 8. La Nave se situó, en su mayor parte, sobre el terreno natural, en desmonte, quedando el resto sobre un terraplén dispuesto en el borde de la zona afectada por el proceso cárstico. En la Figura 8 se aprecia la existencia, en la zona afectada por la disolución, de un depósito de detritus arcilloso correspondientes a los suelos que estaban situados sobre la capa carstificada. Este horizonte de detritus estaba muy flojo, debido a su formación, y sobre él se depositó una capa de terreno compactado formada por arcilla de la misma naturaleza.

Tan pronto como se terminó la construcción se detectaron asientos importantes en la zona cimentada sobre los rellenos, con velocidades que no tendían a disminuir con el tiempo y que, dada su magnitud (3 a 5 mm/mes y en una pila 20 mm/mes), aconsejaron la aplicación de medidas correctoras.

Después de estudiar varias soluciones posibles de recalce, se tomó la decisión de hacer una mejora general del terreno mediante inyecciones de cemento - bentonita, efectuando varios ensayos de inyección durante la fase previa de estudio. Estas inyecciones, con las que se pretendía recomprimir un terreno natural alterado por fenómenos de disolución o un relleno artificial no compactado, ya se ha indicado que pueden denominarse **inyecciones de compensación**.

El proyecto de tratamiento del terreno bajo la Nave de Pescados de Mercamadrid se redactó previendo aplicar, bajo las pilas, un volumen de inyección equivalente al 4,5 por 100 del volumen teórico de terreno a tratar, mientras que en el resto se limitó al 2,5 por 100. Estos porcentajes equivalían a 600 y 450 litros por metro lineal de taladro, respectivamente. Los dos metros inferiores se trataron con cantidades iguales al doble, para tener en cuenta la posible existencia de cavidades cársticas.

Para llevar a cabo el tratamiento se dispusieron 20 taladros dentro del área afectada por cada pila, formando una malla de 4,50x3,0 metros, tratando el resto de la nave con una malla de 4,5x4,0 metros.

La lechada fue una mezcla cemento - bentonita con las siguientes proporciones por metro cúbico:

- Cemento Portland (P-350-Y) 450 kp
- Bentonita 35 kp
- Agua 840 litros

Las características de la lechada fueron:

- Agua libre 1,6 a 2,0 por 100
- Viscosidad Marsh 62 a 68 segundos
- Rigidez Swissboring > 4 kPa a las 6 horas

La resistencia a compresión simple en probetas de 6 cm de diámetro y 12 cm de altura, moldeadas a presión atmosférica fue la siguiente:

- A los 3 días > 0,3 MPa

- A los 7 días $\cong 0,7$ MPa
- A los 28 días $> 1,5$ MPa

El tratamiento del terreno por debajo de las pilas se llevó a cabo con la tecnología de tubo - manguito instalando, en perforaciones de 10 cm de diámetro, tuberías de acero de 38 mm de diámetro equipadas con válvulas anti-retomo cada 50 cm. La operación se efectuó desde el fondo a la superficie, previendo diversas fases, con un volumen, en cada una, equivalente al 20% del total previsto.

En la zona pavimentada el tratamiento se llevó a cabo con la tecnología de puntaza perdida, hincando, a rotoperusión, una tubería de 50 mm de diámetro, hasta alcanzar el rechazo. Esta tubería se hacía ascender, luego, en tramos de 0,50 m, inyectando los volúmenes previstos de lechada, deteniendo el tratamiento cada 2 m para reanudar el trabajo al día siguiente.

El control de los trabajos se llevó a cabo mediante nivelaciones sistemáticas de alta precisión ($\pm 0,1$ mm), que permitieron seguir y juzgar los resultados del tratamiento. Para ello se instalaron unas buenas bases fijas de referencia, instalando redondos de acero de 24 mm de diámetro, cementados en terreno firme y protegidos mediante una tubería de plástico rellena en el exterior e interior con una mezcla plástica. Se instalaron también referencias en las pilas y columnas, constituidas por reglillas graduadas de buena calidad, divididas en milímetros, adheridas al paramento de hormigón en posición vertical, y en la solera se instalaron redondos en perforaciones de 2,0 m de profundidad.

En la Figura 9 se reproduce el gráfico de obra de las lecturas correspondientes a los dos extremos de una pila. En la primera parte de cada curva se puede deducir la velocidad de asentamiento antes de que comenzara el tratamiento. Los diagramas de barras representan los volúmenes de lechada inyectados, alrededor de la pila o por debajo de la misma. Como puede observarse, tan pronto como se inició la inyección en pilas apoyadas sobre terreno inestable, las velocidades de asiento se incrementaron, suspendiendo el trabajo si el aumento se consideraba excesivo. Al cabo de unos días la velocidad de asiento disminuía y el trabajo se volvía a reanudar.

Aplicando varias fases de tratamiento, la pila solía estabilizarse e incluso la aplicación de más inyección provocaba el levantamiento de la pila.

Los asientos de las pilas antes del tratamiento habían alcanzado valores de 10 a 13 cm. Los asientos finales después del tratamiento que duró varios meses, alcanzaron valores entre 10 y 18 cm que fueron soportados adecuadamente por la estructura metálica de carácter isostático.

Los volúmenes de inyección realmente aplicados resultaron con una media del 4,6 por 100 del terreno teóricamente tratado, con un máximo normal del 10 por 100, si bien en zonas muy específicas se llegó a alcanzar el 15 por 100.

BIBLIOGRAFÍA

ESCARIO V., RODRÍGUEZ ORTIZ J. M., MUZAS F.: ***"Refuerzo de cimentaciones mediante inyecciones de cemento - bentonita"***. Revista de Obras Públicas, Enero 1985, Págs. 13 a 24.

CAMBEFORT H., ***"Injection des sols"***. Edit. Eyroles, París, 1964.

WARNER J., ***"Compaction grouting"***. ASCE Publicación: "Grouting in Geotechnical Engineering".

BELL F. G.: ***"Methods of treatment of unstable ground"***. Newnes –Butterworths, 1975

GUARDIA A. y SOLA P. : ***"Recalce y levantamiento de un edificio de 8 plantas mediante la técnica de las inyecciones de compactación"***. Revista de Obras Públicas, Enero 1995.

FIGURAS

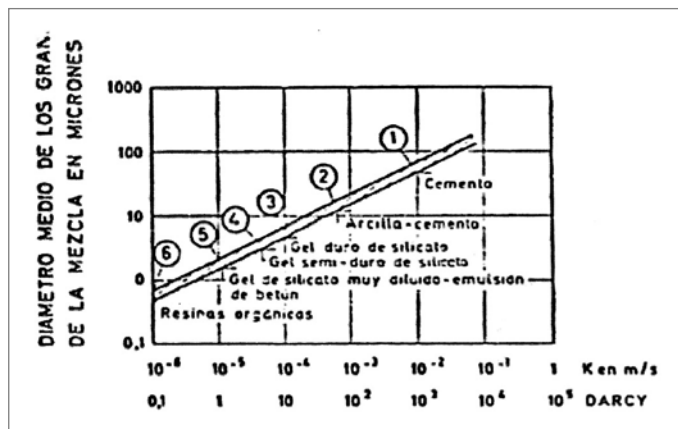


Fig. 1. Límites de inyectabilidad basados en la permeabilidad del terreno.

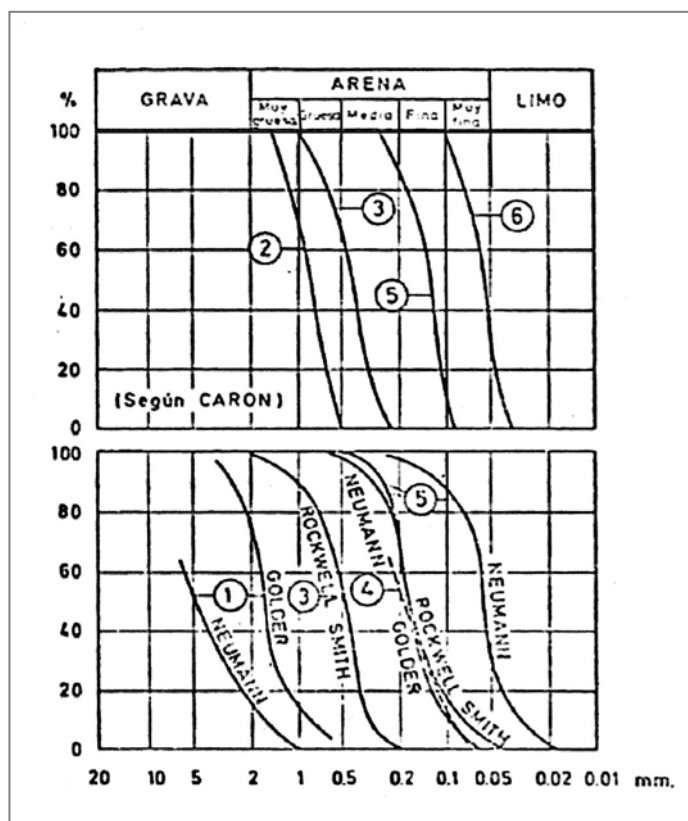


Fig. 2. Límites de inyectabilidad basados en la granulometría del terreno.

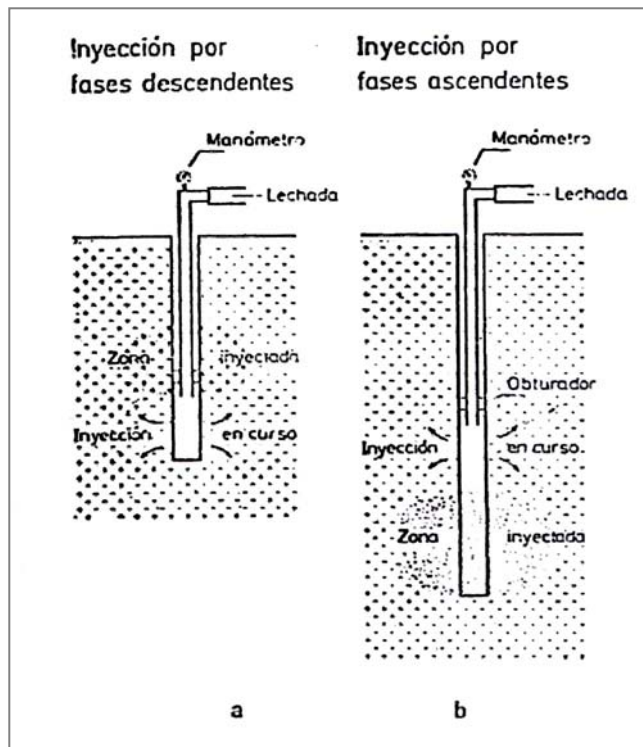


Fig. 3. Tecnología de inyección en rocas fisuradas.

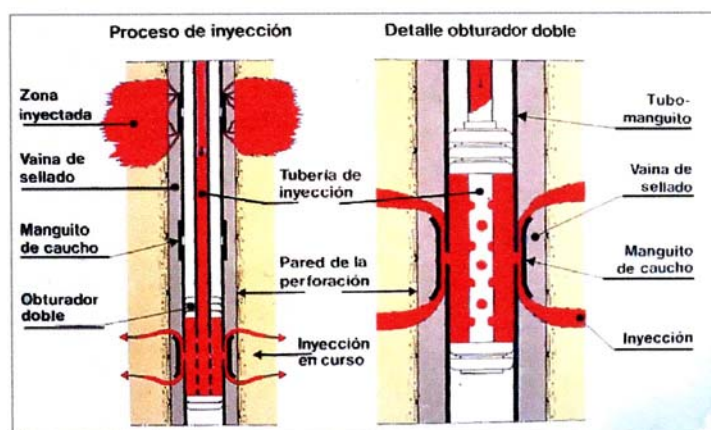


Fig. 4. Tecnología de inyección en suelos. Tubo - manguito.

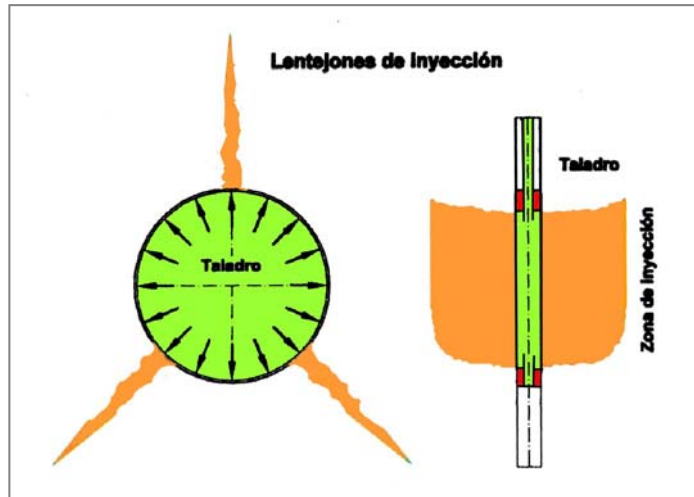


Fig. 5. Inyección por fracturación hidráulica.

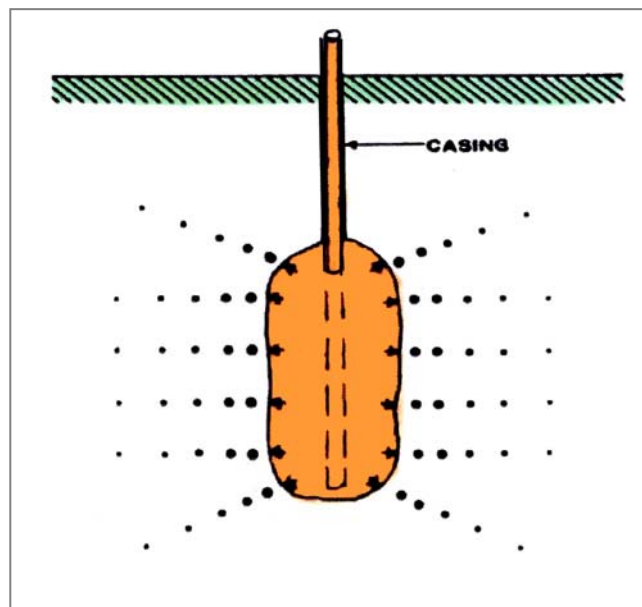


Fig. 6. Inyección con desplazamiento.

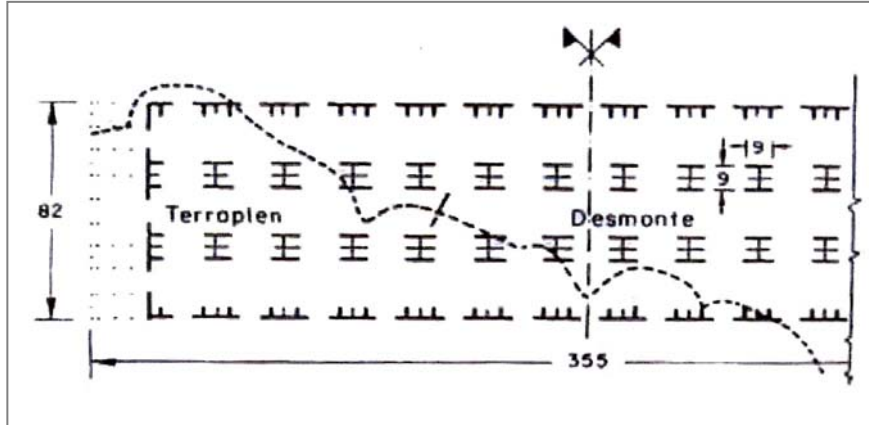


Fig. 7. Planta de la Nave de Pescados de Mercamadrid.

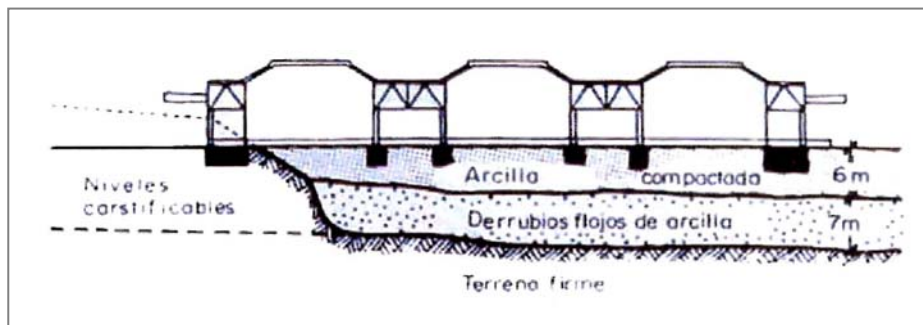


Fig. 8. Sección transversal de la Nave de Pescados de Mercamadrid.

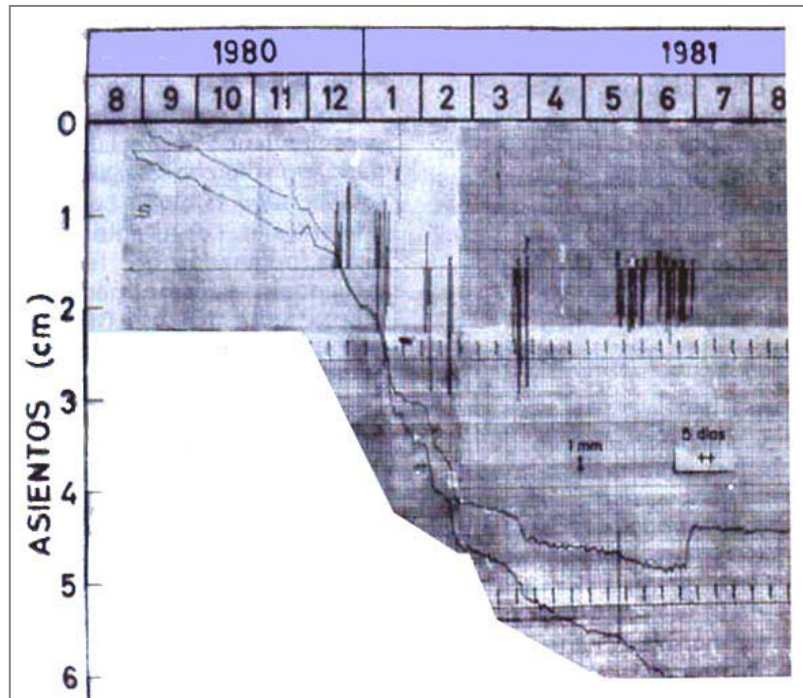


Fig. 9. Curvas típicas de asientos durante el tratamiento de la Nave de Pescados de Mercamadrid.