

# UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



La técnica del Jet-Grouting y su uso para recalces

Manuel Emilio Castellanos Mayén

Guatemala 2003





La técnica del Jet-Grouting y su  
uso para recalces

# **UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

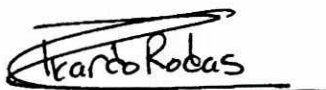
Facultad de Ciencias y Humanidades

La técnica del Jet-Grouting y su uso para recalces

Trabajo de investigación presentado por  
Manuel Emilio Castellanos Mayén  
para optar al grado académico de  
Master in Scientis en Ingeniería Estructural

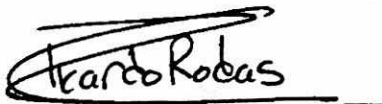
Guatemala  
2003

Asesor de tesis:

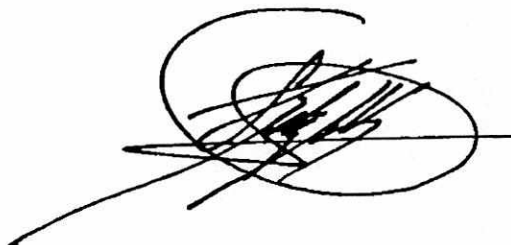
A handwritten signature in black ink, reading "Ricardo Rodas", with a horizontal line underneath.

Ing. Ricardo E. Rodas C.

Terna de Tribunal:

A handwritten signature in black ink, reading "Ricardo Rodas", with a horizontal line underneath.

Ing. Ricardo E. Rodas C.

A complex handwritten signature in black ink, featuring a large circular loop and several overlapping strokes.

Ing. Héctor Váldez A.

A handwritten signature in black ink, reading "Matzdorf", with a horizontal line underneath.

Ing. Franklin Matzdorf M.

Aprobada el 9 de Mayo de 2,003

## PREFACIO

Todas las ramas de ciencia aplicada se encuentran constantemente en desarrollo y en búsqueda de nuevas y mejores soluciones, la Ingeniería Civil no ha sido una excepción. En los últimos 30 años, investigadores y empresas de varios países han desarrollado una nueva técnica de mejoramiento de las propiedades del terreno llamada Jet-Grouting.

La finalidad del presente trabajo es dar a conocer y fomentar el uso de esta nueva técnica para que se incorpore como parte de las soluciones que se aplican actualmente en Guatemala en proyectos de Ingeniería Civil, tanto en la rama geotécnica del mejoramiento de las propiedades del suelo, como en los problemas de recalces de construcciones que se ven afectadas por un mal terreno de fundación. La poca o carente información en el país sobre esta técnica fue una dificultad, pero no un impedimento para la realización de esta tesis, gracias a la valiosa ayuda e intensa colaboración del Ing. José J. García Guirao, así como por las aportaciones de la Dra. Svetlana Melentijevic, del Ing. Leoncio Prieto Tercero y del Ing. Ricardo E. Rodas Cordón. El autor agradece de manera especial al grupo Soletanche-Bachy de Francia, Rodio de España y a Rodio-Swissboring Guatemala por la información que proporcionaron y que fue vital para llevar a cabo esta publicación.

Al mismo tiempo el autor agradece y dedica esta obra a Dios y a su familia, por su incondicional apoyo e inspiración.

# CONTENIDO

	Página
PREFACIO .....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE FOTOGRAFÍAS .....	viii
LISTA DE GRÁFICAS .....	ix
LISTA DE CUADROS .....	xi
RESUMEN .....	xii

## Capítulos

I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL JET-GROUTING .....	3
III. PROCESO CONSTRUCTIVO, EQUIPO Y TIPOS DE JET-GROUTING .....	8
IV. PARÁMETROS DE JET-GROUTING Y SU INCIDENCIA EN EL PRODUCTO FINAL .....	31
V. CONTROL DE CALIDAD Y ESPECIFICACIONES ASTM APLICABLES AL JET-GROUTING .....	53
VI. APLICACIONES DE JET-GROUTING PARA RECALCES .....	69
VII. CONCLUSIONES .....	94
VIII. BIBLIOGRAFIA .....	100
IX. APÉNDICE .....	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Tipos de inyección para mejoramiento del suelo .....	5
2. Rango de granulometrías para la aplicación de inyecciones de cemento .....	6
3. Rango de granulometrías para la aplicación de inyecciones químicas .....	6
4. Rango de granulometrías para la aplicación del Jet-Grouting .....	7
5. Paso No.2 – Perforación hasta la cota deseada .....	9
6. Paso No.3 – Inyección con chorro de lechada a alta velocidad – Jet-Grouting	10
7. Vista en planta de geometrías posibles de obtener con Jet-Grouting .....	10
8. Paso No.4 – “Pre-jet” – Erosión de suelos compactos y poco susceptibles a la erosión .....	11
9. Esquema del sistema de bola de acero .....	18
10. El Jet-Grouting monofluido .....	23
11. Jet-Grouting bi-fluido con chorros independientes .....	25
12. Jet-Grouting bi-fluido con chorro mezclado con aire .....	26
13. Jet-Grouting tri-fluido .....	27
14. Sistemas de monitoreo en las fases de perforación y de inyección a chorro..	53
15. Parámetros y energía específica de una perforación en terreno sin tratar ....	56
16. Parámetros y energía específica de una perforación en un terreno modificado con Jet-Grouting de agua y cemento .....	57
17. Sistema de mediciones de las sondas .....	58
18. Informes de la inclinación de una perforación .....	58
19. Registro de los parámetros durante la ejecución del Jet-Grouting .....	60
20. Composición mineralógica de rechazo y soilcrete .....	63

21. Detalle de las columnas de cimentación .....	73
22. Planta general del proyecto .....	73
23. Sección de la pantalla impermeable y recalce .....	74
24. Esquema del proyecto .....	75
25. Sección y detalle de la pantalla anclada y el antiguo cimiento .....	76
26. Esquema de la columnas bajo el monumento .....	78
27. Esquema del recalce de los cimientos del edificio .....	81
28. Detalles de los muros de contención por medio de columnas de jet simple ..	81
29. Planta general del proyecto .....	83
30. Sección típica del proyecto .....	83
31. Sección del proyecto .....	84
32. Vista en planta .....	85
33. Resultados de las pruebas de penetración estática .....	86
34. Puntos de los cimientos que necesitaban ser recalzados .....	87
35. Detalles de los recalces practicados .....	87
36. Planta de la iglesia y puntos de recalce .....	88
37. Estratigrafía del terreno y esquema del recalce .....	89
38. Sección de los recalces realizados .....	90
39. Esquema del recalce .....	93

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía	Página
1. Equipo utilizado en las obras de Jet-Grouting .....	12
2. Trialetas de tres y cuatro elementos cortantes .....	14
3. Tres tipos de triconos de perforación .....	15
4. Martillo de tallantes para el sistema ODEX .....	16
5. Detalle de una tobera .....	17
6. Bomba de inyección de motor Diesel .....	20
7. Chorro de alta velocidad de un jet simple .....	24
8. Chorros en un sistema de jet doble .....	26
9. Detalle de jet triple .....	28
10. Rugosidad de las columnas de prueba de suelo cemento .....	41
11. Rugosidad de la superficie de columnas de suelo cemento .....	42
12. Columnas de Jet-Grouting .....	50
13. Columna de gran diámetro .....	51
14. Variación del diámetro para una misma energía utilizada en jet simple y jet doble – Columna de prueba para el recalce de la línea “C” RER de París	51
15. Diámetro de una columna de prueba de sección semi-circular .....	52
16. Testigo de una columna de Jet-Grouting .....	67
17. Detalle de testigos extraídos de una columna de Jet-Grouting .....	67
18. Fotografía del proyecto durante su ejecución .....	79
19. Fotografía del equipo montado sobre un carro de ferrocarril .....	91
20. Fotografía de la fachada de ambos edificios .....	92

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica	Página
1. Relaciones de caudal-presión para distintas bombas de inyección .....	20
2. Relación de energía específica de Jet-Grouting con diámetros de columnas de suelo tratado .....	32
3. Relación presión de inyección versus diámetro de columnas de suelo-cemento .....	33
4. Disminución de la presión del fluido de erosión según la distancia al eje de la tubería .....	34
5. Relación de consumo de cemento y densidad de la lechada con el diámetro y resistencia de columnas de suelo-cemento .....	35
6. Relación de volumen de lechada inyectado con diámetros de columnas según el tipo de suelo .....	37
7. Relación entre el diámetro de la columna y la velocidad de ascenso de la tubería .....	38
8. Efecto de la velocidad de ascenso de la tubería en el volumen de lechada inyectado .....	39
9. Relación de diámetros efectivos de columnas con el número de golpes de SPT en suelos cohesivos .....	40
10. Relación entre energía específica del Jet-Grouting con las dimensiones de la rugosidad de la superficie de columnas de suelo cemento .....	41
11. Variación de la resistencia del suelo cemento con respecto a su edad y según distintos tipos de suelo .....	44

12. Variación de la resistencia a la compresión no confinada de testigos de suelo cemento respecto a la profundidad y distancia radial al eje de inyección ....	45
13. Resultados de pruebas de alta presión efectiva en testigos de suelo cemento de Jet-Grouting .....	46
14. Características de testigos de suelo cemento obtenidos durante el proyecto GOPAL .....	47
15. Resistencia a la compresión no confinada de testigos de suelo tratado y no tratado con la técnica del Jet-Grouting .....	48
16. Relación entre resistencia a la compresión uniaxial y la densidad seca .....	61
17. Relaciones de densidad seca con módulo de elasticidad y razón de Poisson	62
18. Densidades del rechazo a distintas profundidades y tipos de columnas .....	65
19. Promedio de densidades del rechazo versus profundidad de la columna ....	65
20. Relación entre energía de Jet-Grouting y diámetro de columnas para las arenas del río Nilo con jet doble .....	66

## LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Diámetros de barras del sistema ODEX .....	13
2. Producciones típicas de rechazo .....	29
3. Parámetros comunes en proyectos de Jet-Grouting .....	30
4. Efecto de la velocidad de ascenso de la tubería en el volumen de lechada inyectado .....	39
5. Rangos de resistencia a la compresión no confinada de la masa de suelo cemento obtenida con el Jet-Grouting .....	43
6. Variación de la resistencia a la compresión no confinada según el tipo de Jet-Grouting y suelo .....	44
7. Diámetros de columnas de suelo cemento producidos por los tipos de Jet-Grouting según el material del terreno .....	49
8. Esfuerzos de tensión y compresión de rechazo y soilcrete .....	61
9. Densidades del rechazo para diferentes diámetros de columnas de jet simple	64
10. Densidades del rechazo en distintos tipos de columnas .....	64

## RESUMEN

La técnica del Jet-Grouting como un método de mejoramiento de las propiedades del terreno fue creada y desarrollada en Japón alrededor de los años 70, y actualmente se encuentra bajo constante innovación. Esta técnica se clasifica como un método de inyección de una lechada de agente cementante que mejora las características del suelo, y que no depende de la granulometría del terreno para su actuación. La diferencia, entre el Jet-Grouting y los otros métodos de inyección, es que utiliza un chorro de alta velocidad como energía de erosión para romper la estructura del suelo al mismo tiempo que inyecta y mezcla una lechada con el suelo, a fin de crear una nueva masa con mejores propiedades físicas.

Actualmente existen tres tipos de Jet-Grouting, agrupados en un sistema mono-fluido, en el que se utiliza únicamente un líquido para corte y relleno del suelo. Y en un sistema poli-fluidos, que involucra más de un fluido en su proceso. Dentro del sistema poli-fluidos está el jet bi-fluido y el jet tri-fluido.

Para su ejecución, independientemente de los tipos de Jet-Grouting, se requiere de una máquina perforadora, tubería de perforación especial equipada en su punta con toberas de inyección y de bombas de alta presión que deben de ser suministradas constantemente con grandes volúmenes de lechada de agente cementante.

El resultado que se obtiene de la aplicación del Jet-Grouting es un mejoramiento de la capacidad del suelo de soportar carga, disminuye o elimina problemas de asentamiento por consolidaciones del terreno. Así como también se utiliza para transferir las cargas de la cimentación de una edificación a estratos de suelo más profundos o competentes.

Todas estas y otras ventajas que conlleva el Jet-Grouting hacen que su aplicación sea el indicado para solucionar muchos problemas de recalce, como se muestra en las

obras de recalce llevadas a cabo por la empresa Soletanche-Bachy de Francia y que aquí se exponen algunas de ellas.

El desarrollo tecnológico de distintas ciencias ha propiciado el desarrollo de sistemas de control de calidad que registran y evalúan la construcción del Jet-Grouting antes, durante y después de la ejecución de la inyección del suelo, a fin de asegurar el éxito de su aplicación.

# I. INTRODUCCIÓN

Desde los años 70 se ha venido desarrollando una nueva técnica para mejorar propiedades del suelo que son de interés en la Ingeniería Civil. Esta técnica se conoce actualmente como Jet-Grouting, la cual utiliza un chorro de alta velocidad como fuente de energía de erosión para romper la estructura del suelo y para rellenar los vacíos creados con una mezcla de suelo y agente cementante. Pero, ¿de qué se trata este método, cómo funciona, qué beneficios o ventajas supone esta nueva técnica frente a los métodos clásicos de mejoramiento del terreno? ¿Tiene alguna limitante el Jet-Grouting o bajo qué condiciones de suelo y/o situaciones se puede aplicar? ¿Cuáles son los resultados que se obtienen con el Jet-Grouting, y cómo pueden aplicarse estos a las estructuras existentes?

La finalidad del presente trabajo es dar respuesta a cada una de estas interrogantes y explicar la técnica para así llegar a concluir si la afirmación (hipótesis en la que se basa el presente trabajo) de que el Jet-Grouting es aplicable como una solución de casos de recalce de estructuras es verdadera o no. Un objetivo secundario de esta publicación es dar a conocer la técnica del Jet-Grouting en el medio de la Ingeniería Civil de Guatemala como una solución geotécnica y un método de recalce de estructuras.

La metodología de trabajo para la elaboración de esta tesis consistió básicamente en investigación bibliográfica y en consultas a profesionales de empresas que han aplicado esta técnica a nivel mundial, y que de alguna manera, han ayudado a su desarrollo.

La tecnología y diseño del Jet-Grouting están basados en la propiedad de los suelos a ser erosionados y en cambios de energía de fluidos. Las fórmulas que se aplican van desde la simple ecuación de Bernoulli para fluidos, hasta complejas relaciones que involucran conservación de energía, balance de masas, relación de caudales y teoría de hidrodinámica. Esto indica que los resultados de mejoramiento del terreno que se llegan a obtener con el Jet-Grouting dependen tanto del tipo y propiedades del suelo que se trata, como de la energía que se le imprime al sistema. Por esta razón es que los suelos arcillosos y cohesivos son los que menor respuesta al tratamiento tienen y los que

requieren de mayor energía de jet, ya que son menos propensos a la erosión y a sus bajas propiedades de resistencia de carga. Mientras que los suelos granulares, tipo arena y grava, son los suelos más adecuados a ser tratados mediante el Jet-Grouting por sus excelentes propiedades.

Esto quiere decir que el Jet-Grouting puede aplicarse a prácticamente casi todo tipo de suelo, lo que hace a este método una solución técnica muy atractiva, además de brindar muchas otras ventajas que la hacen propicia para ejecutar recalces con ella.

A fin de introducirle al lector la idea de la técnica de Jet-Grouting se procede en los siguientes capítulos a definirla, a enmarcarla en la rama de las técnicas del mejoramiento del terreno que se encuentra, a describir los procesos que conlleva su construcción y la maquinaria que se requiere para ello. Seguidamente se expone qué producto y resultados se consiguen luego de practicar el Jet-Grouting en los distintos tipos de suelo, bajo qué condiciones se alcanzan estos y qué controles existen para asegurar la calidad de los proyectos.

Basado en toda esta información, se presentan en los dos últimos capítulos del cuerpo principal de este trabajo, las ventajas que supone el uso del Jet-Grouting como una solución a los casos de recalce de estructuras, se citan proyectos ejecutados por la empresa francesa Soletanche-Bachy y/o sus filiales en todo el mundo y se exponen las conclusiones a las que llega el autor.

Adicionalmente se anexa un capítulo de apéndices, en el que se expone información relativa a los rendimientos de trabajo y producción de volúmenes de rechazo que se pueden obtener en proyectos de Jet-Grouting. Además, se incluyen otros tipos de actividades de Ingeniería Civil en los que esta técnica es factible.

## II. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL JET-GROUTING

El Jet-Grouting es básicamente un método de tratamiento para mejorar el terreno por debajo de la superficie. Fue desarrollado en Japón a comienzos de los años 70. Según Bielza Feliú (1999) su concepción y primeros usos de la técnica se remontan a los años 60 en este mismo país, pero su aplicación sistemática fue en los años 70 y basada en investigaciones realizadas por los japoneses Yahiro, Yoshida y Nishi del Kajima Institute of Construction Technology de Tokio, Japón. Estas investigaciones fueron dadas a conocer en el año de 1973 durante el Congreso Internacional de Mecánica de Suelos celebrado en Moscú. Desde entonces el Jet-Grouting ha tenido aceptación y uso durante más de diez años en Europa, Estados Unidos de América, Suramérica y en los países que conformaban la Unión Soviética.

El comité de Ingeniería Geotécnica de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles dedicado a las inyecciones en el suelo por medio de lechadas, definió en 1980 al Jet-Grouting como una técnica en la que se utiliza tubería especial de perforación que combina chorros de agua horizontales y verticales a alta presión para excavar suelos. Y cuya finalidad es producir columnas duras e impermeables por medio del bombeo de una lechada de agente cementante a través de toberas horizontales, la cual que se mezcla con el suelo mientras se extrae la tubería de perforación.

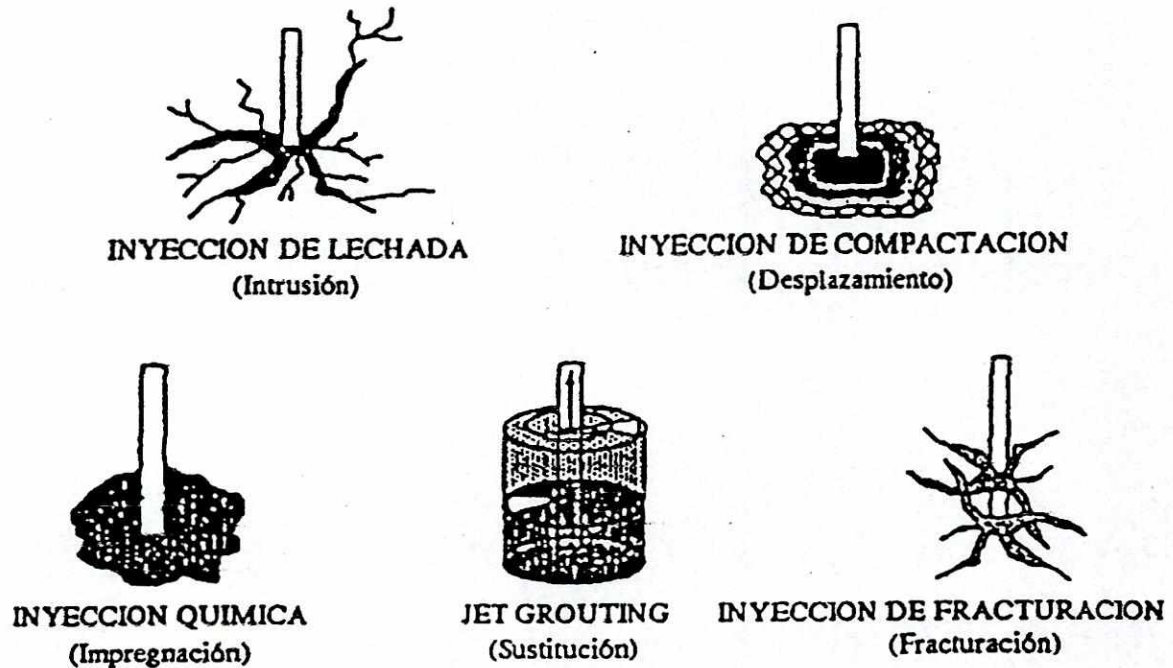
Según las vertientes que se han seguido durante el desarrollo del Jet-Grouting se puede definir a esta técnica como un método de mejora en masa del terreno, así como un sistema cuyo objetivo es la creación de cuerpos o masas de terreno tratado con una geometría más o menos definida (Sopeña, 2002).

Existen varias técnicas de mejoramiento del suelo por medio de inyecciones, cuya finalidad es la de mejorar las características de resistencia, deformabilidad e impermeabilidad del terreno. Estas técnicas se aplican dependiendo del tipo de suelo, mientras que el Jet-Grouting es aplicable a cualquier tipo de terreno. Dentro de estas técnicas se encuentran las siguientes:

- *Inyecciones por intrusión.* En ellas la lechada del agente cementante es introducido en el suelo a baja presión para llenar sus vacíos sin modificar significativamente la estructura y volumen del terreno. En este tipo de inyección, la permeabilidad del suelo juega un papel importante y determinante para la selección del agente cementante (para permeabilidades mayores a  $10^{-2}$  cm/seg se utilizan lechadas de agua y cemento, mientras que para valores de permeabilidad tan bajas como  $10^{-5}$  cm/seg la utilización de resinas es la indicada). Los suelos con permeabilidades menores a  $10^{-6}$  cm/seg no pueden ser tratados con esta técnica.
- *Inyecciones de desplazamiento.* Conocidas también como inyecciones de compactación, son aquellas en las cuales se introduce una lechada altamente viscosa y con alta fricción interna dentro de un suelo capaz de compactarse. En este tipo de inyecciones la lechada actúa radialmente y análogamente a un gato hidráulico que desplaza físicamente las partículas del suelo, obteniéndose una densificación controlada del terreno.
- *Inyecciones de fracturación.* En las que se utilizan tubos-manguitos, por medio de los cuales se introduce la lechada cementante a presiones altas para fracturar el suelo, y para rellenar con la misma lechada las fisuras producidas en el proceso. El resultado que se obtiene es una compresión del suelo circundante y una masa de suelo de mayor densidad.

En la figura No. 1 se muestran esquemas de las distintas técnicas de mejoramiento del terreno por medio de inyecciones.

**FIGURA No. 1**  
**Tipos de inyección para mejoramiento del suelo**



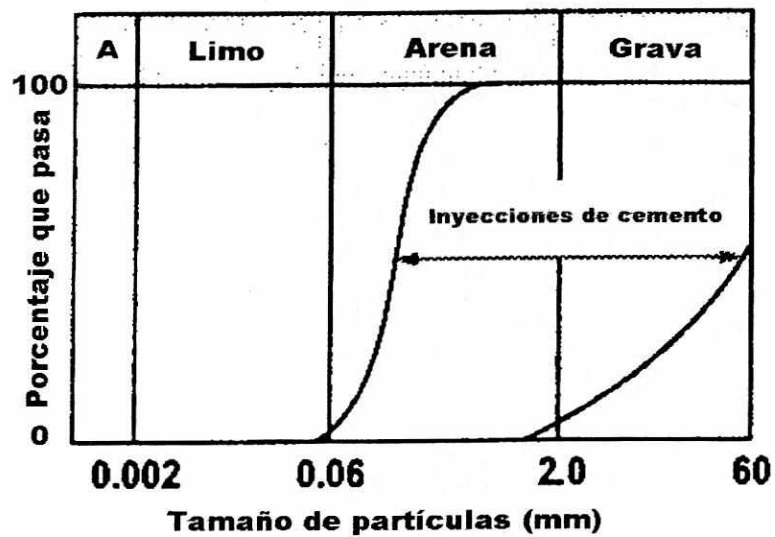
(Sopeña, 2002)

El Jet-Grouting viene a ser un tipo de mejoramiento del suelo por medio de inyecciones completamente distinto e innovador, ya que su aplicación y tipo de lechada no depende de la permeabilidad del suelo ni del tamaño de las partículas que componen el terreno. El Jet-Grouting utiliza la energía de la erosión en el terreno para permitir la introducción de la lechada de inyección, esto hace posible la aplicación de esta técnica en prácticamente cualquier tipo de terreno (desde las arcillas hasta las gravas). Este método se clasifica como una inyección a alta velocidad.

A continuación se muestran los rangos de granulometrías para las cuales son factibles las inyecciones de cemento o de resinas químicas (figuras No. 2 y No. 3), mientras que el Jet-Grouting abarca un mayor rango que incluye las granulometrías de las otras

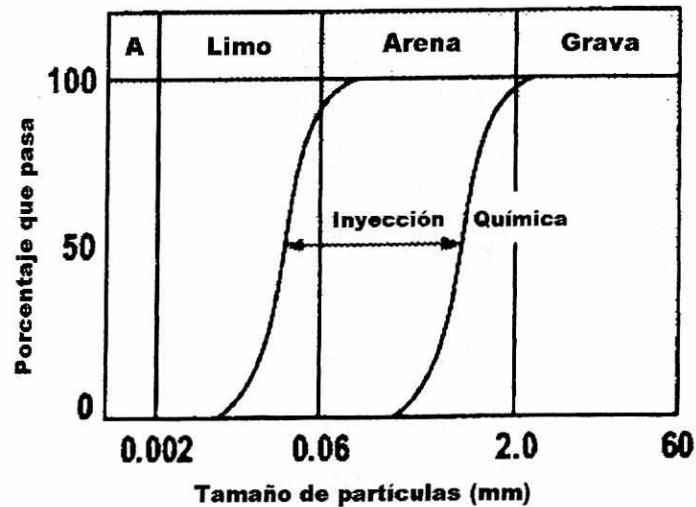
inyecciones gracias a su no dependencia directa en la permeabilidad del suelo (figura No. 4).

**FIGURA No. 2**  
Rango de granulometrías para la aplicación de inyecciones de cemento



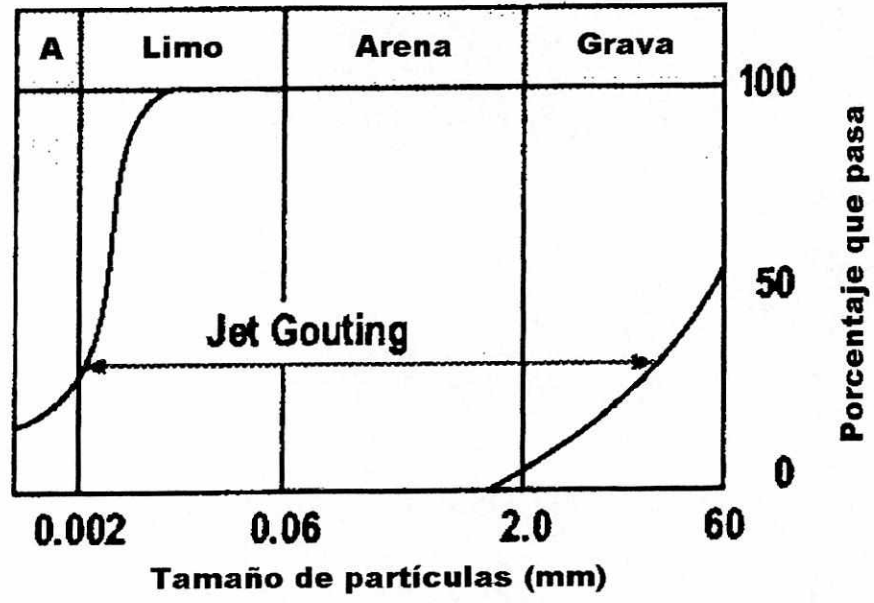
(Fuente: Sopeña, 2002)

**FIGURA No. 3**  
Rango de granulometrías para la aplicación de inyecciones químicas



(Fuente: Sopeña, 2002)

**FIGURA No. 4**  
**Rango de granulometrías para la aplicación del Jet-Grouting**



(Fuente: Sopeña, 2002)

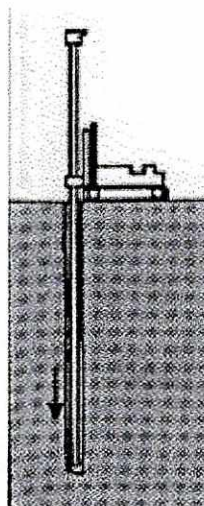
### **III. PROCESO CONSTRUCTIVO, EQUIPO Y TIPOS DE JET-GROUTING**

#### **A. Proceso constructivo**

El procedimiento que sigue la construcción del Jet-Grouting no varía mucho con respecto al comúnmente utilizado en la perforación para la construcción de anclajes, micropilotes o en campañas de sondeos geotécnicos sin recuperación de núcleos de suelo. Este procedimiento está compuesto por tres pasos esenciales y uno opcional, que suele llevarse a cabo cuando el terreno no es fácil de erosionar. A continuación se exponen cada uno de estos pasos que constituyen el método:

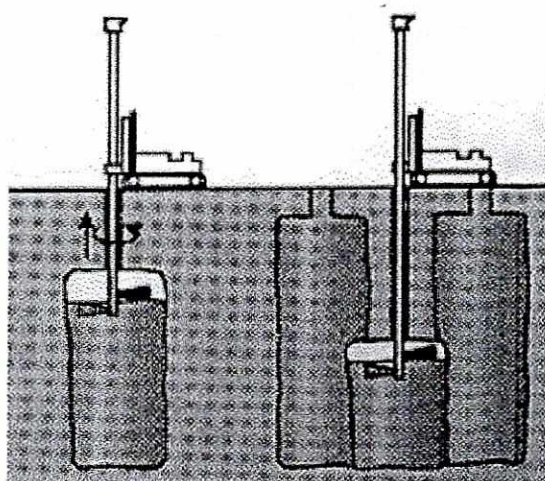
1. **Primer Paso – Instalación de maquinaria.** Sobre el punto identificado topográficamente con anterioridad, se instala la perforadora, se nivela sobre una plataforma de trabajo y se acondiciona su mástil a fin de darle la inclinación requerida por el diseño a la perforación que se efectuará.
2. **Segundo Paso – Ejecución de la perforación.** La perforación se lleva a cabo a rotación hasta la cota deseada utilizando un tricono o trialeta como elemento de corte que permite aportar un fluido de perforación acorde a las condiciones y tipo de suelo en el que se efectúa el taladro. En el 90% de proyectos se utiliza agua como fluido de perforación; en el 10% restante se usa lechada de cemento, una mezcla de bentonita-cemento o espumas de productos químicos. Se usa lechada de cemento cuando se tiene la complicación de desprendimiento de las paredes del taladro; se usa la mezcla de bentonita-cemento cuando hay peligro de que la tubería de perforación quede aprisionada cuando se perfora hasta profundidades considerablemente grandes; las espumas de productos químicos se usan en los casos en los que el terreno es muy abierto. (Véase la figura No. 5 obtenida de Hayward Baker – A Keller Company)

**FIGURA No. 5**  
**Paso No. 2 - Perforación hasta la cota deseada**



3. Tercer Paso – Inyección a chorro de alta velocidad. Consiste en la habilitación de las toberas para la inyección con chorro de alta velocidad y en la cancelación de la o las aberturas utilizadas para la evacuación del fluido de perforación. En seguida se inicia el proceso de inyección de la lechada del agente cementante desde el fondo de la perforación hacia arriba, extrayendo, a velocidades controladas, la tubería de perforación y rotándola 360 grados a una revolución constante o variable, o bien, sin darle rotación a los tramos de tubo o con rotaciones restringidas a ciertos ángulos nada más. La forma de rotación depende de la geometría de la masa de suelo tratado que se desea obtener, la cual será cilíndrica si se permite rotar la tubería sin restricciones (a 360 grados); secciones semi-circulares si se rota menos de 360 grados o paneles planos si no hay movimiento de la tubería salvo el de ascensión (véase la Figura No. 7 para observar las geometrías que se pueden obtener).

**FIGURA No. 6**  
**Paso No.3 - Inyección con chorro de lechada a alta velocidad – Jet-Grouting**



**FIGURA No. 7**

**Vista en planta de geometrías posibles de obtener con Jet-Grouting**



Full Column



Half Column



Partial Column



Single Panel Wall



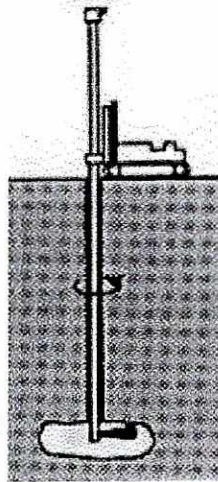
Double Panel Wall

(Hayward Baker – A Keller Company)

4. Cuarto Paso – “Pre-jet”. Este paso, conocido como “pre-jet”, puede formar parte del procedimiento constructivo, y se realiza después de la perforación (paso No. 2) y antes de la inyección (paso No. 3). Este paso se efectúa cuando se encuentran estratos de suelo compactos que son poco susceptibles a la erosión de la lechada de inyección; su finalidad es la de romper la estructura del suelo y crear una

pequeña caverna en el terreno a fin de obtener el diámetro deseado de la columna de suelo tratado cuando se inyecte con el chorro de alta velocidad la lechada del agente cementante (Jet-Grouting). Esta erosión se lleva a cabo con un chorro de alta velocidad de agua, agua y aire o solo de aire, que se expulsa a través de la o las toberas. En este paso se extrae la tubería hasta la cota a la que inicia el o los estratos que no son fácilmente erosionables y se desciende la tubería nuevamente aplicando el chorro arriba mencionado. Esto se puede hacer hasta llegar a la cota del fondo de la perforación, o bien, hasta una profundidad previamente establecida en donde el terreno ya no presente una complicación al proceso de erosión.

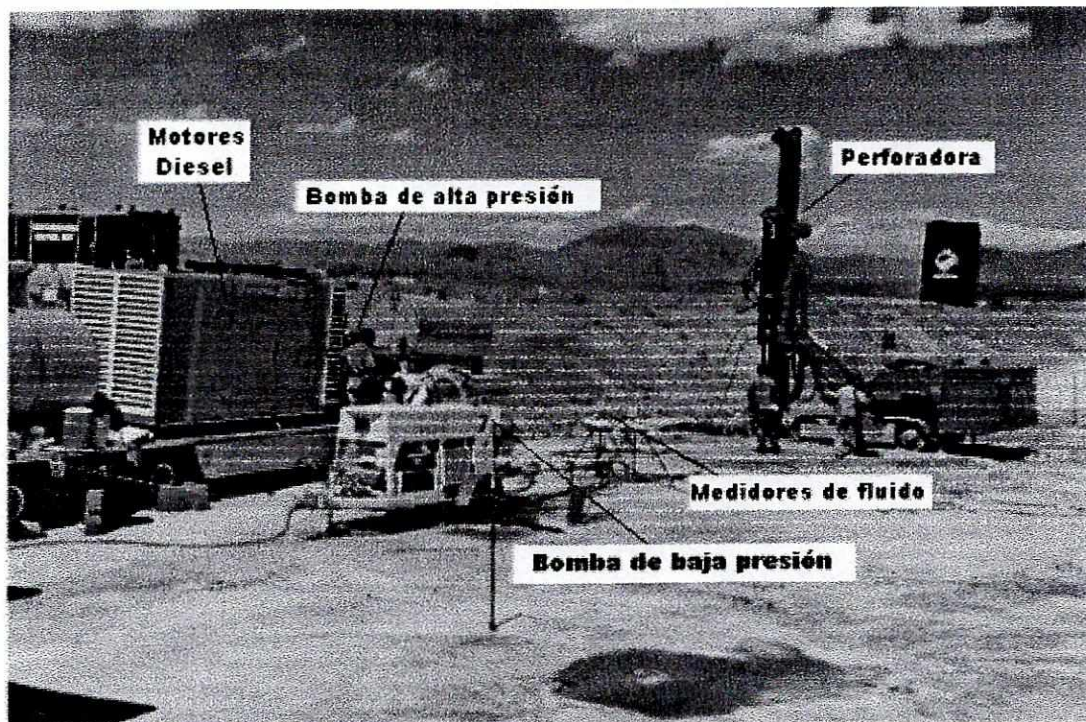
**FIGURA No. 8**  
**Paso No.4 - "Pre-Jet" – Erosión de suelos compactos**  
**y poco susceptibles a la erosión**



## B. Equipo utilizado en la ejecución del Jet-Grouting

A continuación se detalla el equipo utilizado para cualquier instalación de Jet-Grouting y específico de esta técnica, parte del cual se puede apreciar en la fotografía No. 1

**FOTOGRAFÍA No. 1**  
**Equipo utilizado en las obras de Jet-Grouting**



(Fotografía de Equipos Casagrande)

- Máquina perforadora. Son relativamente pequeñas, auto-propulsadas con motores accionados por diesel o energía eléctrica, equipadas con motores (cabezas) de rotación hidráulicos o neumáticos en su mástil. Básicamente son máquinas que poseen las mismas características que aquellas que se utilizan en las obras de ejecución de micropilotes y anclajes, pero equipadas con controles y mecanismos capaces de garantizar una velocidad de giro y de ascenso de la cabeza de rotación cuando se está en el proceso de inyección de la lechada de agente cementante. La velocidad de ascenso de la cabeza de rotación es medida con respecto al mástil de la máquina perforadora. El operador deberá tener la opción de variarla para adaptar el tratamiento a los distintos estratos que componen el terreno y así cumplir con las necesidades del proyecto durante la inyección de un taladro. El rango de velocidades de ascenso varía de 8 a 60 centímetros por minuto y el rango de la rotación del varillaje oscila entre 5 a 50 revoluciones por minuto.

- Tubería de perforación especialmente diseñados para el Jet-Grouting. Los tramos de tubo de perforación e inyección están hechos con aceros tratados y los fabrican en longitudes que varían de 1 metro a 6 metros. Los diámetros varían según la casa que los produce, encontrándose en el rango de 60 a 114 milímetros de diámetro exterior. Esta tubería es fabricada con roscas para unir los tramos entre sí y de tal forma que sean capaces de dejar pasar el fluido de perforación e inyección sin riesgo de fugas debido a las altas presiones con las que se operan los fluidos. Al mismo tiempo, según el tipo de Jet-Grouting que se desea construir, esta tubería deberá tener la capacidad de permitir el paso de dos fluidos distintos a través de ella, sin mezclarse y con diferentes presiones de trabajo. A continuación se presentan los diámetros típicos del sistema patentado, ODEX, el cual es uno de los variados sistemas de tubería que se utiliza comúnmente en el Jet-Grouting simple (más adelante se explica el significado del Jet simple).

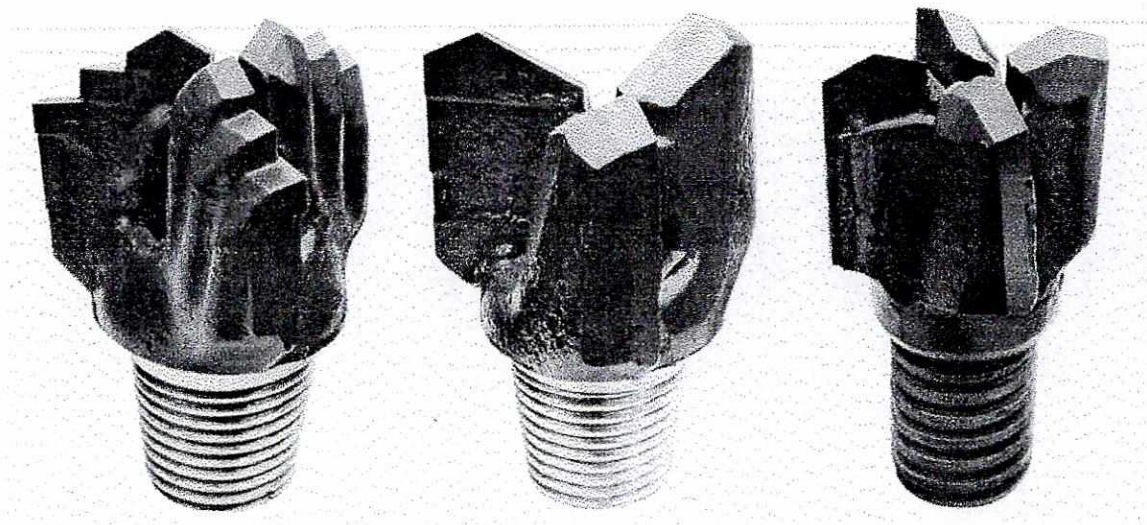
**CUADRO No. 1:  
Diámetros de barras del sistema ODEX**

Sistema ODEX	Diámetro perforado (mm)	Tubería soldable			Tubería roscada		
		Diámetro externo máximo (mm)	Diámetro interno mínimo (mm)	Espesor de pared mínimo (mm)	Diámetro externo máximo (mm)	Diámetro interno mínimo (mm)	Espesor de pared mínimo (mm)
ODEX 76	96	89	78	11	88.9	83.4	5.5
ODEX 115	152	142	128	5	114.3	108	6.3

- Herramienta de corte. Se selecciona de acuerdo al tipo de suelo que se perforará; ésta suele ser por lo general trialetas o triconos (véanse las fotografías No.2 a la No. 4). Cabe mencionar, que la selección del diámetro del útil de perforación dependerá de la operación posterior de inyección, ya que debe existir un espacio anular entre el diámetro de perforación del útil y la tubería para facilitar la evacuación del suelo y de la mezcla de suelo-cemento, comúnmente llamado “rechazo”, que se produce durante la fase de inyección. Las combinaciones mínimas de la relación

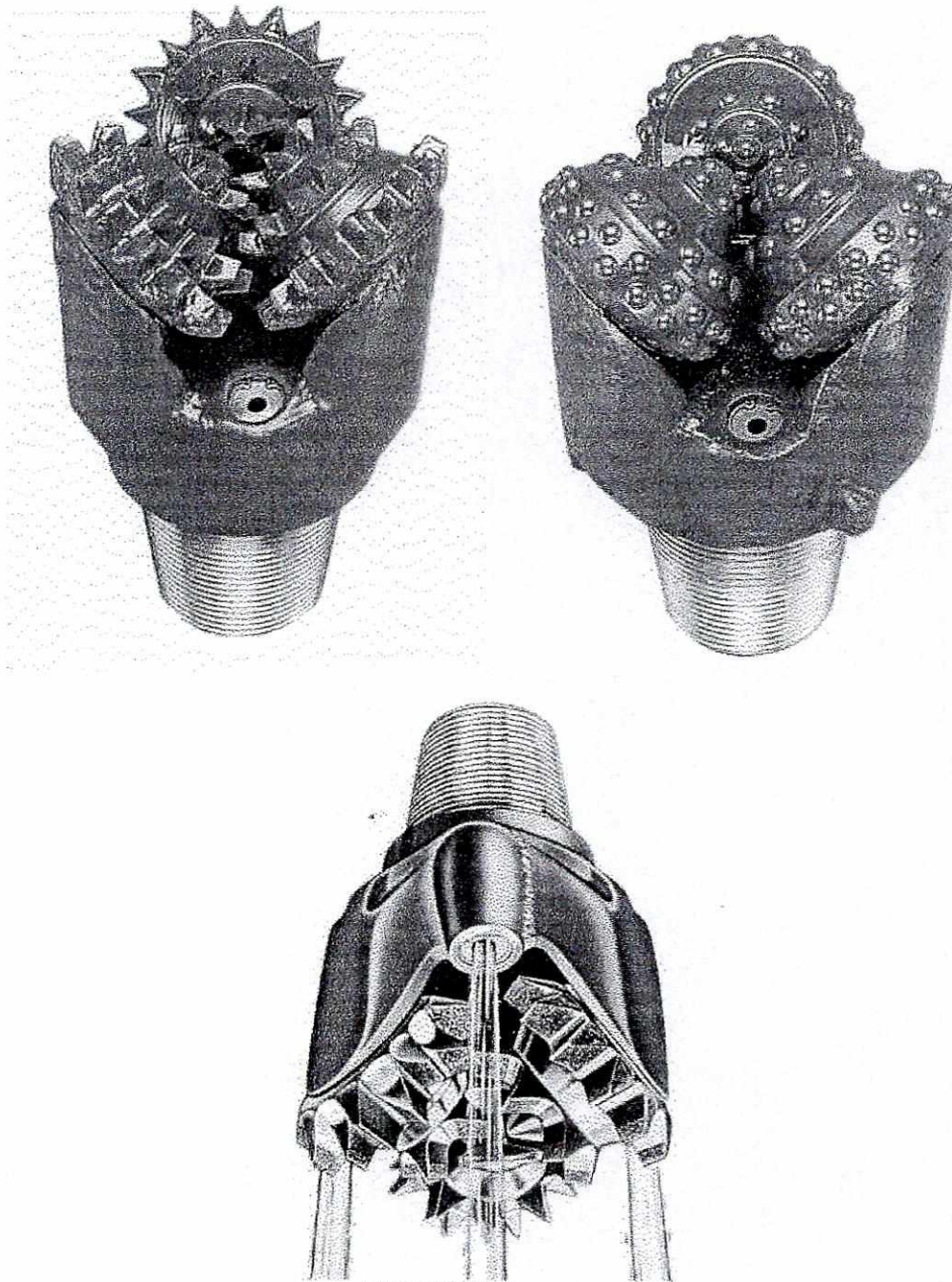
diámetro de corte a diámetro de la tubería que se recomiendan en la práctica son 75/60 mm, 110/90 mm ó 132/90 mm. La combinación correcta a utilizar depende de la granulometría del suelo; a mayor tamaño de partículas de suelo mayor espacio anular será necesario y a un menor tamaño de partículas de suelo, menor relación se podrá utilizar. Al mismo tiempo, la relación de estos diámetros deberá escogerse dependiendo del tipo de suelo y el tipo de rechazo que se espera, ya que los suelos arcillosos (con cohesión) generan tipos de rechazo relativamente viscosos que difícilmente salen durante la inyección, mientras que los suelos no cohesivos y con granos de tamaño de arenas finas producen una mezcla de suelo-cemento más fluido que se expulsa con mayor facilidad. En casos extremos se pueden llegar a relaciones de diámetro de 90/60 mm o de 150/90 mm.

**FOTOGRAFÍA No 2:**  
**Trialetas de tres y cuatro elementos cortantes**



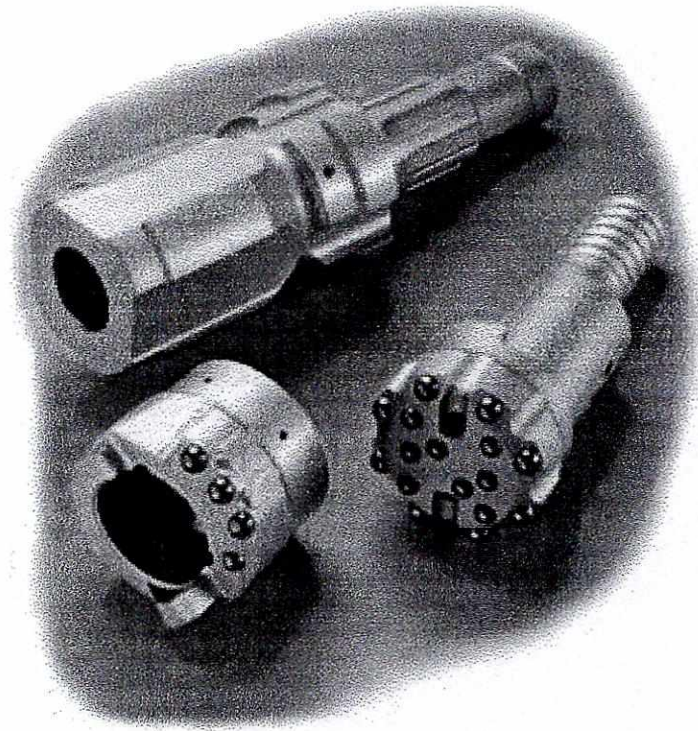
(Fotografía de Longyear)

**FOTOGRAFÍA No. 3:**  
**Tres tipos de triconos de perforación**



(Fotografía de Longyear)

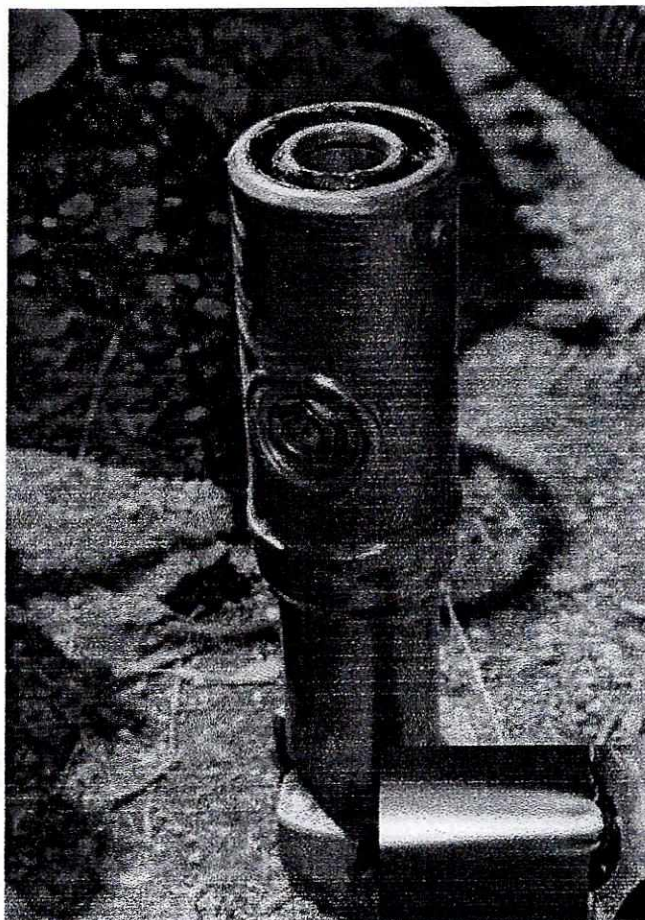
**FOTOGRAFÍA No. 4 :**  
**Martillo de tallantes para el sistema ODEX**



(Fotografía de ODEX)

- Toberas de inyección. Las toberas en el extremo inferior de la tubería constituyen el punto importante y distintivo del Jet-Grouting, ya que es a través de éstas que sale el chorro de la lechada del agente cementante a alta velocidad y debido a su tamaño es que se convierte la presión en velocidad con energía de erosión propia del método. Estas toberas, al igual que la tubería de perforación, son fabricadas con aceros tratados debido a que se ven sometidas a una intensa abrasión por la lechada de inyección. Los diámetros en los que son producidas varían entre 1.8 milímetros y 5 milímetros, dependiendo de la casa fabricante y del suelo que se desea tratar.

**FOTOGRAFÍA No. 5:**  
**Detalle de una tobera**  
**(inserto un chorro de lechada saliendo a través de la tobera)**



(Fotografía de Soletanche-Bachy)

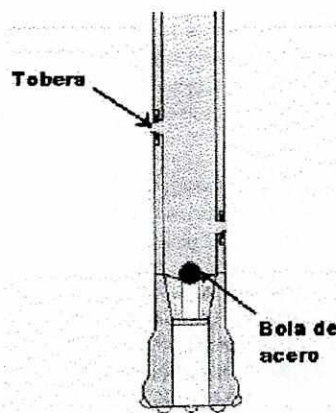
La colocación de las toberas se puede hacer de dos maneras:

Colocándolas en un tramo de tubo especial y con el mismo el mismo diámetro que la tubería de perforación, conocido como “porta-toberas”, cuya longitud oscila entre los 20 a los 40 centímetros. Este tramo se instala entre la tubería de perforación y el útil de corte. El porta-toberas está equipado en su parte inferior con una válvula que se abre o se cierra dependiendo de la fase de construcción en la que se encuentra el proceso. Durante la fase de perforación la válvula se encuentra abierta para permitir que el fluido de perforación salga por el útil de corte para lubricar, erosionar y refrigerarlo; mientras que en la etapa de inyección ésta se cierra para obligar a que la

lechada de inyección sea evacuada exclusivamente a través de las toberas. Este mecanismo que permite o cancela el paso de la lechada hacia el útil de corte es simplificado por algunos fabricantes con un sencillo sistema de bola de acero que tapona la salida. La desventaja del sistema de bola de acero es que ésta debe retirarse del porta-toberas cada vez que se procederá a iniciar la perforación. Sin embargo, la ventaja que presentan ambos tipos de mecanismos en los porta-toberas, ya sea el de válvulas o el de la bola de acero, es que se pueden alcanzar caudales considerables de fluido de perforación a través del útil de corte sin necesidad de recurrir a un incremento de presión de este fluido.

La otra opción consiste en utilizar herramientas de corte que no cuentan con agujeros centrales para la salida del fluido de perforación, o bien, que los tienen anulados. En esta opción, la salida del fluido de perforación se hace a través de una/s tobera/s instalada/s en el mismo elemento de corte de tal manera que exista un pequeño ángulo formado con el eje de la tubería (las demás toberas serán instaladas con ángulos rectos con respecto al eje de los tramos de tubo). El inconveniente de esta modalidad es que se requiere de bombas capaces de generar altas presiones para asegurar grandes caudales del fluido de perforación; sin embargo, la ventaja es que no existe el riesgo del fracaso del Jet-Grouting debido a un mal funcionamiento del mecanismo del porta-toberas.

**FIGURA No. 9**  
**Esquema del sistema de bola de acero**



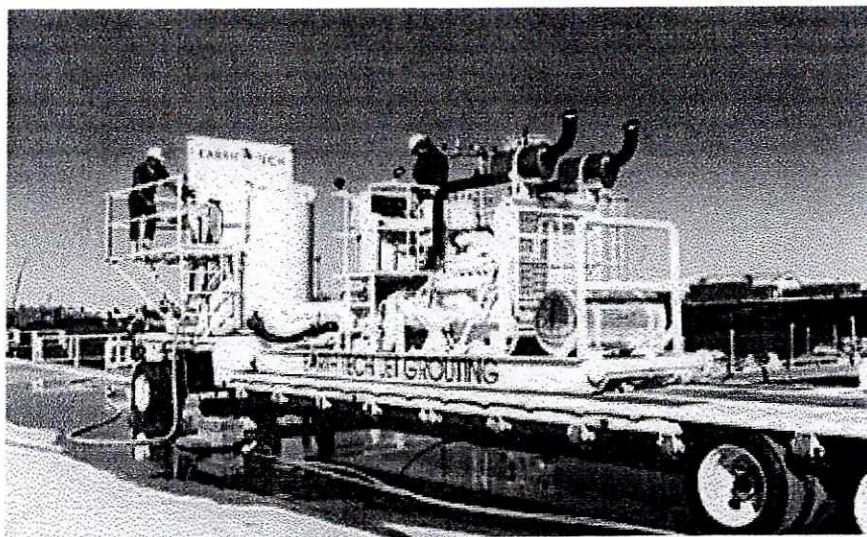
(F. Biosca, 1999)

- Bombas para fluidos. En toda obra de Jet-Grouting se requerirá de una a dos bombas de alta presión y altos caudales para impulsar tanto el fluido de perforación como la lechada del agente cementante durante la fase de inyección y erosión. Generalmente el tipo de bombas que se utilizan para este tipo de proyectos son accionadas por motores diesel con un rango de potencia que varía de 350 a 500 caballos de vapor. Los tipos de bombas de inyección que se utilizan son los siguientes:

- Bombas de transmisión mecánica. Poseen generalmente tres cilindros para impulsar un solo fluido y una caja de cambios de velocidad para añadirle una mayor versatilidad a las bombas, y para poder adaptarse a las distintas necesidades de relación caudal-presión.
- Bombas hidráulicas. No poseen la habilidad de adaptación a distintas relaciones de caudal-presión, por lo que su uso se ve limitado a pocos rangos de aplicación. Sin embargo, poseen una ventaja muy grande, ya que este tipo de bombas cuentan generalmente con dos pistones dobles para impulsar fluidos, por lo que son capaces de utilizar un pistón para bombear un fluido distinto al del otro pistón (pudiéndose impulsar entonces agua y lechada por separado, pero al mismo caudal y presión, lo cual es lo deseado en el tipo polifluido del Jet-Grouting que se explica más adelante).

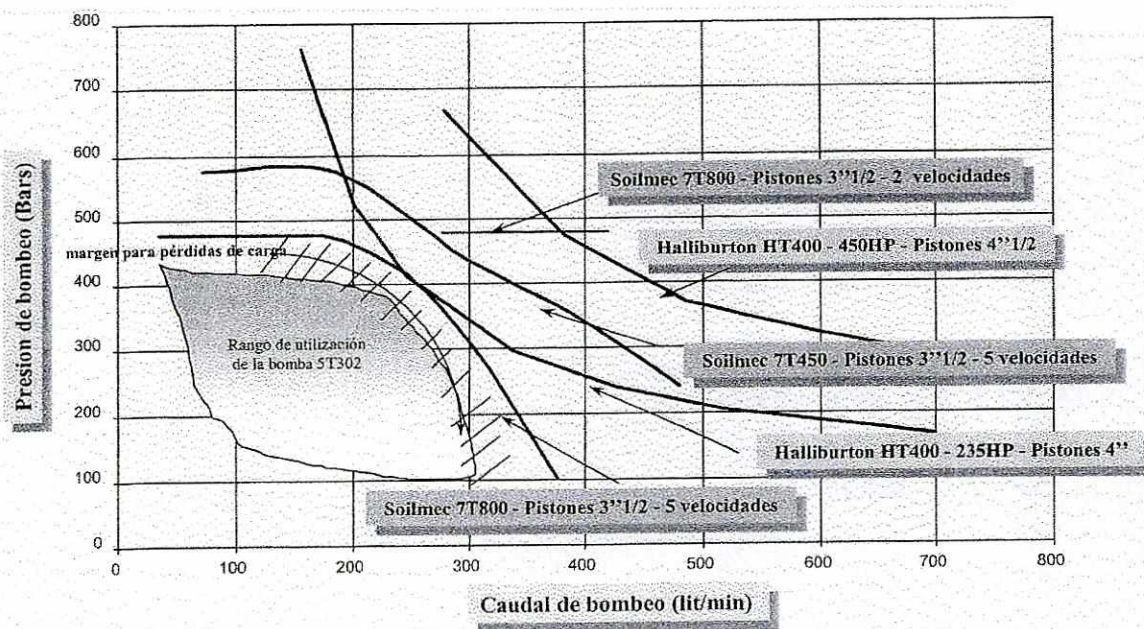
A continuación se presenta una gráfica proporcionada por Soletanche-Bachy que relaciona el caudal y la presión de distintas bombas comúnmente utilizadas para obras de Jet-Grouting.

**FOTOGRAFÍA No. 6:**  
**Bomba de inyección de motor Diesel**



(Fotografía de Earth Tech)

**GRÁFICA No. 1**  
**Relaciones de caudal-presión para distintas bombas de inyección**



(Fuente: Soletanche-Bachy)

- Por último, planta de fabricación de fluidos. El elevado caudal que las bombas son capaces de impulsar (un promedio de 20-25 m<sup>3</sup>/hora) hace necesario poseer pequeñas instalaciones de fabricación de fluidos de perforación e inyección que sean capaces de suministrar estas cantidades con la calidad suficiente, ya que se debe de garantizar que la mezcla de inyección (generalmente de agua-cemento o bentonita-agua-cemento o con humo de sílice) sea completamente uniforme desde su fabricación hasta su inyección. Estas plantas de fluidos consisten en mecanismos de suministro y mezclado de forma controlada, automática y bastante precisa de los ingredientes que componen la mezcla. También cuentan con tanques de almacenamiento temporal equipados con palas agitadoras de alta turbulencia y de suficiente energía de batido.

Según lo expuesto anteriormente, es muy común encontrar en los proyectos de Jet-Grouting silos de almacenamiento y suministro de cemento, agua y/o bentonita, lo cual se considera como parte del equipo para la ejecución del Jet-Grouting, pero que no son intrínsecos a esta tecnología.

### C. Tipos de Jet-Grouting

Existen tres tipos de Jet-Grouting, los cuales se diferencian según el número de fluidos que utilizan en el proceso de erosión e inyección. Estos tres tipos de Jet-Grouting se basan en los mismos principios y concepto: son inyecciones de alta presión hasta la tobera, a partir de la cual el fluido se convierte en un chorro de alta velocidad capaz de generar considerables niveles de energía de erosión, lo que permite tratar con el método a todos los suelos blandos capaces de erosionarse.

Son inyecciones de alta presión debido a que la lechada del agente cementante se encuentra dentro del circuito de mangueras flexibles, tubería de perforación y portatoberas a altas presiones según se muestra en la gráfica No.1 de bombas de inyección. Este fluido sometido a altas presiones, al salir a través de la o las toberas, se encuentra con un ambiente de baja presión relativa (ya sea la presión atmosférica o la presión hidrostática si se encuentra la inyección por debajo del nivel freático) y debe equilibrarse con este nuevo ambiente. Utilizando la ecuación de Bernoulli para fluidos:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2} + g * \Delta y = 0$$

En donde:

P – presión hidrostática del fluido

$\rho$  – peso específico del fluido

v – velocidad del fluido

y – cota del punto estudiado

Escribiendo la misma ecuación agrupando las condiciones arriba descritas y denotando con el subíndice “circ” la condición del fluido dentro del circuito desde la bomba de inyección hasta el porta-toberas, y con el subíndice “ext” la condición del fluido en el instante en que sale por la tobera, se tiene:

$$\frac{P_{circ}}{\rho} + \frac{v_{circ}^2}{2} + g * y_{circ} = \frac{P_{ext}}{\rho} + \frac{v_{ext}^2}{2} + g * y_{ext}$$

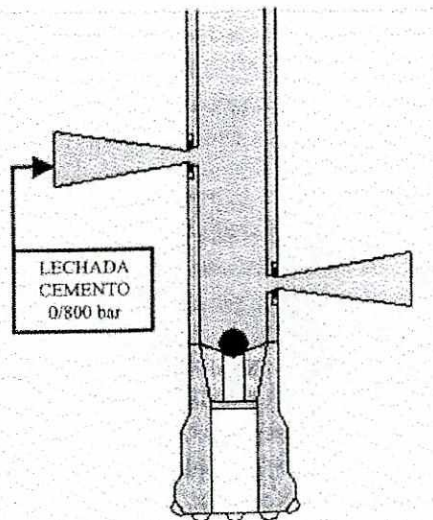
Al tener que ambas cotas son iguales ( $y_{circ} = y_{ext}$ ) y sabiendo que la presión externa será aproximadamente 300 atm inferior que la presión impuesta por la bomba al fluido ( $P_{ext} \ll P_{circ}$ ) se deduce que la velocidad de salida del chorro de la lechada será muy alta a comparación de la velocidad dentro del circuito de mangueras y tubería (se llegan a alcanzar velocidades cercanas a la velocidad del sonido – 300 m/seg).

Una vez expuestos estos principios generales para los tipos de Jet-Grouting se procede a presentar las tres variantes del método arriba mencionados:

1. **JET-GROUTING SIMPLE.** Conocido también como jet monofluido o jet uno, es la modalidad que primero fue desarrollada y empleada desde la concepción de esta tecnología (figura No. 10 y fotografía No. 7). La primera aplicación conocida es la de Nakanishi, quién lo llamaba “Chemical Curning Pile” o simplemente CCP

(Bielza, 1999:244). En este tipo de jet la lechada del agente cementante es la única que viaja dentro de la tubería de perforación y es el único fluido al que se le confía la acción de erosión de la masa de suelo que se trata, así como es el único líquido que se mezcla con el suelo y que lo sustituye en las partes en las cuales el terreno es completamente desplazado hacia afuera de la perforación o radialmente hacia afuera del eje de los tramos de tubo de perforación. Se deduce de este tipo de Jet-Grouting que la presión que se imparte a la lechada del agente cementante debe ser alta, al mismo tiempo que el caudal y cantidad que se consume en los proyectos en los que se utiliza esta variante son considerablemente altos. Las presiones de inyección para el jet simple varían usualmente entre los  $350 \text{ Kg/cm}^2$  hasta los  $600 \text{ Kg/cm}^2$  (para un máximo de  $800 \text{ Kg/cm}^2$ ) con pérdidas de presión entre  $5$  y  $10 \text{ Kg/cm}^2$  por cada  $100$  metros de mangueras flexibles (dependiendo tanto de la densidad de la lechada como de los diámetros de las mangueras). Los caudales típicos para mezclas de agua-cemento con relaciones 1:1 se encuentran en el rango de  $1.5$  a  $2.5$  litros por segundo. Este tipo de Jet-Grouting suele ser económicamente y técnicamente factible para diámetros esperados de columnas de suelo tratado inferiores o iguales a los  $90$  centímetros.

**FIGURA No. 10**  
**El Jet-Grouting monofluido**



(Biosca,1999)

**FOTOGRAFÍA No. 7**  
**Chorro de alta velocidad de un jet simple**

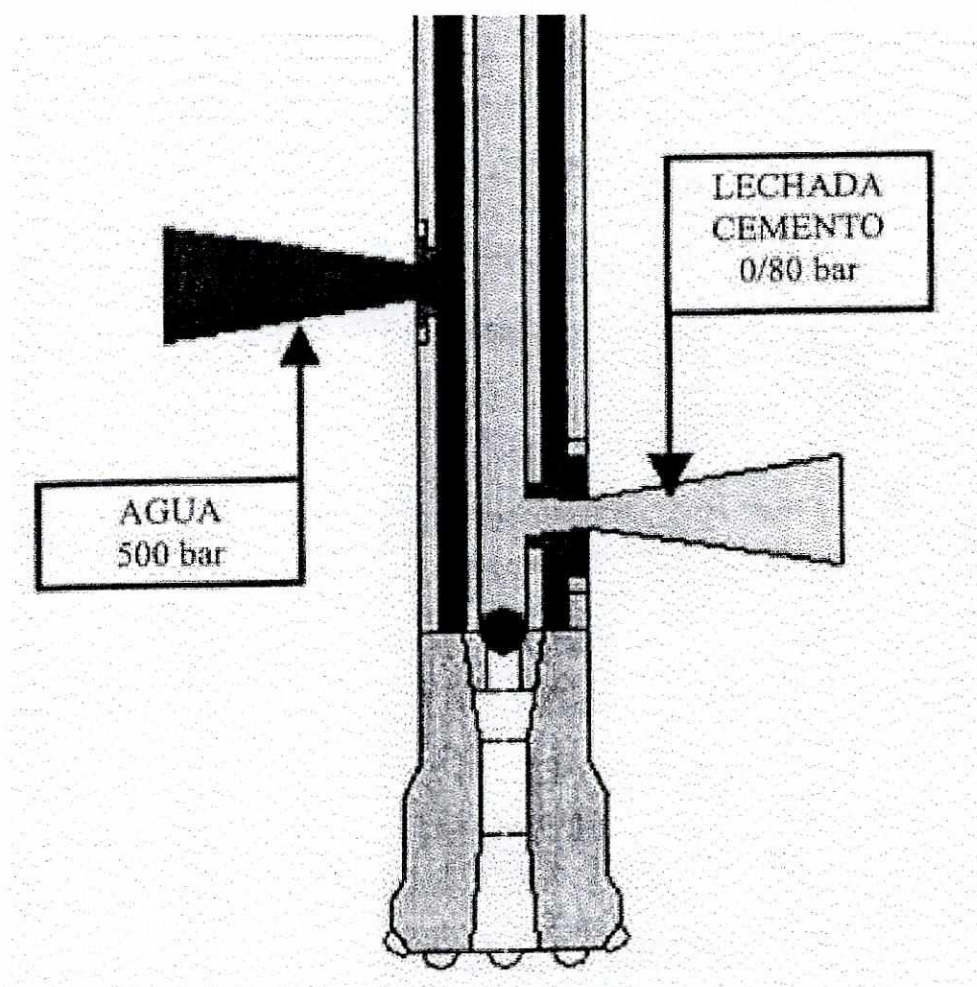


(Fotografía de Soletanche-Bachy)

2. **JET-GROUTING BI-FLUIDO.** Conocido también como Jet-Grouting doble, se diferencia del anterior en que la acción de erosión se le confía a un segundo fluido, siendo este agua o aire, o bien, una mezcla de la lechada cementante con aire. En el caso de jet doble en la que se utiliza el agua o aire para destruir la estructura del terreno, se requiere de una tubería especial en la que ambos fluidos no se mezclen y que sea capaz de llevar dentro de sí a estos fluidos a presiones diferentes, además de tener que contar con una o varias toberas de salida independientes para cada uno de los fluidos. En el caso de tener una mezcla de aire/lechada, esta combinación tendrá a su cargo tanto la erosión del terreno como la de sustitución y mezcla del volumen desplazado, lo cual requiere del mismo tipo de tubería, pero con un tipo de toberas especiales en las que se permita la expulsión de la lechada por el centro de ella y la salida del aire será en forma anular y concéntrica al chorro de la lechada (no se acostumbra utilizar agua como el fluido anular al chorro de lechada debido a que se incrementan las relaciones de agua-cemento, ocasionando una baja resistencia y mala calidad de la lechada final). Este último tipo de Jet-Grouting doble se le conoce como “Jumbo Jet Special Grout” o JSG. En ambas variantes la presión de la lechada es

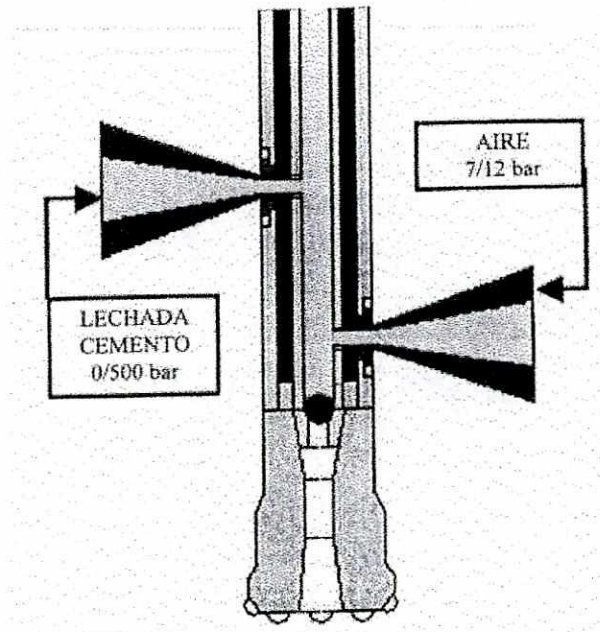
significativamente menor (de unos  $500 \text{ Kg/cm}^2$  a lo sumo) y la del aire varía entre 7 y  $12 \text{ Kg/cm}^2$  cuando sale de forma anular y concéntrica a la lechada. La presión de un chorro de agua completamente independiente al que se expulsa por la tobera de la lechada del agente cementante es de  $500 \text{ Kg/cm}^2$ . (Figuras No. 11 y No. 12 y fotografía No. 8)

**FIGURA No. 11**  
**Jet-Grouting bi-fluido con chorros independientes**



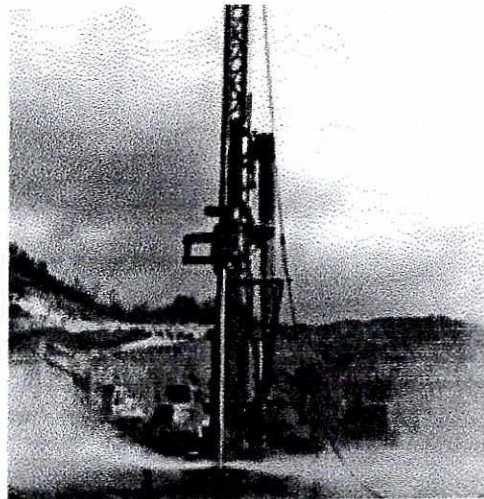
(Biosca, 1999)

**FIGURA No. 12**  
**Jet-Grouting bi-fluido con chorro mezclado con aire**



(Biosca, 1999)

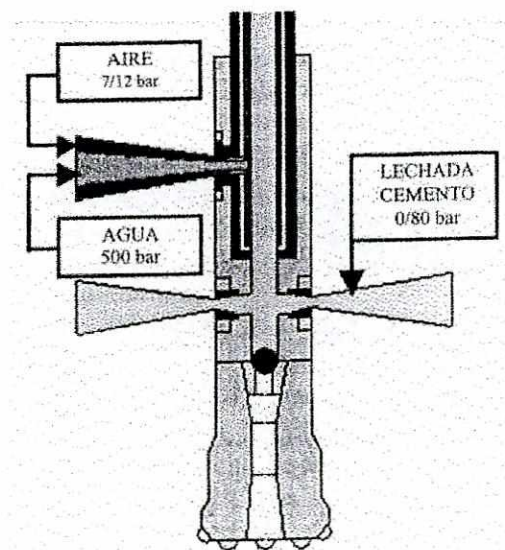
**FOTOGRAFÍA No. 8**  
**Chorros en un sistema de jet doble.**



(Fotografía de Soletanche-Bachy)

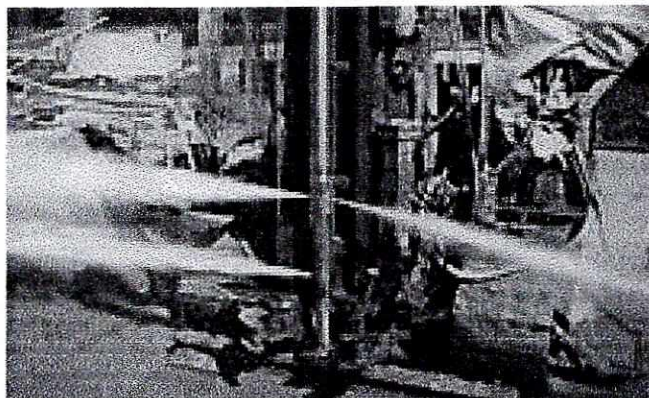
3. **JET-GROUTING TRI-FLUIDO.** Llamado originalmente “Column Jet Grouting” – CJG – o método Kajima, también se le conoce como triple jet o jet-3. En este se utilizan tres fluidos, dos para el proceso de erosión del terreno y un tercero que lo comprende la lechada del agente cementante. Por esta razón la tubería que se utiliza es aún más compleja que la empleada en los otros tipos de Jet-Grouting, ya que tiene que ser capaz de llevar por dentro y separadamente a los tres fluidos a distintas presiones. El chorro que efectúa la erosión (que por lo general es una mezcla de aire y agua) es expulsado a través de toberas como las empleadas en el tipo de Jet doble, ya que por el centro de dicha tobera saldrá el chorro de agua envuelto por aire de forma anular y concéntrica al primer chorro mencionado. Las toberas por las que sale el chorro de la lechada son del mismo tipo que las usadas tanto en el Jet simple como en el doble jet con fluidos separados. Las presiones a las que se someten los fluidos del triple jet son generalmente las siguientes: la presión del chorro de agua varía alrededor de los 500 Kg/cm<sup>2</sup>, el chorro de aire anular tiene un rango entre los 7 a los 12 Kg/cm<sup>2</sup>; la lechada cementante es inyectada a una presión relativamente baja de alrededor a los 80 Kg/cm<sup>2</sup>. (Figura No. 13 y fotografía No. 9)

**FIGURA No. 13**  
**Jet-Grouting tri-fluido**



(Biosca, 1999)

**FOTOGRAFÍA No. 9**  
**Detalle de jet triple**



(Fotografía de Soletanche-Bachy)

Ya que gran parte del fluido utilizado en la erosión saldrá mezclado con el terreno hacia fuera de la perforación en forma de rechazo y que es material a ser desechado del proyecto, las ventajas que se obtienen al independizar los procesos de corte y de inyección o llenado, se hacen evidentes cuando se registra y compara el consumo del agente cementante. Por otra parte, al usar fluidos menos densos que la lechada cementante la energía disponible de la bomba será aprovechada para impulsar con mayores caudales o con mayores velocidades de salida en la tobera, por lo cual se desprende otra ventaja de los jet poli-fluidos: el radio del tratamiento de la masa del suelo es mayor (llegando a ser comúnmente tan alto como 8 veces los radios obtenidos con el jet simple). Todo lo anterior se convierte en ventaja cuando se desean construir columnas de masa de suelo tratado de diámetros mayores a los 90 centímetros, para diámetros menores el jet simple o mono-fluido sigue siendo la opción más rentable económicamente por el uso de menos equipo y de menor complejidad técnica que requiere de menos controles. Sin embargo la utilización de los tipos de jet poli-fluidos dependerá también del tipo de suelo a tratar, ya que la experiencia en suelos muy arcillosos y plásticos ha demostrado que el tratamiento con agua como chorro de erosión no presenta una ventaja, porque el terreno actúa como muelle que amortigua y evita la acción del chorro. Véase en el cuadro No. 2 la cantidad de rechazo que se obtiene dependiendo del tipo de suelo. Se puede apreciar que en los suelos arcillosos este efecto de muelle juega un papel importante en las

pérdidas de lechada del agente cementante, así como en los volúmenes de material que habrá que desalojar del sitio del proyecto.

**CUADRO No. 2:**  
**Producciones típicas de rechazo**

m <sup>3</sup> de rechazo por m <sup>3</sup> de jet	Tipo de Jet-Grouting	
	Jet simple	Jet doble
arena suelta	0.7	0.5
arena densa	1.4	0.8
arcilla blanda	0.8	1.0
arcilla plástica	1.6	1.2

(Fuente: Soletanche-Bachy)

Se aconseja el uso de los dos tipos de jet poli-fluidos cuando en los diseños de proyecto hay más metros de perforación que de inyección, ya que se tendrá más ahorro por el menor tiempo de ejecución debido a que con la perforación de un solo taladro se es capaz de tratar un mayor volumen de terreno. Además al tratar un mayor volumen por taladro, el rendimiento superior de los jet poli-fluidos es ideal para realizar losas o macizar volúmenes significativamente grandes. En casos en los que se prevé que la desviación de la perforación será significativa por las grandes profundidades a las que se trabaja, con un jet poli-fluido se puede llegar a compensar debido a su menor relación de desviación sufrida respecto a la superficie tratada.

A pesar de utilizar agua en los jet poli-fluido, la cual se mezcla con la lechada del agente cementante diluyéndolo un poco, se pueden obtener valores de resistencia a la compresión simple del suelo tratado mayores a los obtenidos con el tipo mono-fluido debido a que la erosión provocada por la primera es capaz de remover más terreno y sustituirlo con la lechada que tiene mayor resistencia que una mezcla de suelo y lechada.

El éxito de cualquier tipo de Jet-Grouting no dependerá únicamente de la calidad del suelo a tratar, sino de la adecuada combinación de las bombas (presiones y caudales) que se utilizan para el corte y la inyección y de la velocidad de ascenso de la tubería.

La selección del equipo que se utilizará en cada proyecto se llevará a cabo según los objetivos que se tengan en éste y el tipo de suelo que se tratará.

A continuación se presenta un cuadro que resume los parámetros mínimos y máximos que comúnmente se hallan en las obras de Jet-Grouting, a fin de proporcionar una idea de estas magnitudes. (Cuadro No.3)

**CUADRO No. 3**  
**Parámetros comunes en proyectos de Jet-Grouting**

PARAMETROS TÍPICOS DE JET GROUTING	SIMPLE		BI-FLUIDO		TRI-FLUIDO	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Presión de la lechada (Mpa)	20	60	30	60	3	7
Caudal de lechada (l/min)	40	120	70	150	70	150
Presión de aire (Mpa)	-	-	0.6	1.2	0.6	1.2
Caudal de aire (l/min)	-	-	2000	6000	2000	6000
Presión de agua de inyección (Mpa)	-	-	20	50	20	50
Caudal de agua (l/min)	-	-	70	150	70	150
Diámetro de toberas de lechada (mm)	1.5	3	1.5	3	4	8
Diámetro de toberas de agua (mm)	-	-	1.5	3	1.5	3
Abertura coaxial para el aire (mm)	-	-	1	2	1	2
Velocidad de rotación (rpm)	10	25	5	10	5	10
Velocidad de extracción del varillaje (cm/min)	10	50	7	30	5	30

(Elaboración propia)

## IV. PARÁMETROS DE JET-GROUTING Y SU INCIDENCIA EN EL PRODUCTO FINAL

### A. Los parámetros y su influencia

La técnica del Jet-Grouting se ha definido anteriormente cómo un método de inyección basado en el poder erosivo o energía de erosión de un chorro de fluido para romper la estructura del suelo y tratarlo para su mejoramiento. Esta energía de erosión, conocida como la energía del Jet-Grouting, se encuentra regida por la relación de distintos parámetros propios de esta técnica. La ecuación de esta energía está dada por:

$$E_j = \frac{P * Q}{V} \quad (\text{en MJ/m})$$

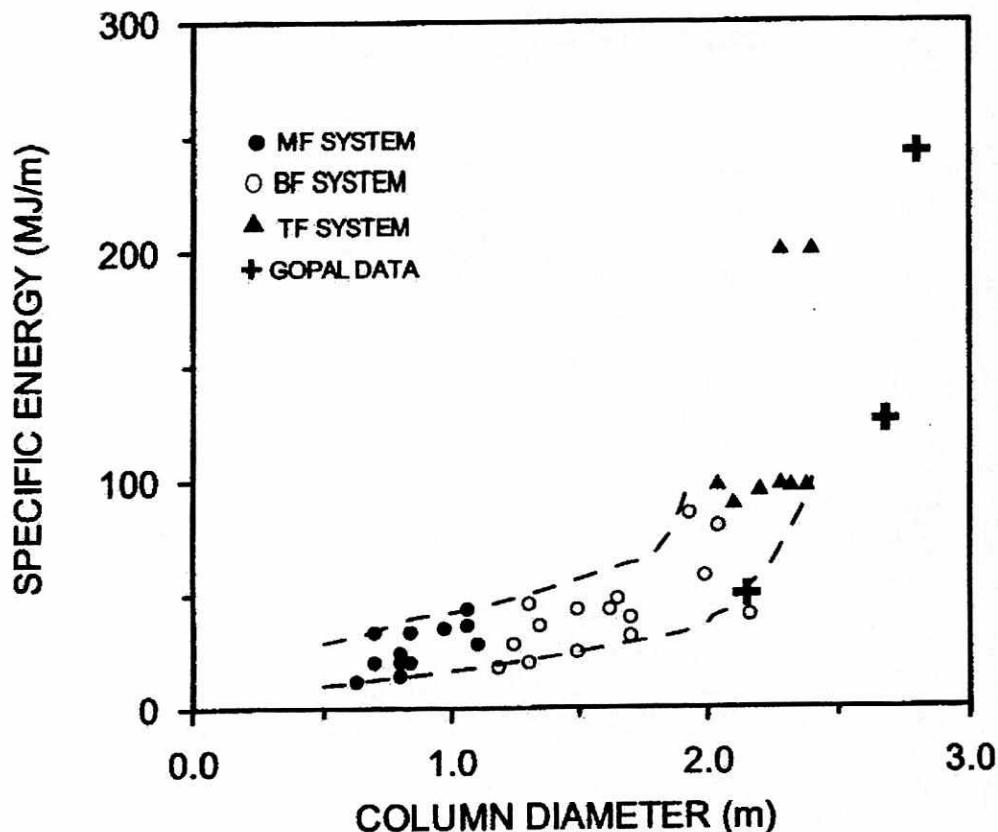
donde P es la presión de la lechada en MPa

Q es el caudal en m<sup>3</sup> por hora y

V es la velocidad a la que se extrae el varillaje en m/hr

De esta ecuación se desprende que los parámetros que tienen una incidencia directa en el producto final del Jet-Grouting son únicamente tres. Se entiende que a mayor energía aplicada durante el proceso de inyección mayor será el volumen de suelo tratado (o mayor diámetro de columnas de suelo para el caso de formas cilíndricas – véase la gráfica No. 2).

**GRÁFICA No. 2**  
**Relación de energía específica de Jet-Grouting**  
**con diámetros de columnas de suelo tratado**



(Jardine y Standing - Proyecto GOPAL, 1998)

En la gráfica anterior: MF = mono-fluido; BF = bi-fluido y TF = tri-fluido

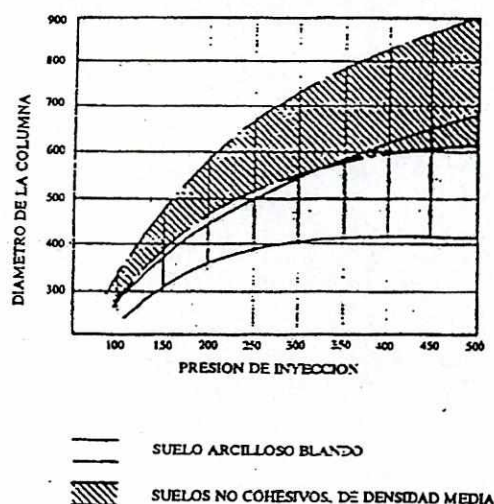
Por esta razón los siguientes gráficos y cuadros que se presentan en este capítulo relacionarán los parámetros e incidencias de estos para la obtención de columnas de suelo-cemento (utilizando lechada de cemento como el agente ligante) como producto final de la técnica.

1. **LA PRESIÓN DE INYECCIÓN.** Ésta juega un papel importante en el tratamiento del suelo con el Jet-Grouting. Como se menciona arriba por medio de

la ecuación de Bernoulli, la transformación de la presión del fluido a una energía cinética de éste es la que da forma al chorro de alta velocidad. La acción de erosión del chorro de alta velocidad o jet depende directamente de esta energía cinética ( $\frac{1}{2}mv^2$ ), o sea de la velocidad con que sale el fluido expulsado de la tobera. Entre más presión se le imprima al fluido antes de la salida de la tobera, mayor será la velocidad del chorro que se obtiene a la salida de ésta.

A continuación se presenta la gráfica No. 3 obtenida de Sopeña (2002:15) en la que se puede observar cómo varía el diámetro de una columna de suelo-cemento con la presión del fluido medida a la salida de la bomba de inyección. Se comprueba que a mayor presión se obtienen mayores diámetros de columnas debido a que la energía específica del Jet-Grouting se ve afectada de manera directa por este parámetro. Al mismo tiempo se demuestra que el tipo de suelo influye igualmente en el diámetro de la columna final. Los suelos con poca cohesión, que al mismo tiempo son más propensos a perder su estructura, son erosionados más fácilmente que los terrenos en los que predominan los materiales cohesivos o arcillas. Este fenómeno de menor efectividad del tratamiento en suelos arcillosos se debe al “efecto de muelle” característico de estos ante los chorros de agua que chocan contra su estructura.

**GRÁFICA No. 3**  
**Relación presión de inyección versus diámetro**  
**de columnas de suelo-cemento**

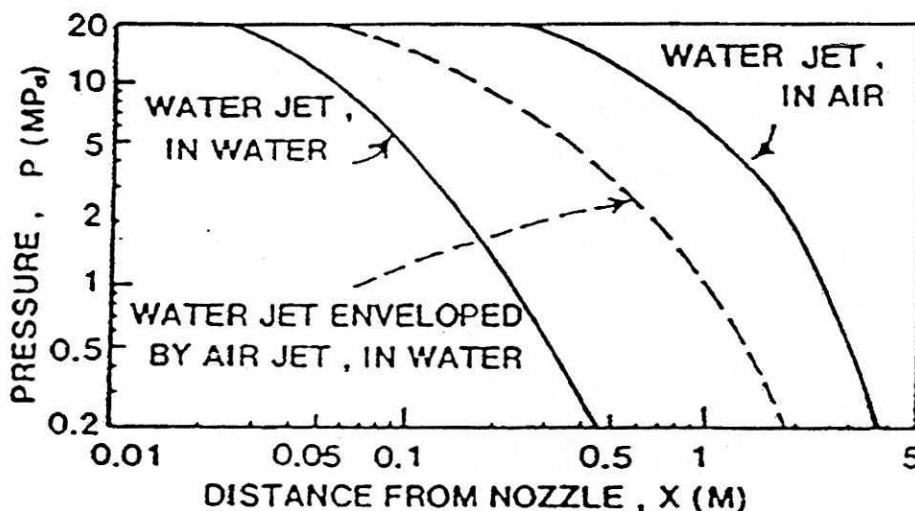


(Sopeña, 2002)

Otro factor que afecta la efectividad de la presión que se le imprime al fluido de erosión es la presencia de agua en el terreno o nivel freático, ya que esta agua crea una barrera que amortigua la velocidad del fluido y por ende disminuye la energía cinética que sirve en la erosión.

Se puede apreciar en la gráfica No. 4 cómo ayuda un chorro de aire envolvente y concéntrico a contrarrestar el amortiguamiento producido por el agua subterránea al fluido de erosión. El resultado que se obtiene con la utilización de un sistema bi-fluido con aire concéntrico bajo nivel freático es casi igual que el alcanzado con un chorro libre del efecto del agua.

**GRÁFICA No. 4**  
**Disminución de la presión del fluido de erosión**  
**según la distancia al eje de la tubería**



(Sopeña, 2002)

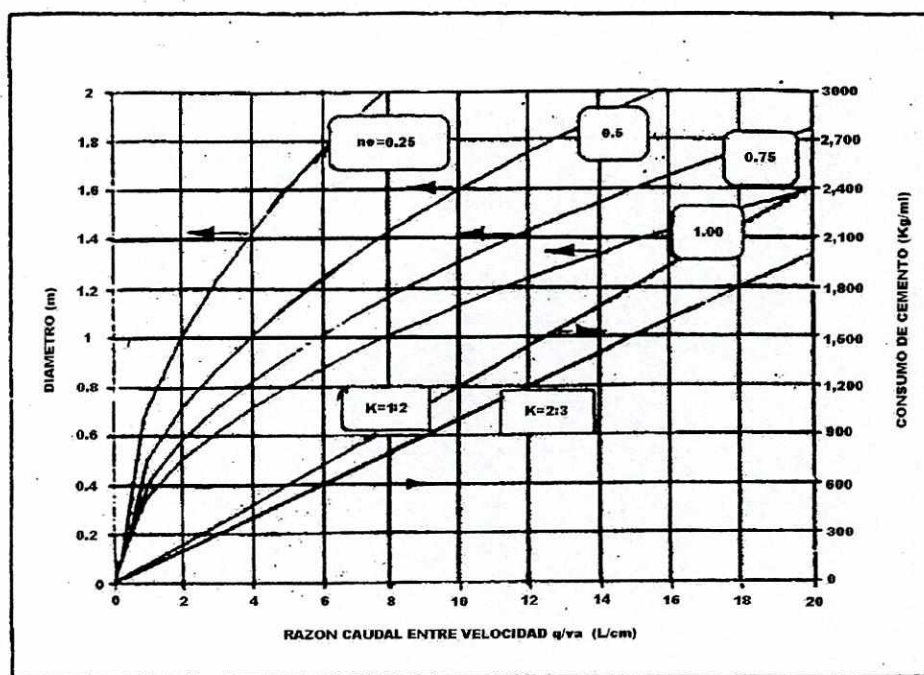
2. **CAUDAL DEL AGENTE CEMENTANTE Y/O FLUIDO DE EROSIÓN.** El volumen del agente cementante que se llega a inyectar dentro de la masa del

suelo, será casi el mismo que el del suelo desplazado y tratado, por lo tanto entre más fluido de erosión y agente cementante se introduce durante el proceso de ejecución del Jet-Grouting, mejores serán los resultados que se obtengan del producto final. El volumen que se inyecta durante el proceso del jet se mide registrando el caudal a la salida de cada una de las bombas de inyección que se utilizan.

Cabe mencionar que no debe esperarse que el caudal inyectado (y por ende el volumen de inyección) sean iguales que el volumen de la masa del terreno tratado, ya que el rechazo que se produce durante el proceso de inyección es una mezcla del suelo con los fluidos que se introducen, lo cual genera pérdidas del material cementante.

A continuación se presenta la gráfica No. 5 en la que José Celma (1992:45) relaciona dos parámetros básicos con la porosidad equivalente y el diámetro de algunas columnas de suelo estudiadas en su trabajo "Parámetros de tratamiento del Jet-Grouting".

**GRÁFICA No. 5**  
**Relación de consumo de cemento y densidad**  
**de la lechada con el diámetro y resistencia**  
**de columnas de suelo-cemento**

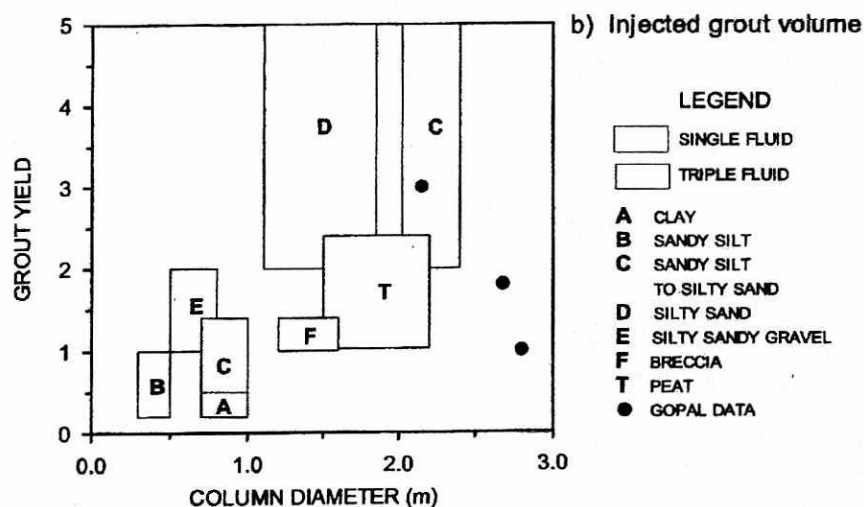


En esta gráfica “K” es la relación de agua cemento de la lechada que se inyectó para hacer las columnas de jet que se estudiaban y “ne” es una porosidad equivalente que se define como el grado de relleno de los huecos disponibles y el grado de utilización del caudal de lechada aportado (esta porosidad no debe confundirse con la porosidad del terreno).

Se puede apreciar que a mayor cantidad de lechada inyectada mayor es el diámetro de la columna que se obtiene. Sin embargo, es muy curioso observar que a mayores densidades de esta misma lechada de agua-cemento, el aumento del diámetro con el incremento en el volumen de lechada introducida se vuelve menos pronunciada que para densidades de lechada más bajas. Esto se debe a que una lechada de agente cementante más densa es mucho más difícil de inyectar porque pesa más, es más viscosa y requiere de mayor potencia de bomba para imprimirle un valor de presión. Lógicamente las mezclas de agua-cemento más cargadas de éste último producen resistencias de columna mucho más alta que las lechadas más diluidas. Todo esto indica que balancear los parámetros del Jet-Grouting para obtener los objetivos de un proyecto es de suma importancia; así la necesidad de tratar mayores volúmenes de suelo implica utilizar menores densidades de lechada que resultan en menores resistencias de la columna, o bien, el uso de mayores densidades de lechada para adquirir resistencias de columna más altas conlleva un volumen menor de terreno tratado.

De la misma manera que en la presión, el tipo de suelo influye en las dimensiones de la masa de suelo tratado con respecto al volumen del agente cementante inyectado. En la siguiente gráfica (No. 6) se observa cómo los suelos con granulometrías poco finas y de materiales poco cohesivos son más susceptibles a obtener mejores resultados en lo que a diámetro de columna se refiere; mientras que los suelos finos y cohesivos dan una menor respuesta al volumen inyectado.

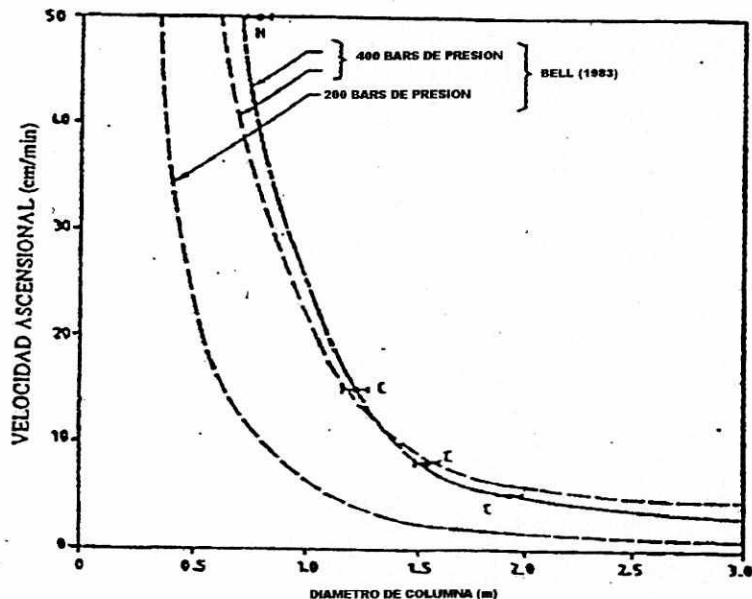
**GRÁFICA No. 6**  
**Relación de volumen de lechada inyectado con**  
**diámetros de columnas según el tipo de suelo**



(Jardine y Standing - Proyecto GOPAL, 1998)

3. **VELOCIDAD DE ASCENSO DE LA TUBERÍA.** Este último parámetro que juega tiene una relación indirecta sobre la energía específica del Jet-Grouting, ya que valores elevados de la velocidad a la que se retira la tubería implica una menor energía específica. El tiempo al que pasa expuesto un determinado punto dentro de la masa del suelo a la acción erosiva y de llenado del Jet-Grouting es muy importante, ya que entre mayor sea este tiempo mayor será la oportunidad que tiene el chorro de erosión y el de llenado para tratar el terreno. Así se llega a la conclusión que la velocidad de rotación juega un papel igualmente importante y estrechamente ligado a la velocidad de ascenso de la tubería de inyección. La siguiente gráfica (No. 7) de los estudios de Bell presentados por Sopeña (2002:12) demuestra la gran incidencia que tiene esta velocidad en el diámetro de la columna obtenida al final del proceso.

**GRÁFICA No. 7**  
**Relación entre el diámetro de la columna y**  
**la velocidad de ascenso de la tubería**



(Sopeña, 2002)

La relación entre la velocidad de ascenso y el volumen de lechada inyectado dentro del terreno ha sido estudiada por muchos investigadores como se aprecia en el siguiente cuadro resumen y en la gráfica No. 8 obtenidas de "Soil Improvement. A ten year update" (In-situ ground reinforcement, 1987:43-57).

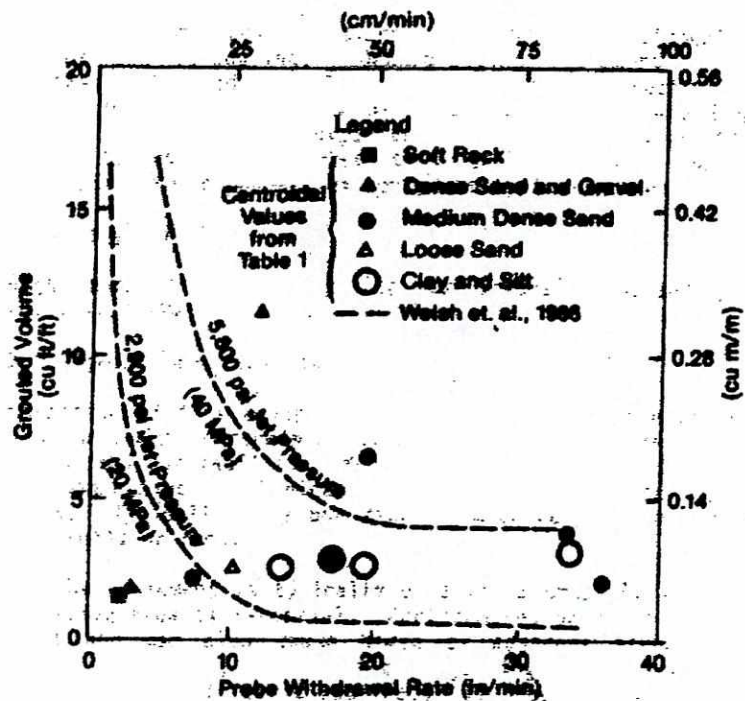
Según Sopeña (2002:16), Miki presentó la gráfica No. 9 en su "Technical Progress of the Jet Grouting Method and it's Newest Type" para mostrar la relación entre los diámetros efectivos de las columnas que se obtienen por medio de los tipos tri-fluido y bi-fluido de Jet-Grouting y el número de golpes de la prueba SPT (Standard Penetration Test) en suelos cohesivos.

**CUADRO No. 4**  
**Efecto de la velocidad de ascenso de la tubería**  
**en el volumen de lechada inyectado**

Suelo	Presión de agua o lechada en Psi	Velocidad ascensional del varillaje en in/min	Volumen de lechada inyectada en pies cúbicos	Fuente
Roca suave	5700 - 7100	0.9 - 3.7	1.5 - 1.8	Yahiro et al. 1975
Arena densa y grava	5700 - 7100	1.2 - 4.6	1.6 - 1.9	Yahiro et al. 1975
	5000 - 6000	12.0	3.1 - 19.6	ENR, 1986
Arena medio densa	5700 - 7100	5.2 - 9.1	1.8 - 2.6	Yahiro et al. 1975
	2900 - 5900	3.9 - 19.7	1.4 - 16.6	Welsh et al 1986
	5600	36.0	2.0	ENR, 1974
	4400	15.7	3.0	Aschieri et al 1973
	5700 - 7100	19.7 - 47.2	0.9 - 6.5	Yahiro & Yoshida 1973
Arena suelta	800 - 1000	15.7 - 23.6	2.2 - 10.8	Broid et al 1981
Arcilla y limo	5700 - 7100	9.1 - 11.3	2.4 - 2.7	Yahiro et al. 1975
	5700 - 7100	12.2 - 15.2	2.6 - 2.9	Yahiro et al. 1975
	2900 - 5800	3.9 - 19.7	1.4 - 16.6	Welsh et al 1986
	4400	15.7	3.0	Aschieri et al 1973
	5700 - 7100	19.7 - 47.2	0.7 - 5.8	Yahiro & Yoshida 1983
	800 - 1000	15.7 - 23.6	0.8 - 4.3	Broid et al 1981

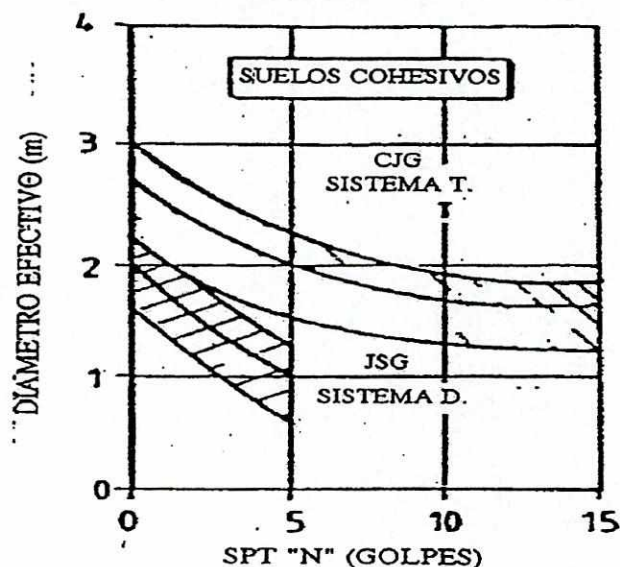
(Fuente: Soil Improvement. A ten year update)

**GRÁFICA No. 8**  
**Efecto de la velocidad de ascenso de la tubería**  
**en el volumen de lechada inyectado**



(Sopeña, 2002)

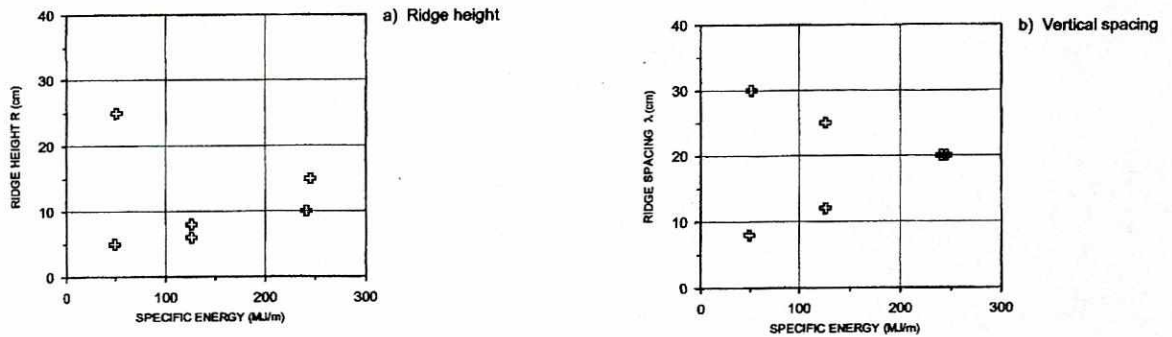
**GRÁFICA No. 9**  
**Relación de diámetros efectivos de columnas**  
**con el número de golpes de SPT en suelos cohesivos**



(Sopeña, 2002)

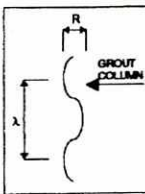
Los parámetros anteriormente expuestos y analizados son los que inciden directamente en la energía específica del Jet-Grouting y tienen influencia directa sobre la calidad y resultado del producto final. Sin embargo existe una propiedad física de toda columna producida por el Jet-Grouting de la que no se ha expuesto hasta ahora en el presente trabajo, y sobre la cual no se han hecho estudios muy profundos para determinar su influencia en la fase de diseño de una columna. Esta propiedad física es la rugosidad de la superficie de las columnas, la cual puede llegar a jugar un papel muy importante en la capacidad que tiene una masa de suelo tratado para generar una fuerza de fricción entre el terreno no tratado y la masa cementada. En el único estudio que se halló un intento por determinar y correlacionar esta rugosidad con algún parámetro de Jet-Grouting es el proyecto GOPAL, en el cual se presentan gráficas que comparan la energía específica del jet con las dimensiones de las columnas de prueba construidas durante la fase de ejecución y pruebas de dicho estudio. A continuación se presentan estas gráficas, así como unas fotografías en las que se puede apreciar la rugosidad de la superficie de las columnas. (Gráfica No. 10 y fotografías No. 10 y No. 11)

**GRÁFICA No. 10**  
**Relación entre energía específica del Jet-Grouting**  
**con las dimensiones de la rugosidad de la**  
**superficie de columnas de suelo cemento**



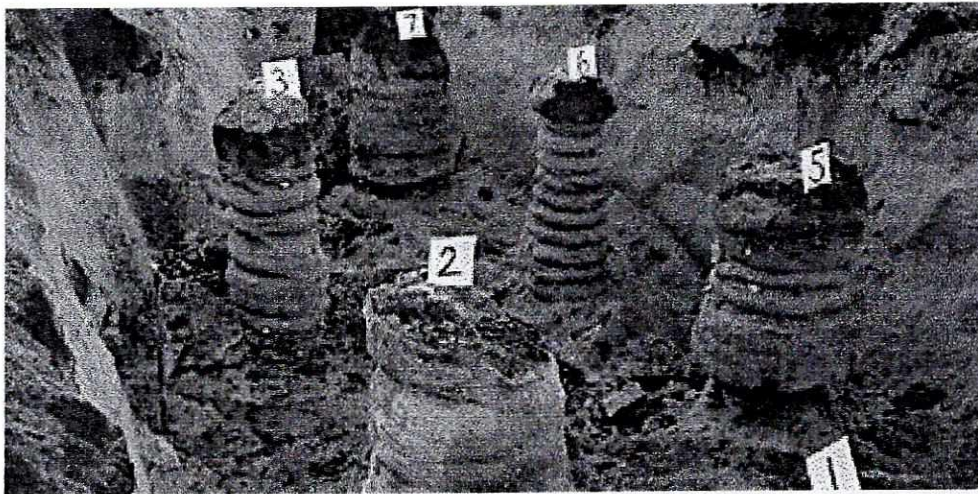
**LEGEND**

⊕ GOPAL DATA



(Jardine y Standing - Proyecto GOPAL, 1998)

**FOTOGRAFÍA No. 10**  
**Rugosidad de las columnas de prueba de suelo cemento**



(Fotografía de EARTH TECH)

**FOTOGRAFÍA No. 11**  
**Rugosidad de la superficie de columnas de suelo cemento**



(Fotografía de EARTH TECH)

**B. Producto y resultados que se pueden obtener del Jet-Grouting**

Una forma de evaluar la resistencia final del suelo-cemento de las columnas producidas por el Jet-Grouting es extrayendo testigos de pequeño diámetro de la masa del terreno tratado para ser probadas en laboratorios, en donde se les aplica pruebas de resistencia a la compresión no confinada. Esta resistencia depende básicamente del tipo de suelo que se ha inyectado, siendo los materiales orgánicos y las arcillas los que dan resultados de resistencia más bajos, mientras que los mejores valores se obtienen con arenas y gravas. El siguiente cuadro No. 5 resume los valores de la resistencia a la compresión no confinada que comúnmente se obtienen en los proyectos de Jet-Grouting, los cuales han sido presentados por los autores Biosca y Sopena y compañías a lo largo

de la experiencia que han adquirido (Rodio Cimentaciones Especiales, Soletanche-Bachy y del proyecto GOPAL).

**CUADRO No. 5**  
**Rangos de resistencia a la compresión**  
**no confinada de la masa de suelo cemento**  
**obtenida con el Jet-Grouting**

Tipo de suelo	Resistencia a la compresión no confinada en Kg/cm <sup>2</sup>
Turba	1.4 - 7
Arcillas	25 - 45
Limos orgánicos	7 - 28
Limos cohesivos	14 - 40
Limos	40 - 60
Arena limosa	50 - 60
	60 - 140
Arena y gravas	(hasta 210 Kg/cm <sup>2</sup> )

En el cuadro anterior no se hace diferencia ni mención en la diferencia que existe entre los tres tipos de Jet-Grouting, ya que la selección y uso de cada uno de los tipos de jet se basa en los resultados que se desean obtener. A continuación se presenta un cuadro en la que se enfatiza la diferencia en la resistencia de mezclas de suelo-cemento constituidas por materiales de arenas y gravas y arcillas con respecto a los tres tipos de Jet-Grouting. Se puede observar que los mejores resultados se obtienen con el jet simple. Esto se debe a que los diámetros que se obtienen con este tipo son menores en relación al volumen de lechada que se inyecta, por lo que las mezclas que resultan de este tipo son más ricas en lechada que las producidas por los otros tipos de jet poli-fluido.

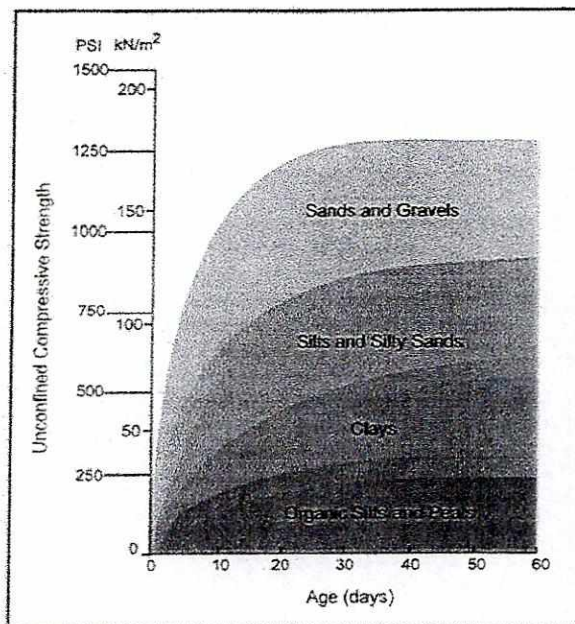
La siguiente gráfica muestra que la variación de la resistencia de la mezcla suelo-cemento con respecto a su edad presenta curvas similares a las registradas por las mezclas de concreto. Los valores de resistencia que aquí se presentan son un promedio de muestras de suelo-cemento hechas con todos los tipos de Jet-Grouting, esto responde a la finalidad de mostrar la relación de la resistencia y la edad de la mezcla y no para determinar rangos de valores. (Gráfica No. 11)

**CUADRO No. 6**  
**Variación de la resistencia a la compresión**  
**no confinada según el tipo de Jet-Grouting y suelo**

Tipo de Jet-Grouting y suelo	Rango de resistencia a la compresión no confinada en Kg/cm <sup>2</sup>
<b>Jet simple</b>	
Arena y grava	70 - 140 (hasta 210 en casos especiales)
Arcillas	17.5 - 70
<b>Jet bi-fluido</b>	
Arena y grava	35 - 140
Arcillas	15 - 53
<b>Jet tri-fluido</b>	
Arena y grava	34 - 105
Arcillas	10 - 45

(Fuente: Biosca, 1999)

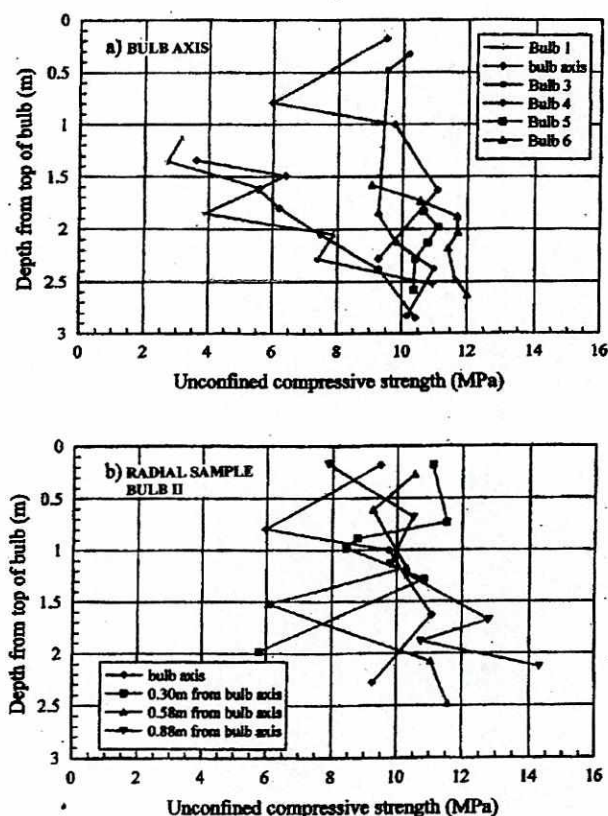
**GRÁFICA No. 11**  
**Variación de la resistencia del suelo cemento**  
**con respecto a su edad y según distintos tipos de suelo**



(Fuente: EARTH TECH)

Según los estudios presentados en el proyecto GOPAL llevado a cabo en conjunto por Imperial College de Inglaterra con las empresas Soletanche-Bachy de Francia y D'Appolonia de Italia, la resistencia a la compresión no confinada de las columnas y bulbos formados por el proceso de Jet-Grouting no varía considerablemente con respecto a la distancia al eje de la perforación. En las siguientes gráficas se pueden observar los resultados de este estudio. En ellas se aprecia que las variaciones en los valores de resistencia se encuentran en torno a un rango de 9 y 11 MPa para todas las distancias al eje de la inyección.

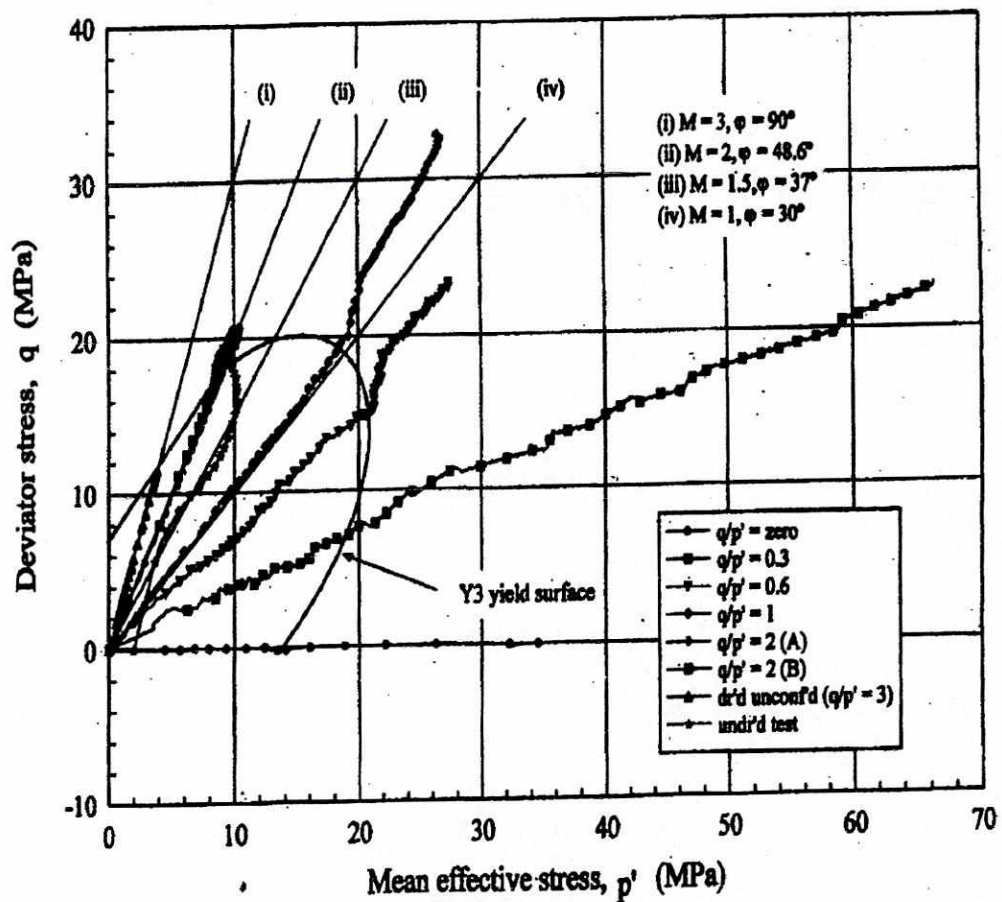
**GRÁFICA No. 12**  
**Variación de la resistencia a la compresión no confinada de testigos de suelo cemento respecto a la profundidad y distancia radial al eje de inyección**



(Jardine y Standing - Proyecto GOPAL, 1998)

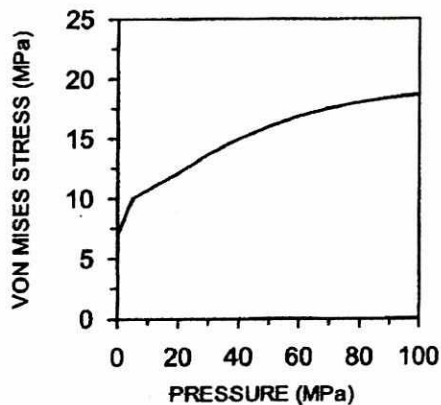
A continuación se presentan gráficas del comportamiento de la mezcla del suelo cemento resultante de un Jet-Grouting obtenidas durante el estudio realizado por el proyecto GOPAL.

**GRÁFICA No. 13**  
**Resultados de pruebas de alta presión efectiva**  
**en testigos de suelo cemento de Jet-Grouting**

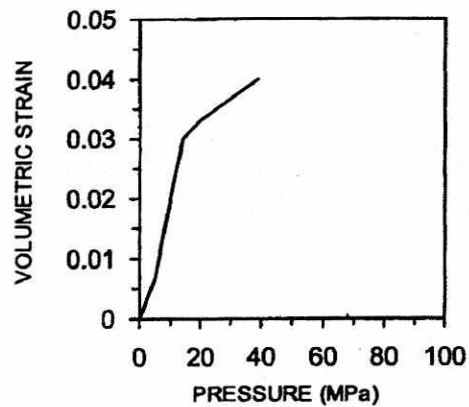


(Jardine y Standing - Proyecto GOPAL, 1998)

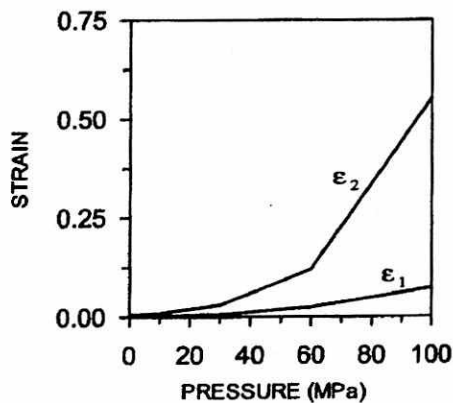
**GRÁFICA No. 14**  
**Características de testigos de suelo cemento**  
**obtenidos durante el proyecto GOPAL**



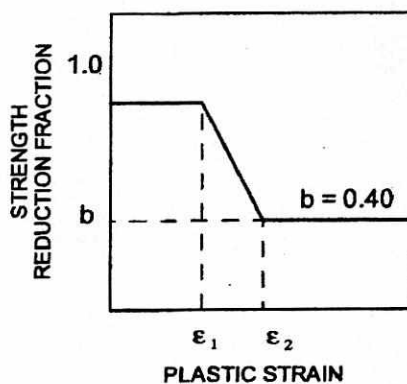
a) Yield criteria



b) Material compressibility



c) Post yield behavior



d) Definition of terms post yield behavior

Notes:

$$\text{VonMisesStress} = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{2} + \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2} \right]^{1/2}$$

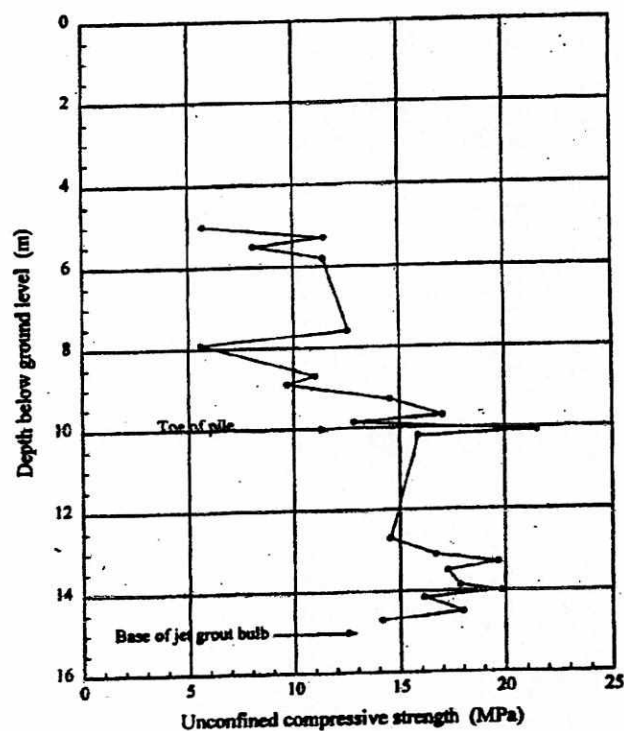
$$\text{Pressure} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\text{Volumetric Strain} = \partial\epsilon_x + \partial\epsilon_y + \partial\epsilon_z$$

(Jardine y Standing - Proyecto GOPAL, 1998)

En la siguiente gráfica se aprecia la diferencia de la resistencia a la compresión no confinada que existe entre la masa del terreno no tratado con una masa de suelo-cemento del mismo terreno creada con Jet-Grouting. Esta gráfica es parte de los resultados del mismo proyecto GOPAL.

**GRÁFICA No. 15**  
**Resistencia a la compresión no confinada**  
**de testigos de suelo tratado y no tratado con**  
**la técnica del Jet-Grouting**



(Jardine y Standing - Proyecto GOPAL, 1998)

Con respecto a los diámetros de las columnas de suelo-cemento que se pueden obtener con tratamientos de Jet-Grouting se afirma que el jet simple produce menores diámetros mientras que los tipos bi-fluido y tri-fluido producen diámetros considerablemente mayores a los primeros. Al igual que la resistencia de la masa del terreno tratado, el diámetro también varía con el material que compone el suelo. En el

siguiente cuadro (No.7) se resume los diámetros que comúnmente se obtienen con la técnica del Jet-Grouting según el tipo de jet y el material componente del suelo.

**CUADRO No. 7**  
**Diámetros de columnas de suelo cemento**  
**producidos por los tipos de Jet-Grouting según**  
**el material del terreno**

Tipo de suelo	Diámetro de columna en metros	
	Jet simple	Jet bi y tri - fluidos
Arcilla y limo arcilloso	0.4 - 0.5	0.8 - 1.0
Arena limosa	0.8 - 0.9	1.4 - 1.6
Grava arenosa	0.9 - 1.0	2.0 - 2.4

(Elaboración propia)

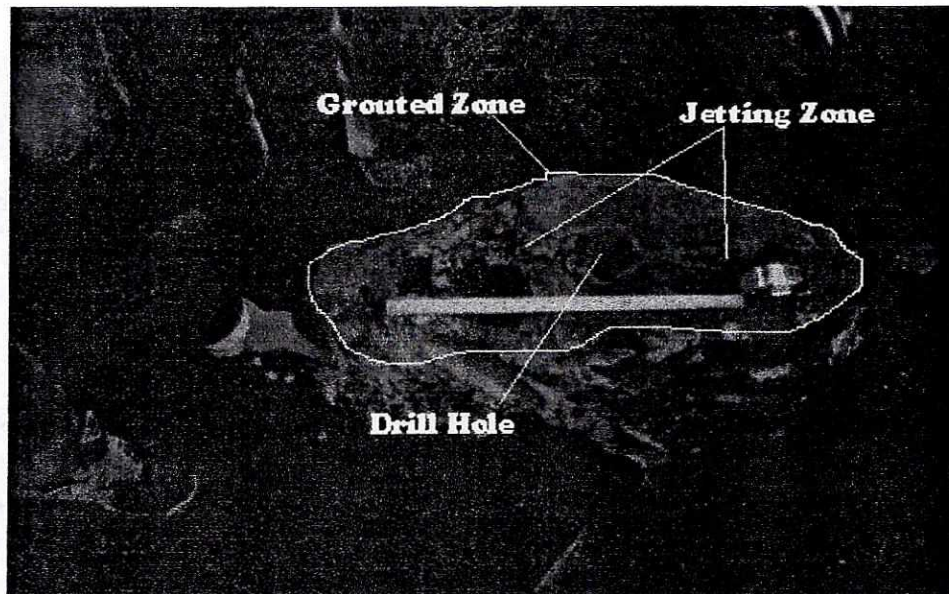
El récord de diámetro más grande que se había obtenido hasta el año 1999 es de 4.00 metros en suelos arenosos poco densos y utilizando Jet-Grouting triple. (Biosca, 1999:11)

Nicholson (1998:2) expone una fórmula que ha propuesto M. Lesnik, la cual aproxima el diámetro de una columna de suelo-cemento no importando el tipo de suelo ni el tipo de Jet-Grouting. Esta se basa en los principios de Bernoulli, la razón de caudales teóricos y reales, el alcance del chorro de alta velocidad, balances de masa y energía y en la teoría hidrodinámica. Esta fórmula es:

$$D = \sqrt{\frac{Q * \left\{ \frac{\rho_z * \rho_w}{\rho_w + \rho_z * \left( \frac{W}{Z} \right)} * \left[ 1 + \frac{W}{Z} \right] - a * \rho_{rück} \right\}}{L * \frac{\pi}{4} * (\rho_{säule} - \rho_{boden})}}$$

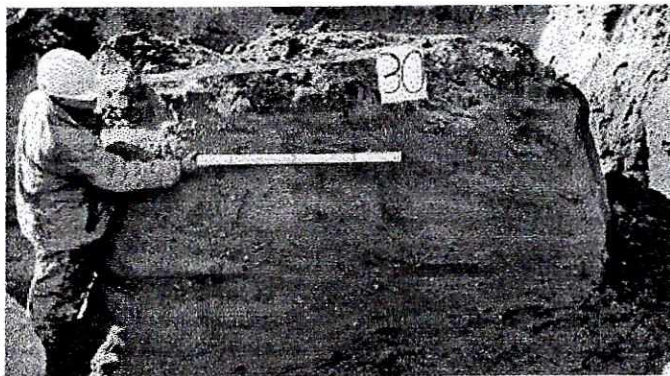
Donde:  $Z$  = Parte de cemento en la lechada de inyección ( $\text{Kg/m}^3$ )  
 $W$  = Parte de agua en la lechada de inyección ( $\text{Kg/m}^3$ )  
 $Q$  = Caudal de inyección ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $\rho_z$  = Densidad del cemento ( $\text{Kg/m}^3$ )  
 $\rho_w$  = Densidad del agua ( $\text{Kg/m}^3$ )  
 $a$  = Relación de caudal inyectado a caudal del rechazo  
 $\rho_{\text{rück}}$  = Densidad del rechazo ( $\text{Kg/m}^3$ )  
 $\rho_{\text{säule}}$  = Densidad de la columna ( $\text{Kg/m}^3$ )  
 $\rho_{\text{boden}}$  = Densidad del suelo ( $\text{Kg/m}^3$ )  
 $L$  = Velocidad ascensional del varillaje (m/s)

**FOTOGRAFÍA No. 12**  
**Columnas de Jet-Grouting**



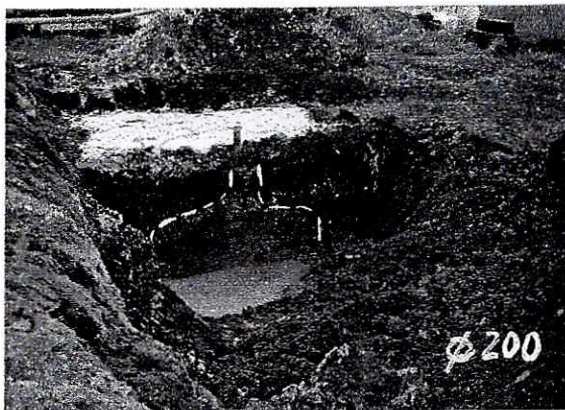
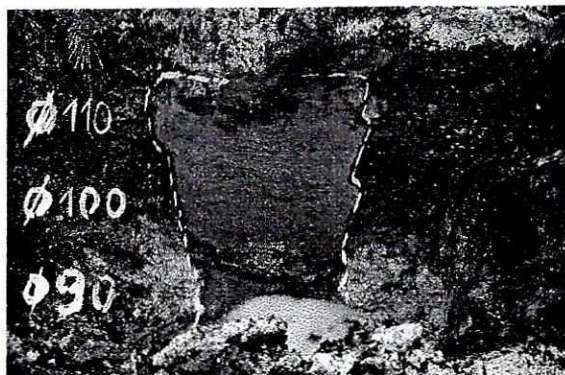
(Fotografía de Soletanche-Bachy)

**FOTOGRAFÍA No. 13**  
**Columna de gran diámetro**



(Fotografía de EARTH TECH)

**FOTOGRAFÍA No. 14**  
**Variación del diámetro para una misma energía utilizada en jet simple (primer  
fotografía) y jet doble (segunda fotografía) – columna de prueba para  
el recalce la línea C “RER” de París**



(Fotografía de Soletanche-Bachy)

**FOTOGRAFÍA No. 15**  
**Diámetro de una columna de prueba de sección semi-circular**



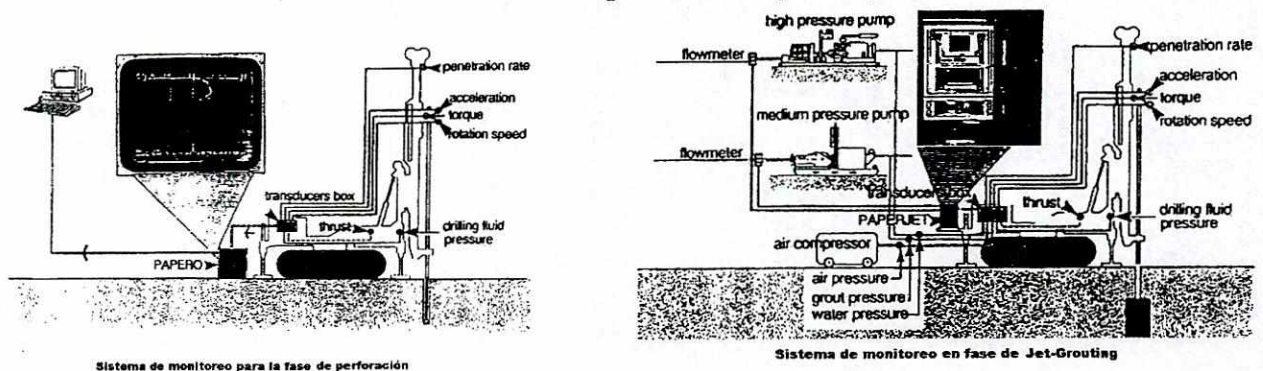
(Fotografía de Soletanche-Bachy)

## V. CONTROL DE CALIDAD Y ESPECIFICACIONES ASTM APLICABLES AL JET-GROUTING

El control de calidad en todo proyecto está constituido por procedimientos controlados durante la ejecución de la obra y por pruebas de calidad del producto terminado. En la técnica del Jet-Grouting también se aplican ambos tipos de control, gracias a los avances tecnológicos que permiten registrar en forma digital, precisa y económica los parámetros que influyen en el proceso constructivo. Existen diferentes procedimientos así como métodos interpretativos, sin embargo todos convergen hacia una misma teoría de interpretación. Gran parte del control de calidad durante la ejecución de los proyectos está constituido por sistemas de instrumentación de la máquina perforadora, lo cual permite obtener al mismo tiempo condiciones del terreno para efectuar una interpretación estratigráfica por medio de un análisis comparativo de la energía específica de perforación (energía consumida por unidad de suelo removido), un monitoreo continuo y su registro que ayudan al operador a reaccionar ante cualquier cambio necesario de los parámetros para lograr los objetivos del proyecto, y un control del desvío de la dirección del taladro inherente a todos los procesos de perforación. A continuación se expone cómo se implementan estos procedimientos de control en la técnica del Jet-Grouting.

**FIGURA No. 14**

### Sistemas de monitoreo en las fases de perforación y de inyección a chorro



(Jameson, Pellegrino y Shea, 1998)

## A. Control de calidad durante la ejecución

En los proyectos de Jet-Grouting los sistemas de control de calidad son dos de acuerdo a la actividad que se está realizando. El sistema de monitoreo durante la perforación y el sistema de monitoreo durante la inyección a chorro de alta velocidad.

1. *Instrumentación y monitoreo para la fase de perforación.* Consisten en el registro de la velocidad de penetración, velocidad de rotación, empuje efectivo, torque efectivo, presión y caudal de los fluidos de perforación y la vibración de la tubería de perforación. Todos estos parámetros pueden separarse en parámetros primarios y parámetros secundarios. Los primarios atañen más al tipo de suelo que se perfora y, por lo tanto, son más sensibles a los cambios estratigráficos; ellos son: la velocidad de penetración, torque aplicado a la tubería y la vibración de los tubos de perforación. Mientras que, los parámetros secundarios son aquellos que se ven afectados directamente por el proceso de perforación: tipos y dimensión de los útiles de perforación (tubería y brocas), rotación y empuje de la tubería hacia abajo, presión y caudal del fluido de perforación. Existen programas informáticos que registran cada uno de estos parámetros, los correlacionan e interpretan para obtener una caracterización del terreno en base al proceso de perforación. Estos programas informáticos han sido desarrollados por distintas empresas dedicadas a la ejecución de Jet-Grouting y perforaciones. Un ejemplo de dichos programas es el sistema patentado PAPERÓ de la empresa RODIO, su nombre viene de abreviar "Parametri Perforazione Rodio". El programa PAPERÓ correlaciona la energía utilizada para perforar un taladro en el suelo y las características de resistencia del suelo, y permite crear una estratigrafía aproximada del terreno que servirá posteriormente para identificar los tramos a tratar con Jet-Grouting y los parámetros de jet que deberán adoptarse para su ejecución. Este sistema, al igual que muchos otros, se basa en el concepto de que una perforación corta y de diámetro pequeño representa a una escala diferente las mismas condiciones que se encuentran en perforaciones de gran diámetro y profundidad. Todos estos sistemas correlacionan los datos basándose en una teoría de energía específica de perforación, la cual se ha estudiado y afinado a lo

largo de muchos años por investigadores de este ramo. La ecuación de esta energía es:

$$E_s = \frac{F}{A} + \frac{2\pi * N * T}{A * V} \text{ en ( KJ/m}^3\text{)}$$

donde

F es la fuerza de empuje hacia abajo en KN

A es el área transversal de la perforación en metros cuadrados

N es la velocidad de rotación en revoluciones por minuto

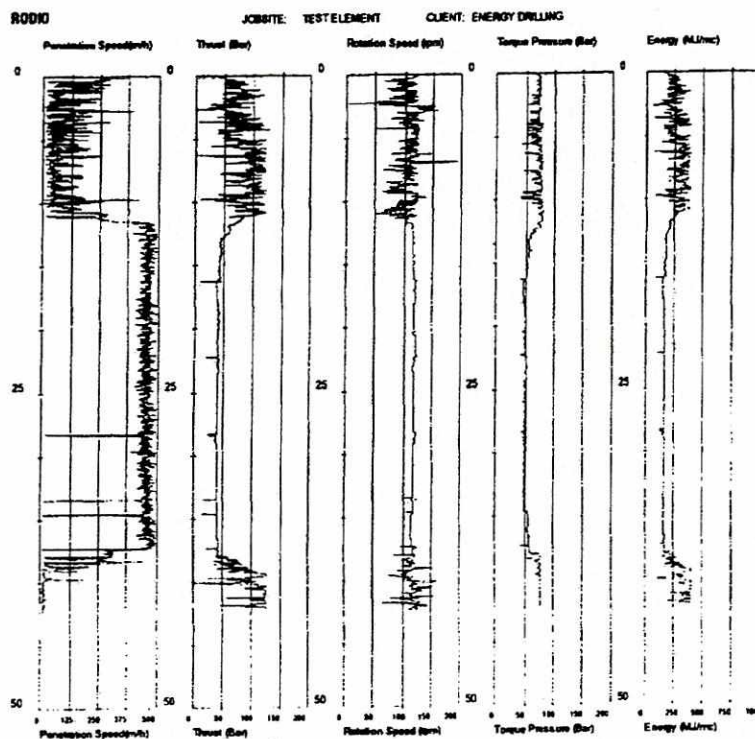
T es el torque aplicado en KN\*m y

V es la velocidad de penetración en metros por segundo

Una vez calculada la energía específica del terreno, se compara con una base de datos que contiene valores de esta energía para condiciones de suelo distintivas y así se crea la estratigrafía aproximada.

Las siguientes figuras representan una impresión de los parámetros obtenidos durante una perforación por medio del sistema PAPER0, la figura No. 15 corresponde a la energía específica y parámetros de una perforación en un terreno sin haberse tratado por medio de Jet-Grouting. La figura No. 16 representa los mismos datos del terreno mejorado mediante Jet-Grouting con lechada de agua y cemento Portland. Se puede observar cómo la energía específica de perforación se ve aumentada a un poco más del doble por a las inyecciones a chorro del Jet-Grouting.

**FIGURA No. 15**  
**Parámetros y energía específica de**  
**una perforación en terreno sin tratar**



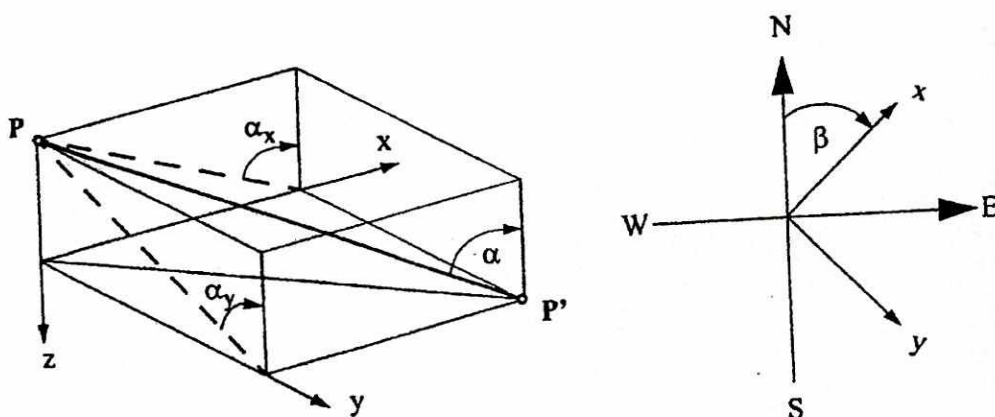
(Jameson, Pellegrino y Shea, 1998)

Adicionalmente a los controles y registro de parámetros arriba descritos, suele medirse cuán desviada se ha ejecutado, o se está ejecutando, la perforación con respecto a la inclinación y dirección deseada. Esto se hace a través de la introducción de una pequeña sonda que contiene inclinómetros electrónicos cubiertos por materiales antimagnéticos, un reloj digital, batería para suministro de energía y una tarjeta de memoria. Esta sonda se instala generalmente entre la broca de perforación y el porta-toberas y su uso depende de lo crítico que sea la localización exacta de cada una de las perforaciones que se realizan en el proyecto.



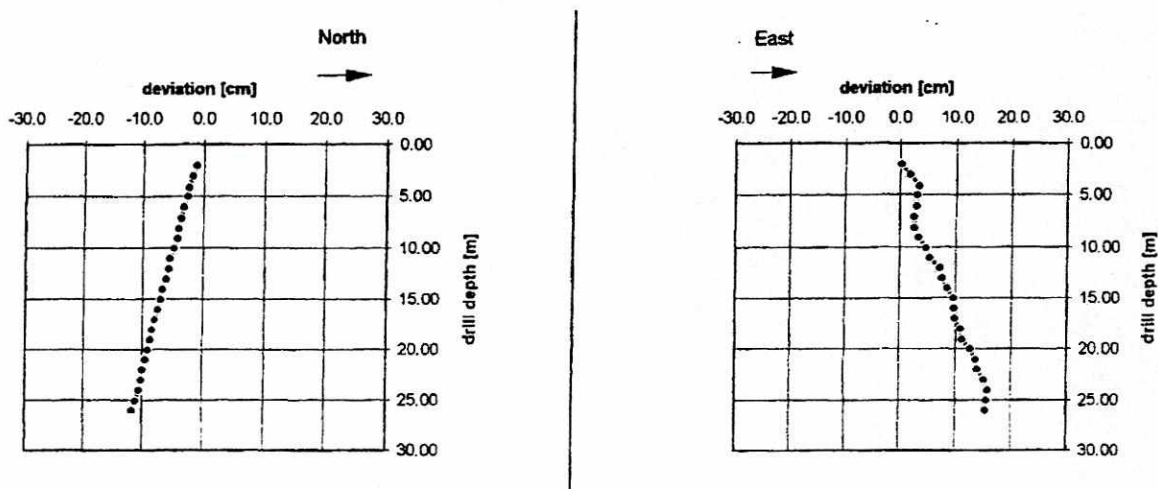
desea hacer pantallas impermeables de suelo tratado, la localización exacta sí es importante. Las siguientes figuras (figuras No. 17 y No. 18) representan los ángulos que se miden con este tipo de sondas, así como los reportes que se obtienen con programas informáticos que interpretan cada una de las lecturas que efectúan estas sondas.

**FIGURA No. 17**  
Sistema de mediciones de las sondas



(Jameson, Pellegrino y Shea, 1998)

**FIGURA No. 18**  
Informes de la inclinación de una perforación



(Jameson, Pellegrino y Shea, 1998)

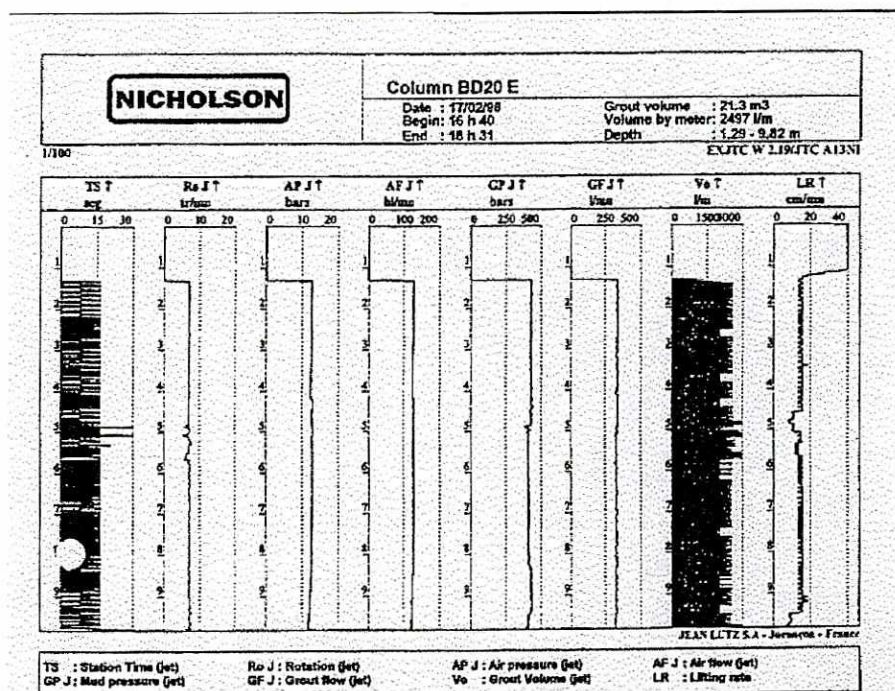
2. *Monitoreo de la fase de inyección o Jet-Grouting.* Los parámetros involucrados en la fase de inyección a chorro son: caudal de la lechada de inyección, presión aplicada, rotación de la tubería y la velocidad a la que se retira ésta. Así todo sistema de control deberá ser capaz de registrar cada uno de estos parámetros en tiempo real, interpretarlos y relacionarlos para proporcionar al operador información necesaria para que pueda reaccionar ante cualquier modificación durante la ejecución de las columnas de suelo tratado o para detectar anomalías durante el proceso. Como se ha mencionado en el capítulo anterior, la relación de todos estos parámetros es la energía de Jet-Grouting.

El cálculo de esta energía es aplicable a cualquiera de los tres tipos del Jet-Grouting; para el caso de los tipos poli-fluido la energía del jet resulta de la suma de la energía del chorro de agua y la energía del chorro de la lechada del agente cementante. La energía de erosión del chorro de aire se desprecia de estos cálculos debido a que este fluido es muy compresible, y se requiere de mediciones complicadas de la humedad y temperatura en el punto de la descarga para determinar el impacto que produce en el terreno. Despreciar la energía del aire no afecta significativamente la fiabilidad de este proceso de medición.

A lo largo de la experiencia de muchos proyectos de Jet-Grouting instrumentados con este sistema de monitoreo se ha logrado determinar la energía necesaria para crear columnas de suelo tratado de cierto diámetro en base al sistema de jet que se utiliza, por lo que ha representado una ventaja tanto en la rama del control de calidad como en la de investigación.

A continuación se presenta una gráfica del registro de todos los parámetros y la energía de Jet-Grouting en una perforación (Figura No. 19). Esta gráfica se obtiene con el sistema de monitoreo desarrollado por la compañía Jean Lutz S.A. de Francia. Cabe mencionar que toda esta instrumentación solamente asegura y registra todo el proceso para identificar dificultades potenciales y fallas en el proceso de la inyección, pero no refleja las condiciones del suelo que resultan después de esta fase.

**FIGURA No. 19**  
**Registro de los parámetros durante**  
**la ejecución del Jet-Grouting**

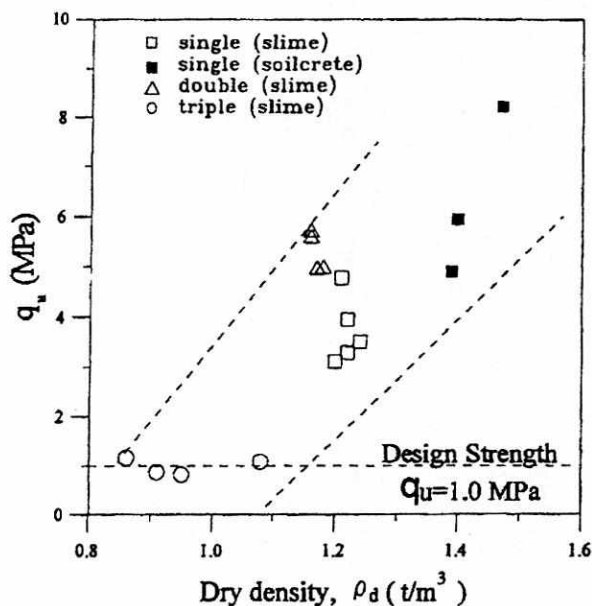


(Jameson, Pellegrino y Shea, 1998)

Actualmente muchas compañías y equipos de investigación se han concentrado en encontrar un método fiable que estime la calidad del producto terminado del Jet-Grouting durante su ejecución. Un método que parece ser muy prometedor y fiable es la determinación y correlación de las características físicas y de resistencia del rechazo obtenido durante la fase de jet con la resistencia final y diámetro de las columnas de suelo tratado. Durante la Segunda Conferencia Internacional sobre Técnicas de Mejoramiento del Suelo celebrada en Singapur en el año 1998, los investigadores Y.S. Fang y F.J. Yu de la universidad nacional Chiao Tung de Taiwan presentaron resultados de su investigación sobre este método. Ellos concluyeron que la composición mineralógica determinada por medio de la difracción de rayos-X del

rechazo y del “soilcrete” (mezcla de suelo con cemento Pórtland resultante del proceso de Jet-Grouting) es similar entre ambos. También determinaron rangos de los valores de resistencia, módulos de elasticidad y relaciones de Poisson del rechazo y soilcrete para compararlos con sus densidades secas a fin de establecer límites de variación entre ellos. A continuación se presentan las gráficas y cuadros de resultados para suelos compuestos por arcilla limosa (CL) presentados por estos investigadores durante esta conferencia.

**GRÁFICA No. 16**  
**Relación entre resistencia a la compresión uniaxial y la densidad seca**



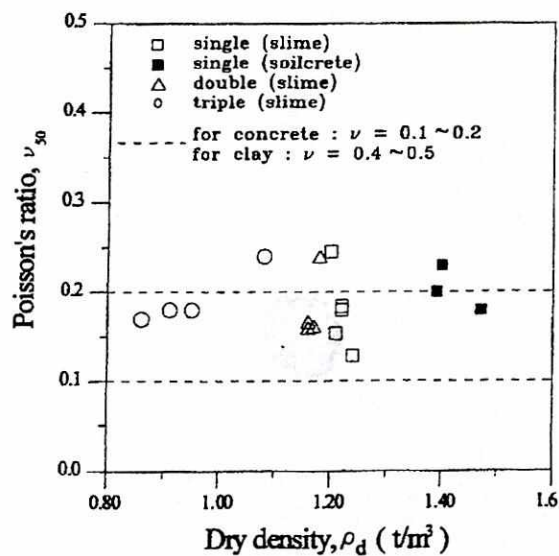
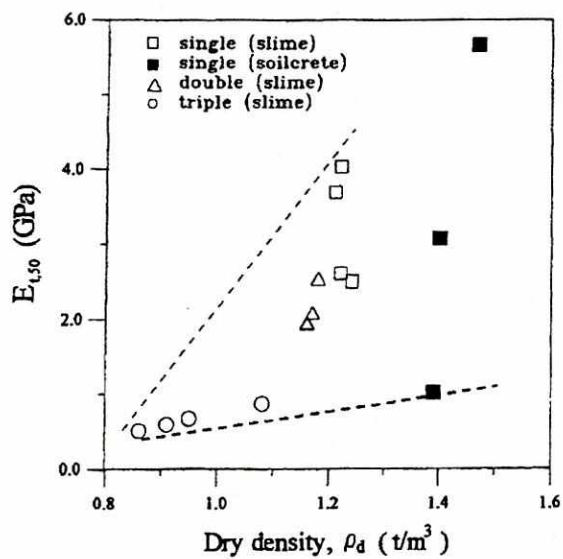
(Fang y Yu, 1998)

**CUADRO No. 8**  
**Esfuerzos de tensión y compresión de rechazo y soilcrete**

Material	$\sigma_{t,B}$ (MPa)	$q_u$ (MPa)	$\sigma_{t,B}/q_u$
Rechazo de jet simple	0.2~0.42	3.1~4.78	1/7~1/24
Rechazo de jet doble	0.38~0.57	4.97~5.74	1/8~1/25
Rechazo de jet triple	0.36~0.8	0.81~1.1	1~1/3
Soilcrete	0.37~0.95	4.9~8.22	1/5~1/22

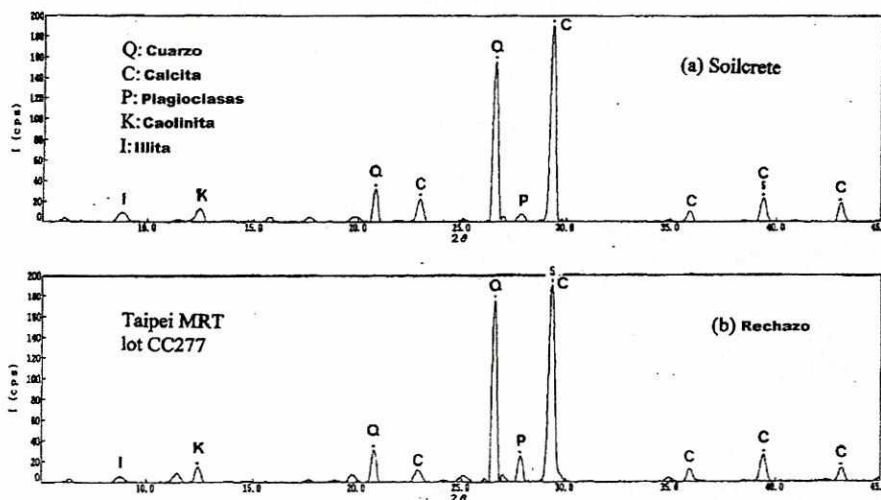
(Fuente: Fang y Yu, 1998)

**GRÁFICA No. 17**  
**Relaciones de densidad seca con módulo**  
**de elasticidad y razón de Poisson**



(Fang y Yu, 1998)

**FIGURA No. 20**  
**Composición mineralógica de rechazo y soilcrete**



(Fang y Yu, 1998)

Por otro lado, la compañía Soletanche-Bachy utilizó un método de control de calidad por medio de la evaluación de las características del rechazo durante la ejecución de los túneles para el sistema de metro subterráneo en el Cairo, Egipto y obtuvo resultados satisfactorios. Al mismo tiempo demostró que existen variaciones en las características del rechazo dependiendo de las estructuras que se encuentran cercanas al proceso de Jet-Grouting o si se trabajaba a distancias cortas entre columnas previamente hechas. Durante este proyecto lograron determinar una relación entre la densidad del rechazo que obtenían con el diámetro de las columnas, y que esta densidad varía con respecto a la profundidad de la columna. A continuación se presentan los cuadros de sus resultados (cuadros No. 9 y No. 10, y gráficas de la No. 18 a la No. 20). En ellos se puede apreciar que las densidades del rechazo disminuyen cuando se ejecutan columnas de Jet-Grouting cercanas a columnas previamente hechas. También se observa que estas densidades aumentan en relación directa con el aumento del diámetro de la columna que se desea obtener. En estos cuadros, los términos primera fase, segunda fase, tercera fase y cuarta fase se refieren a las primeras, segundas, terceras y cuartas columnas ejecutadas en distintos tiempos respectivamente y en una configuración de columnas secantes con puntos de intersección triples.

**CUADRO No. 9**  
**Densidades del rechazo para diferentes**  
**diámetros de columnas de jet simple**

	unidades	Diámetros de columnas en cm			
		160	180	200	220
Volumen de suelo mezclado con lechada	l/m	2010	2543	3140	3799
Densidad del suelo		2.1	2.1	2.1	2.1
Peso del suelo mezclado con lechada	Kg/m	4221	5340	6594	7978
Caudal de la lechada	l/min	225	225	225	225
Velocidad de ascenso aplicada al varillaje	cm/min	16.36	16.36	16.36	16.36
Volumen de lechada mezclada con el suelo	l/m	1375	1375	1375	1375
Densidad de la lechada		1.34	1.34	1.34	1.34
Peso de lechada mezclada con el suelo	Kg/m	1843	1843	1843	1843
Volumen total de mezcla de suelo y lechada	l/m	3385	3918	4515	5174
Peso total de mezcla de suelo y lechada	Kg/m	6064	7183	8437	9821
Densidad del rechazo		1.79	1.83	1.87	1.9

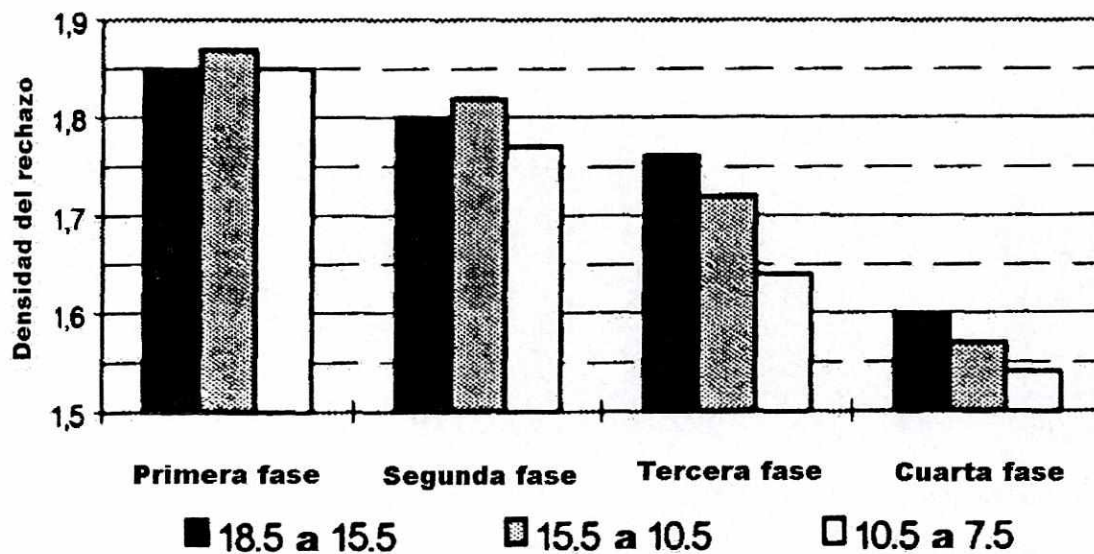
(Fuente: Soletanche-Bachy)

**CUADRO No. 10**  
**Densidades del rechazo en distintos**  
**tipos de columnas**

	unidades	Tipo de columna			
		Primer fase	Segunda fase	Tercer fase	Cuarta fase
Diámetro de columna	cm	180	180	180	180
Volumen de suelo mezclado con lechada	l/m	2543	1834	1191	605
Peso de suelo mezclado con lechada	Kg/m	5340	3851	2501	1268
Volumen de lechada mezclada con suelo	l/m	1375	1375	1375	1375
Peso de lechada mezclada con suelo	Kg/m	1843	1843	1843	1843
Volumen total de mezcla suelo y lechada	l/m	3918	3209	2566	1979
Peso total de mezcla de suelo y lechada	Kg/m	7183	5694	4344	3111
Densidad del rechazo		1.83	1.77	1.69	1.57

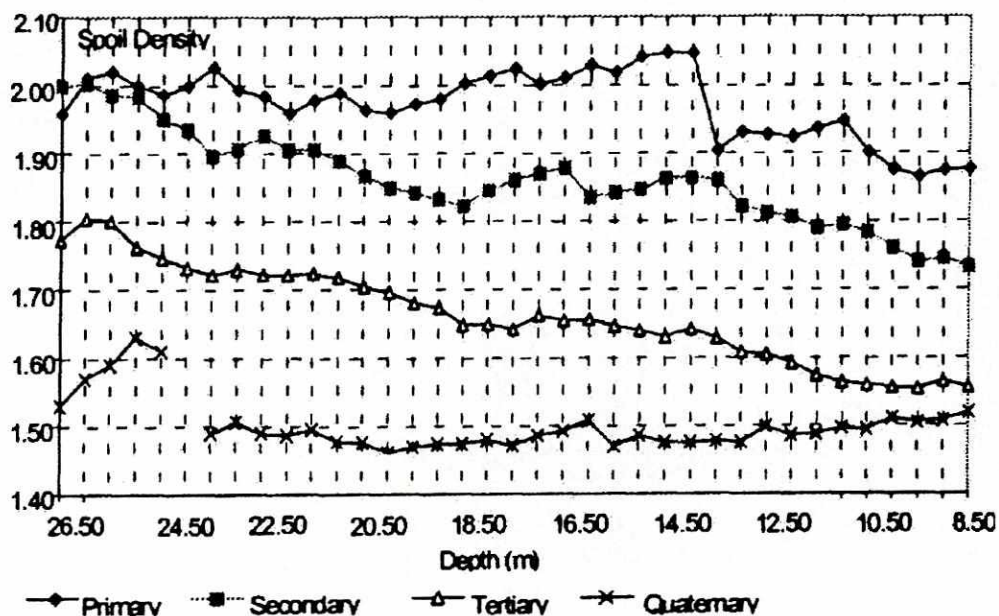
(Fuente: Soletanche-Bachy)

**GRÁFICA No. 18**  
**Densidades del rechazo a distintas profundidades y tipos de columnas**



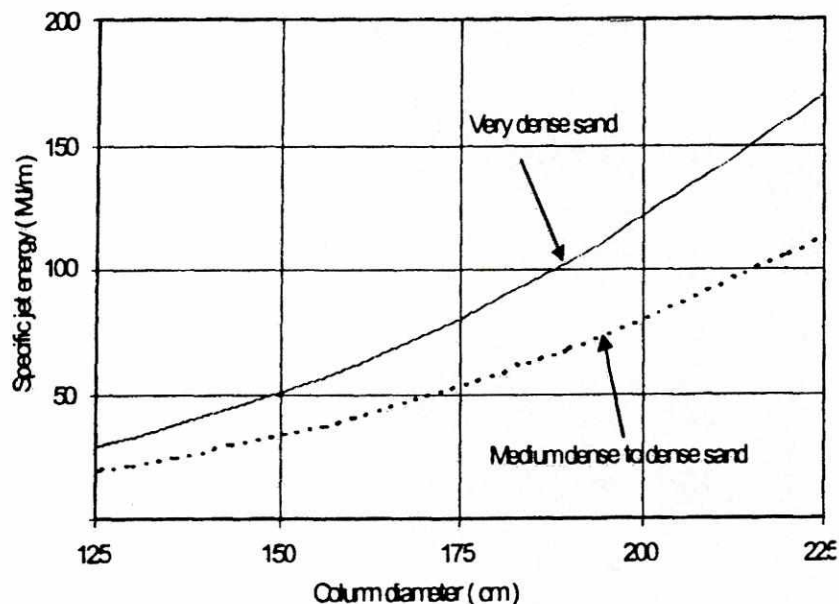
(Fuente: Soletanche-Bachy)

**GRÁFICA No. 19**  
**Promedio de densidades del rechazo versus profundidad de la columna**



(Fuente: Soletanche-Bachy)

**GRÁFICA No. 20**  
**Relación entre energía de Jet-Grouting**  
**y diámetro de columnas para las arenas del**  
**río Nilo con jet doble**

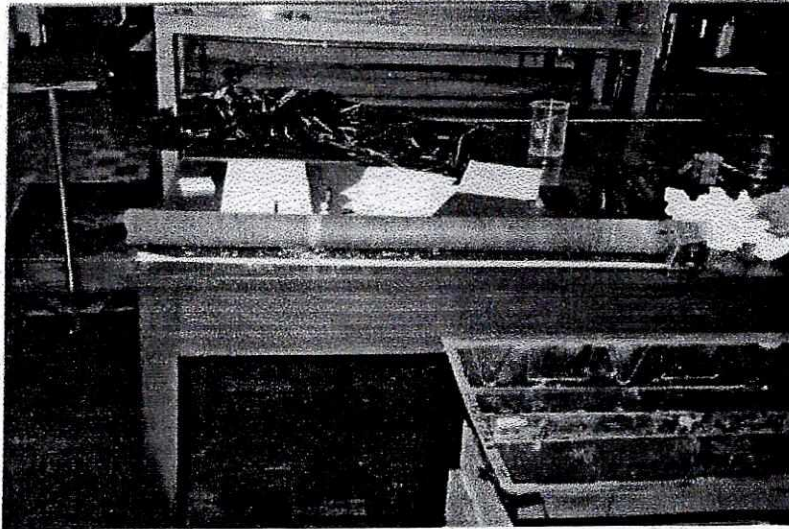


(Morey y Campo, 1996)

### B. Control de calidad post-ejecución.

Este control consiste en la perforación con recuperación continua de testigos posterior a la ejecución y fraguado de la lechada de la masa de suelo tratado (fotografías No. 16 y No. 17). A estos testigos se les efectúan distintas pruebas en un laboratorio para determinar sus propiedades físicas y de resistencia. Dentro de los tipos de control post-ejecución se encuentran: la realización de ensayos de penetración dinámica continua, ensayos presiométricos, diagrfia de sondeos (especialmente en las que se obtienen medidas de densidad), tomografía eléctrica y respuesta a ondas superficiales. Todas éstas deben practicarse antes y después del tratamiento del terreno con el Jet-Grouting a fin de obtener parámetros comparativos. Cada una de estas técnicas no se discute en el presente trabajo ya que el autor considera que están fuera del alcance y objetivo de éste.

**FOTOGRAFÍA No. 16**  
**Testigo de una columna de Jet-Grouting**



(Fotografía del proyecto GOPAL)

**FOTOGRAFÍA No. 17**  
**Detalle de testigos extraídos de una columna de Jet-Grouting**



(Fotografía del proyecto GOPAL)

### C. Especificaciones de ASTM aplicables al Jet-Grouting

A continuación se presenta una lista de las especificaciones de la Sociedad Americana para Pruebas de Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) que se han aplicado a lo largo de estos años como parte de las especificaciones técnicas en los proyectos de Jet-Grouting llevados a cabo en el continente americano:

- **ASTM C 39-96:** Método de pruebas para la determinación del esfuerzo a compresión de especímenes cilíndricos de concreto.
- **ASTM C 150-96:** Cemento Pórtland
- **ASTM C 494-92:** Aditivos químicos para el concreto
- **ASTM C 618-97:** Polvos "Fly-ash" , puzolana natural y puzolana natural calcinada como uso de aditivos minerales en concretos de cemento tipo Pórtland
- **ASTM C 1017-92:** Aditivos químicos para la fabricación de concretos fluidos
- **ASTM D 2488-93:** Descripción e identificación de suelos (procedimientos visuales y manuales)

## **VI. APLICACIONES DE JET-GROUTING PARA RECALCES**

Los recalces de estructuras consisten en un reacondicionamiento de uno o varios de los elementos que conforman el sistema de cimentación. Un recalce se hace necesario cuando se determina que el suelo o elemento estructural de cimentación no es capaz de soportar las condiciones de carga que dan estabilidad a la construcción. Estas situaciones se presentan por diversas razones: cuando se desea remodelar una estructura para soportar más carga de servicio, por una mala estimación del valor de capacidad soporte del suelo durante la fase de diseño y construcción, o bien, por condiciones del terreno que no se investigaron antes, tales como estratos de suelo muy compresibles, así como en los casos en los que nuevas construcciones vecinas implican un cambio en la condiciones originales del sistema suelo-cimiento (por ejemplo, las construcciones de túneles por debajo de edificios o excavaciones para sótanos en las vecindades de la estructura afectada). Las consecuencias que conlleva una deficiencia en los suelos de fundación son asentamientos nocivos para la estructura que pueden poner en peligro la funcionalidad de ésta. Las deficiencias de los elementos que componen la cimentación de la estructura pueden llevarla a una falla irreparable y a su inminente colapso. La solución que se practica a estos problemas va desde un mejoramiento del suelo de fundación hasta un refuerzo o cambio de la configuración del sistema de cimentación de la estructura, o una combinación de estas. La aplicación de una u otra solución será determinada por la facilidad y factibilidad económica que cada una supone, incluso de la comodidad, ya que en muchas ocasiones la estructura a recalzar debe seguir prestando su servicio sin interrupción (como es el caso de carreteras, vías de trenes, túneles, edificios públicos o privados de carácter esencial). El Jet-Grouting, por ser una técnica de mejoramiento de las características del terreno, entra dentro de las soluciones mencionadas primero. El Jet-Grouting es una solución muy atractiva desde el punto de vista técnico, de tiempo de ejecución y económico, en aquellos casos en los que aumentar la capacidad de valor soporte del terreno de fundación, la eliminación o disminución de su tendencia a asentarse por nuevas cargas, o bien, en los proyectos en los que las cargas deben de ser

transmitidas a estratos de suelo más profundos y competentes sin tener que cambiar o reforzar los elementos estructurales de la edificación. El uso de la técnica del jet en estos tipos de proyecto supone ventajas sobre los métodos convencionales de recalces con micropilotes, pilotes, pantallas rígidas e inyecciones de consolidación. Dentro de estas ventajas puede mencionarse que no hay necesidad de reforzar las zapatas de los edificios o construir nuevos elementos de unión para asegurar que ambos elementos trabajen en conjunto, así como para restituir las áreas dañadas del cimiento. Esto es gracias a las diferencias de diámetro de perforación y de columna inyectada que crea el Jet-Grouting, ya que el área de contacto entre la columna de jet y la zapata es mucho mayor al diámetro del agujero practicado en ésta última durante la ejecución. Las columnas de Jet-Grouting no necesariamente se refuerzan con elementos de acero, por lo que su uso en suelos muy agresivos o bajo niveles de agua no presenta complicaciones para el proyecto. Por el contrario, la práctica de reforzar las columnas de jet con elementos metálicos sí supone una complicación, ya que para la introducción de la armadura en la columna se debe llevar a cabo muchas veces una re-perforación, porque insertar este refuerzo a través del agujero por donde estaba la tubería de inyección es casi imposible debido a que éste suele taparse, y porque además implica una nueva inyección para unir la armadura al resto de la columna de jet. Existen tuberías de inyección patentadas por sus fabricantes que permiten ejecutar la inyección durante el avance de la perforación y dejando sin extraer tanto la tubería como el útil de corte para que trabaje como armadura de la columna; esta solución aún es cara y poco competitiva.

La vibración que ocasiona el equipo de ejecución de Jet-Grouting es poca y no es perjudicial para la estructura que se está recalzando, además que al ser relativamente pequeña la maquinaria se puede trabajar bajo alturas reducidas y sin requerir de una preparación de plataformas de trabajo. Las instalaciones de fabricación de la lechada o del almacenamiento de los materiales pueden construirse fuera del recinto de trabajo. Por último, el tratamiento de mejora del terreno por medio del Jet-Grouting puede practicarse desde fuera de la edificación y a todo lo largo de su perímetro sin necesidad de romper muros, o sea, no es necesario practicarla bajo o dentro de ella, por lo que el uso de la edificación no se ve interrumpido durante este tratamiento.

Algo muy importante a ser tomado en cuenta durante un recalce con Jet-Grouting es que se deben utilizar relaciones grandes de diámetro de perforación a diámetro de tubería debido a que el rechazo debe tener un camino libre hacia afuera de la perforación, de no ser así, las presiones que se generan durante el proceso y debido a que el volumen de suelo está siendo desplazado pero no evacuado ocasionan un levantamiento del suelo en la superficie que puede ser más peligroso que el problema que se está solucionando o puede dañar estructuras vecinas que no presentaban ninguna problemática.

De las muchas posibilidades y de casos que pueden existir en las obras de Ingeniería Civil que requieren de un tratamiento de recalce se presentan, a continuación, una serie de soluciones aplicadas por la empresa Soletanche-Bachy con Jet-Grouting. Estos ejemplos se pueden clasificar como obras de recalce según lo arriba expuesto ya que su aplicación se debe a la ejecución de nuevas excavaciones contiguas a cimientos existentes, a refuerzo del terreno y sistema de cimentación por el aumento de las cargas de servicio a las que se verán sometidos y por proyectos en los cuales la capacidad portante del suelo o la propensión de estos a consolidaciones muy grandes no fueron bien determinadas, lo que ocasiona a las construcciones asentamientos globales o diferenciales que ponen en peligro su estado de servicio.

Como se menciona arriba, los proyectos que a continuación se exponen como ejemplos de recalces por la técnica del Jet-Grouting fueron llevados a cabo por la empresa Soletanche-Bachy y/o sus filiales alrededor del mundo. Todas las figuras y fotografías fueron proporcionadas por Soletanche-Bachy.

## A. Recalces y protección por nuevas excavaciones

**Nombre de la obra:** Edificio 17 de la calle du Lac

**Lugar:** Génova, Suiza.

**Año de ejecución:** 1989

**Descripción del trabajo:** La estratigrafía de suelo que comúnmente se encuentra en Génova es una capa delgada que varía de medio a un metro de profundidad de aluviones rocosos sobre los cuales se han cimentado la mayoría de las edificaciones existentes. Por debajo de esta fina capa se hallan otras capas de suelos limosos muy compresibles (con valores de compresión no confinada "Cu" del orden de 30 a 50 KPa) que hacen prácticamente imposible las excavaciones sin protección o sin deformaciones.

El trabajo consistió en construir un sótano para un edificio nuevo, para lo cual hubo necesidad de proteger la cimentación de edificaciones colindantes contra los posibles asentamientos que ocasionan las excavaciones. Para ello se proyectó la transmisión de las cargas de los edificios hasta niveles más profundos donde los efectos de la excavación no le afectarían. Se procedió a hacer una perforación con martillo de fondo para instalar tubería de PVC que serviría de protección contra la erosión de la mampostería de las cimentaciones a recalzar. Al mismo tiempo, la tubería de PVC ayudó a canalizar y sacar eficientemente el rechazo producido en las obras de jet (y así evitó levantamientos por sobrepresiones del jet). Algunas de las columnas de Jet-Grouting fueron armadas con una barra de acero en su centro (ver figuras No. 21 y No. 22)

**Cantidades de obra:** 124 columnas armadas de 65 a 70 centímetros de diámetro y espaciadas 55 centímetros entre centros de cada una (columnas secantes).

FIGURA No. 21

## Detalle de las columnas de cimentación

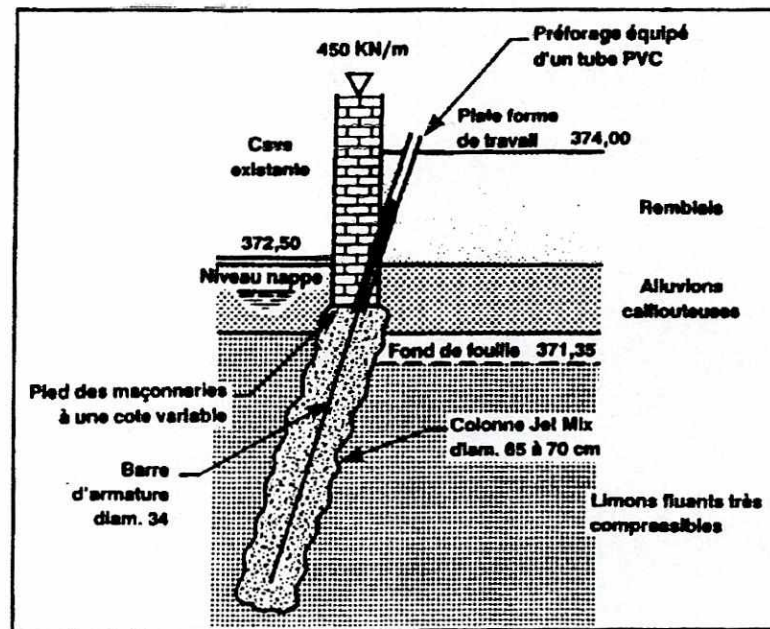
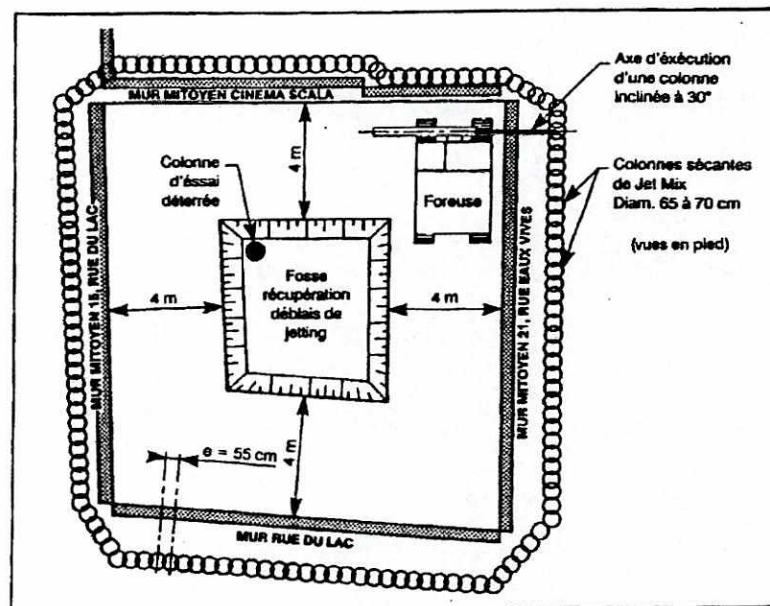


FIGURA No. 22

## Planta general del proyecto



**Nombre de la obra:** Edificio 27 de la calle Croix d'Or

**Lugar:** Génova, Suiza.

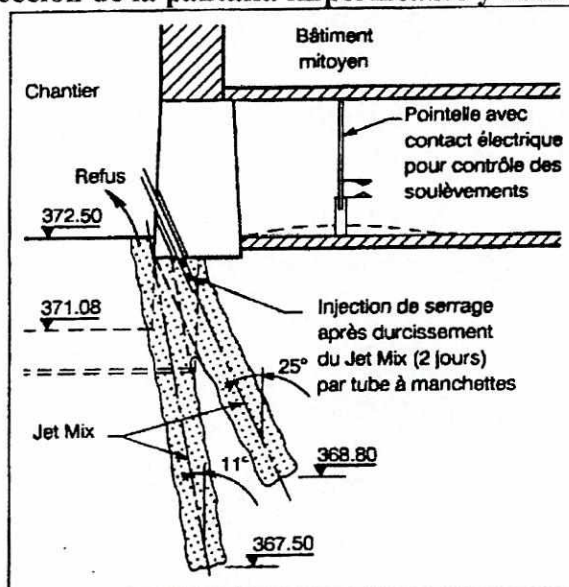
**Año de ejecución:** 1989 - 1990

**Descripción del trabajo:** El proyecto consistía en la remodelación total de un edificio, para lo cual se necesitaba construir un sótano sin demoler el edificio y sin crear grandes vibraciones, ya que gran parte de la cimentación del edificio estaba hecha de rocas sin cementar entre ellas.

Se llevaron a cabo dos tipos de columnas de Jet-Grouting; un grupo de estas tenía la función de transmitir las cargas del edificio en funcionamiento hacia un estrato inferior y el otro grupo de columnas, construidas de forma secante entre ellas, se hizo para crear una pantalla impermeable alrededor de la excavación. Las resistencias del suelo tratado obtenidas fueron de  $2 \text{ Kg/cm}^2$  a los dos días y de  $80 \text{ Kg/cm}^2$  a los 28 días de ejecutada la inyección. Los asentamientos registrados después de la excavación no sobrepasaron los 5 mm, el promedio medido fue de apenas 3 mm. (Figura No. 23).

**Cantidades de obra:** 210 columnas de Jet-Grouting de 60 cm de diámetro (830 metros lineales de tratamiento).

**FIGURA No. 23**  
Sección de la pantalla impermeable y recalce



**Nombre de la obra:** Dynamic Earth Project

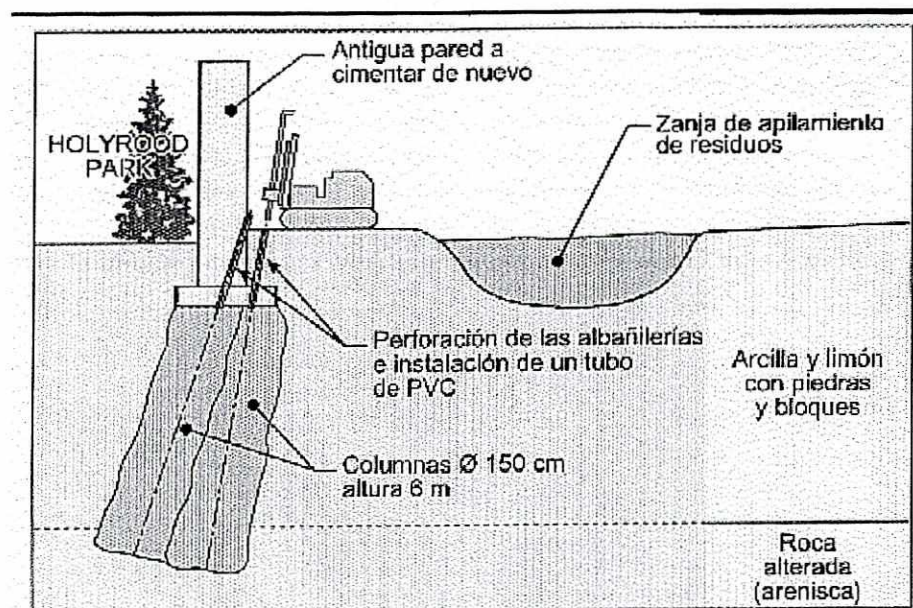
**Lugar:** Edimburgo, Escocia

**Año de ejecución:** 1997

**Descripción del trabajo:** Se utilizó el Jet-Grouting para la construcción de un nuevo centro de exposiciones contiguo al parque Holyrood y delimitado por muros de roca del siglo XV que necesariamente debían conservarse. El tipo de suelo que se hallaba en el lugar era arcilla con limo poco compacta y con bloques de arenisca esparcida, y la capacidad a la compresión simple requerida no debía ser inferior a los 10 Kg/cm<sup>2</sup>. El procedimiento fue efectuar columnas de Jet-Grouting de 1.50 metros de diámetro por medio del tipo de Jet doble con aire. La resistencia final que se obtuvo fue entre los 10 Kg/cm<sup>2</sup> y los 20 Kg/cm<sup>2</sup> con diámetros mayores a 1.50 metros de las columnas que permitieron crear un macizo de tierra continuo. (Ver la figura No. 24)

**Cantidades de obra:** 187 columnas de Jet-Grouting tipo bi-fluido con aire a 6 metros de profundidad.

**FIGURA No. 24**  
**Esquema del proyecto**



**Nombre de la obra:** Ampliación de la Universidad GAN

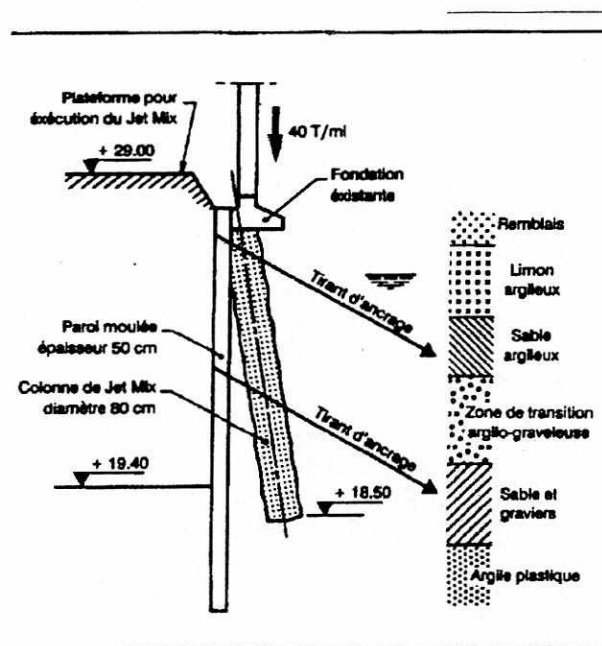
**Lugar:** París, Francia

**Año de ejecución:** 1990

**Descripción del trabajo:** La Universidad GAN necesitaba ampliar sus instalaciones, para lo cual construiría un edificio nuevo que contaría con un sótano. Este edificio estaría pegado a los antiguos edificios de la universidad y la nueva pantalla anclada que serviría de muro de contención cortaría parte del cimiento antiguo de estos edificios. La función de las columnas de Jet-Grouting era de transmitir la carga de los cimientos (estimada en 40 toneladas por metro lineal) hasta una capa de arena y grava. (Ver figura No. 25)

**Cantidades de obra:** 30 columnas de 10,50 metros de longitud y 80 centímetros de diámetro.

**FIGURA No. 25**  
Sección y detalle de la pantalla anclada y el antiguo cimiento



**Nombre de la obra:** Consolidación de Marquis de Pombal

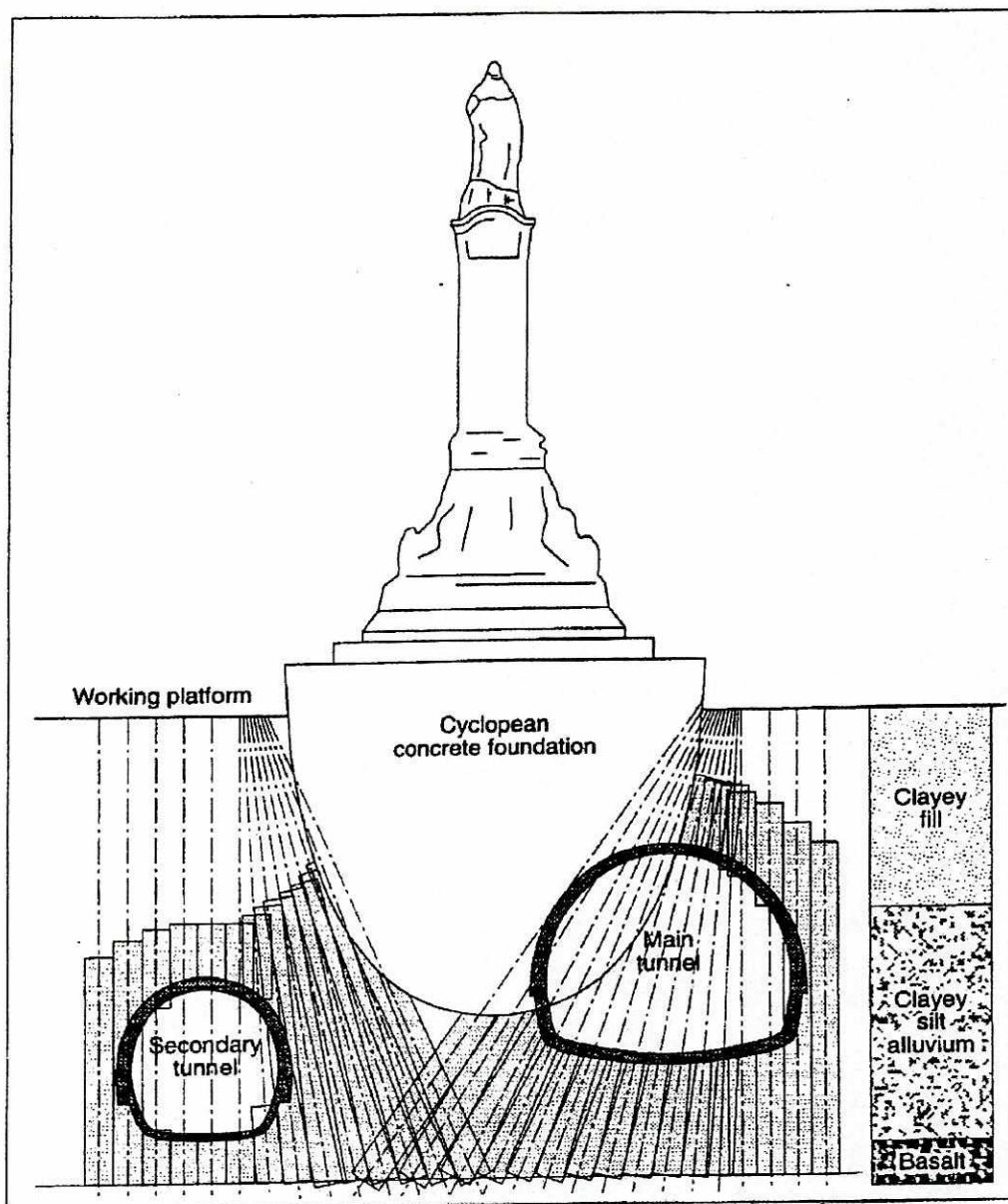
**Lugar:** Lisboa, Portugal

**Año de ejecución:** 1994

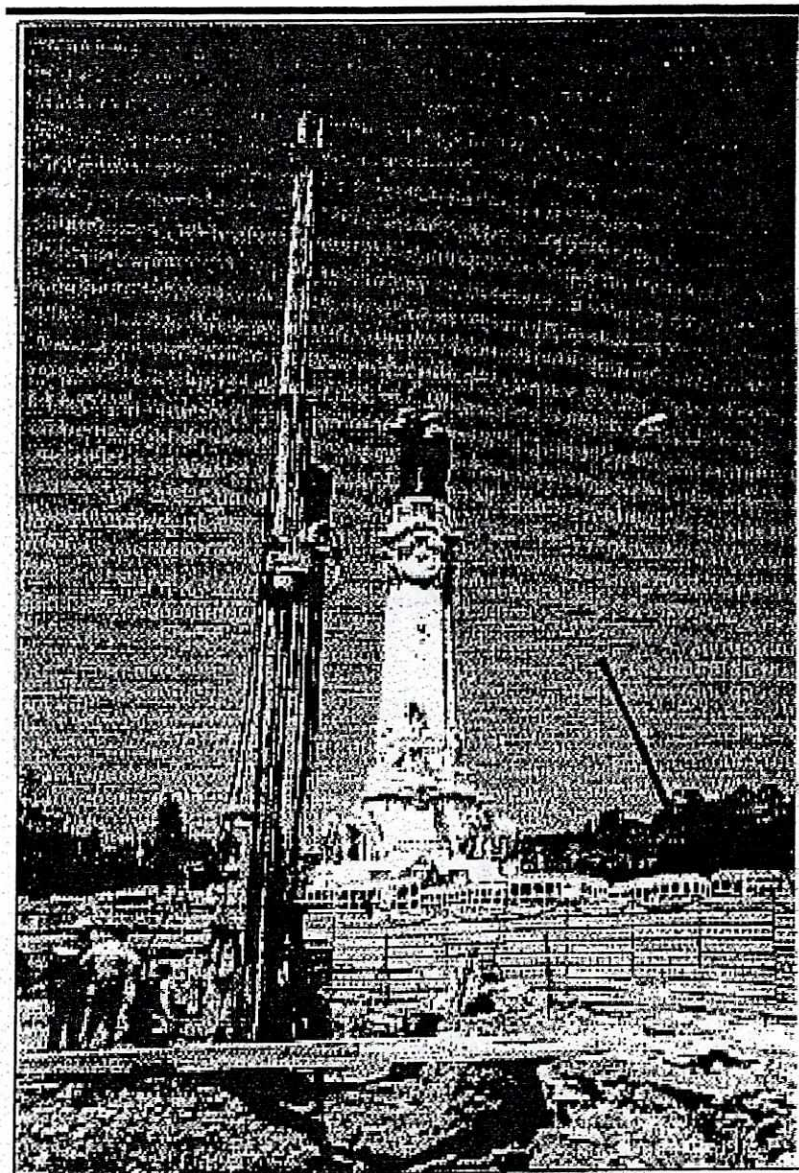
**Descripción del trabajo:** Parte de la construcción del Metro de Lisboa era la ejecución de túneles que atraviesan esta ciudad. Un caso que requirió un tratamiento especial fue el monumento Marquis de Pombal, el cual estaba cimentado por una gran masa de concreto ciclópeo en un suelo muy susceptible a la consolidación y asentamientos debidos a la ejecución de los túneles. Así el tratamiento de Jet-Grouting consistía en crear una masa de suelo mejorado y libre de consolidaciones por debajo de todo el monumento y por la sección donde pasarían los túneles del metro. Todo ello bajo nivel freático y sin ocasionar levantamientos del suelo que pudiesen inclinar al monumento. (Véanse la figura No. 26 y fotografía No. 18)

**Cantidades de obra:** 786 columnas de Jet-Grouting doble de 1.0 metro de diámetro, 102 columnas de jet doble de 0.6 m de diámetro. Todas estas representaron una cantidad de 13,315 metros de perforación y 6,035 metros de inyección con jet bi-fluido (de los cuales 293 metros lineales fueron de las columnas de 0.6 de diámetro).

**FIGURA No. 26**  
**Esquema de las columnas bajo el monumento**



**FOTOGRAFÍA No. 18**  
**Fotografía del proyecto durante su ejecución**



**Nombre de la obra:** Edificio Avenue du Chablais

**Lugar:** Lausana, Suiza

**Año de ejecución:** 1995

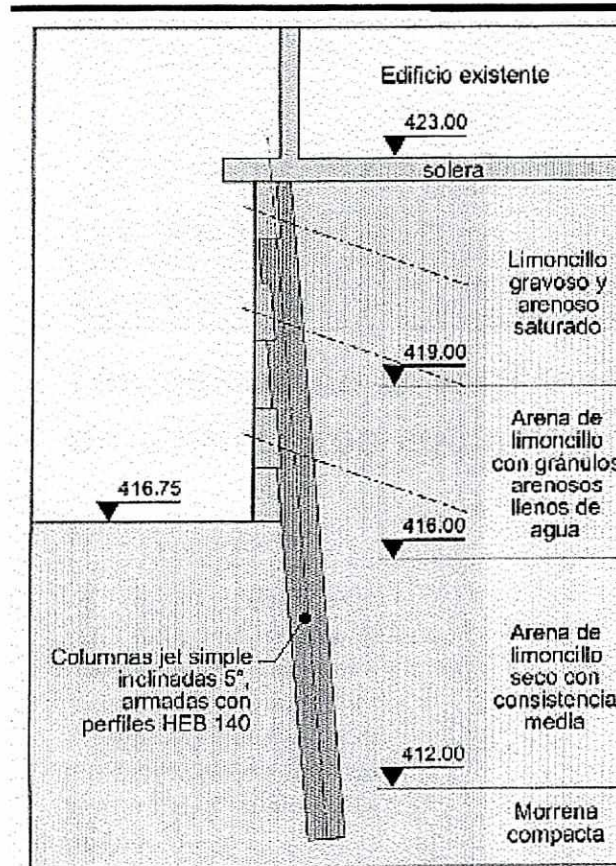
**Descripción del trabajo:** Las obras consistieron en la realización de muros de contención para el sostenimiento de una excavación, así como el recalce de los cimientos de un edificio apoyados en arenas limosas blandas con circulación de agua.

El recalce del edificio se llevó a cabo con columnas de jet simple armadas con perfiles de acero HEB 140 y tres filas de anclajes para contrarrestar el empuje del terreno. Adicionalmente, las paredes de la excavación se sostuvieron por medio un par de columnas de jet simple armadas con perfiles metálicos HEA 120 y por medio de barras de 30 mm de diámetro. Una parte de este muro de contención se realizó con columnas en “dipodos” (dos columnas inclinadas) y la otra parte con el sistema de una columna vertical y otra inclinada.

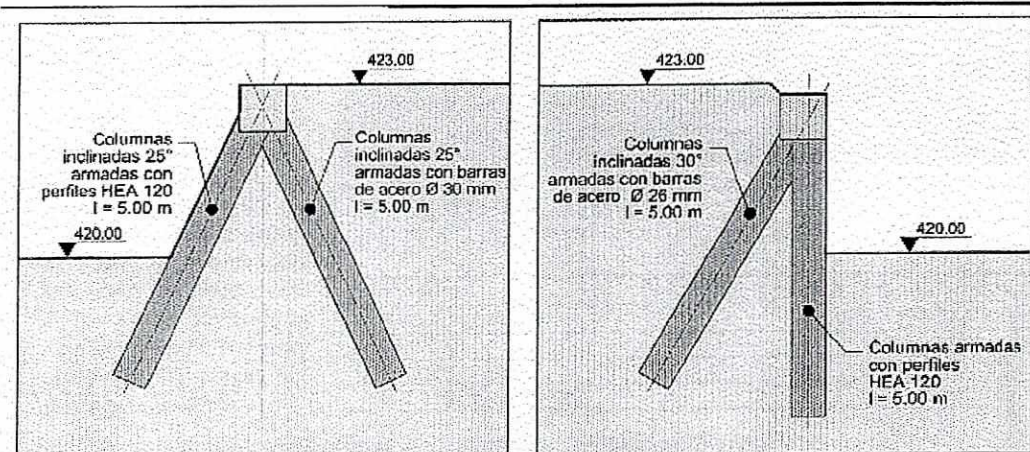
(Ver figuras de No. 27 y No. 28)

**Cantidades de obra:** 287 columnas de 60 cm de diámetro (2,300 metros lineales de perforación de jet simple). 420 metros lineales de estas columnas fueron armadas con perfiles HEA 120 y 460 metros lineales con perfiles HEB 140.

**FIGURA No. 27**  
**Esquema del recalce de los cimientos del edificio**



**FIGURA No. 28**  
**Detalles de los muros de contención por medio de columnas de jet simple**



**Nombre de la obra:** Edificio residencial y oficinas

**Lugar:** Biel, Suiza.

**Año de ejecución:** 2000 - 2001

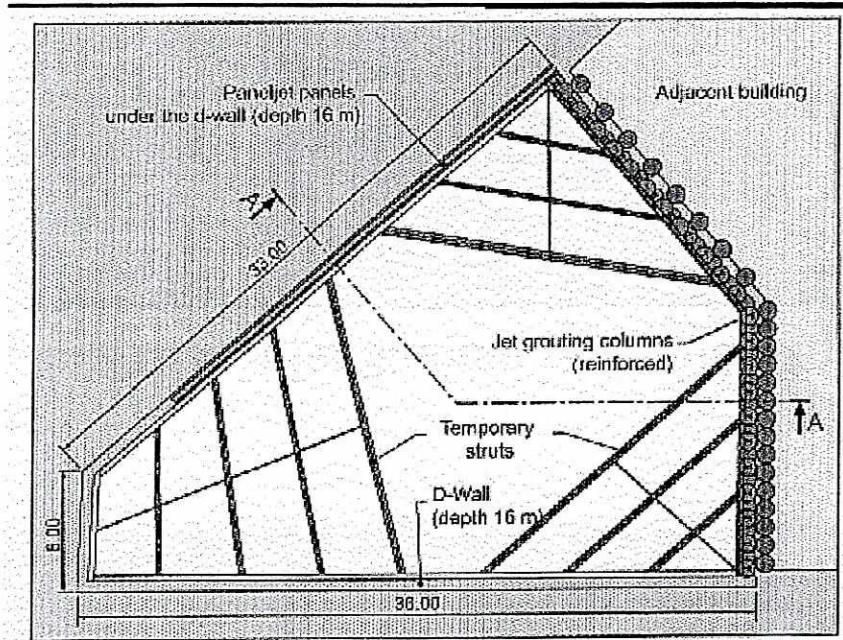
**Descripción del trabajo:** Esta obra consistió en la construcción de un edificio residencial y de oficinas que posee un sótano contiguo a edificios existentes y a la calle Morat, bajo la cual existían anclajes activos de un sistema de pantalla de contención.

El trabajo de Jet-Grouting consistió en recalzar el edificio contiguo existente por medio de una doble pantalla de columnas de un metro de diámetro. Una fila de estas columnas fue armada con perfiles metálicos. El muro que se construiría para contener el terreno colindante a la calle Murat necesitaba ser recalzado debido a que los anclajes activos existentes pasaban por debajo de la línea de construcción del muro.

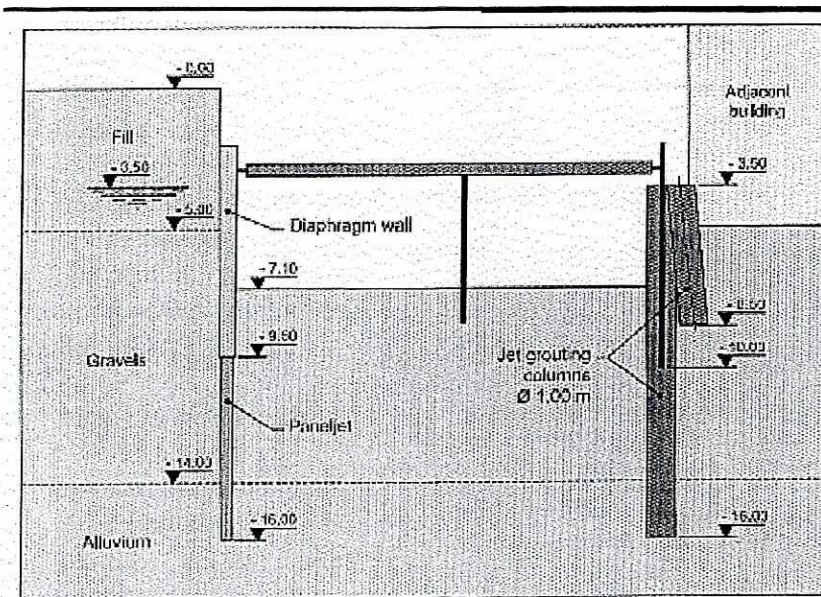
El muro fue recalzado por medio de paneles de Jet-Grouting, los cuales se construyeron con un porta-toberas de dos toberas opuestas y sin aplicar rotación a la tubería durante su extracción en la fase de inyección. (Véanse las figuras No. 29 y 30).

**Cantidades de obra:** 200 m<sup>2</sup> de muro de paneles de Jet-Grouting, 30 metros lineales de columnas armadas de un metro de diámetro y 400 m<sup>2</sup> de muro pantalla construido por columnas secantes de Jet-Grouting.

**FIGURA No. 29**  
**Planta general del proyecto**



**FIGURA No. 30**  
**Sección típica del proyecto**



## B. Recalce por incrementos de carga en los cimientos

**Nombre de la obra:** Charleroi - edificio tri postal

**Lugar:** Gare Sud, Bélgica

**Año de ejecución:** 1989

**Descripción del trabajo:** Construcción de un nuevo edificio postal, a la vecindad de los túneles de acceso a la central Charleroi, lo cual introducía niveles de carga más altos que los soportados por las capas de limo arcilloso y aluviones arena rocosos que constituían el terreno. Por lo que se estimó que ocurrirían asentamientos intolerables para la estructura.

Para transferir estas nuevas cargas a un estrato de esquisto más competente se construyeron columnas secantes de Jet-Grouting triple, de 1.00 metros de diámetro y espaciadas a 0.80 metros con respecto a sus centros, hasta una profundidad de 12 metros. Se escogió el jet tri-fluido porque presentaba al proyecto, la ventaja de la expulsión de bastante rechazo, lo cual evita que haya una elevación del terreno en la superficie que ocasionaría daños a las estructuras existentes.

**Cantidades de obra:** 81 columnas de 1.00 metros de diámetro por medio del tipo de Jet-Grouting tri-fluido.

**FIGURA No. 31**  
**Sección del proyecto**

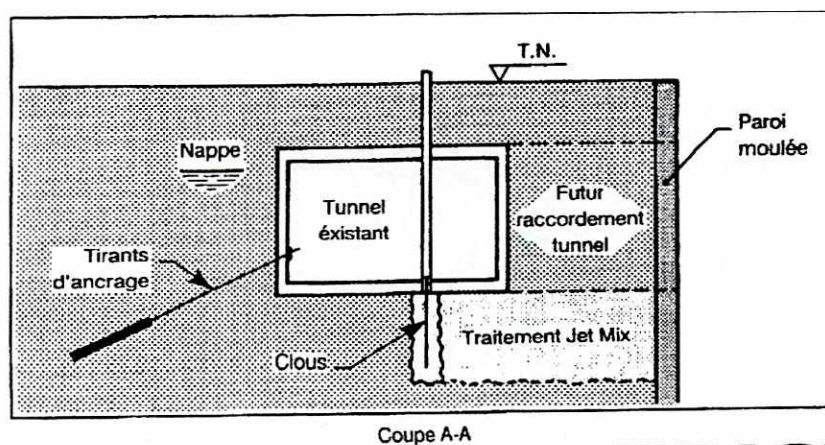
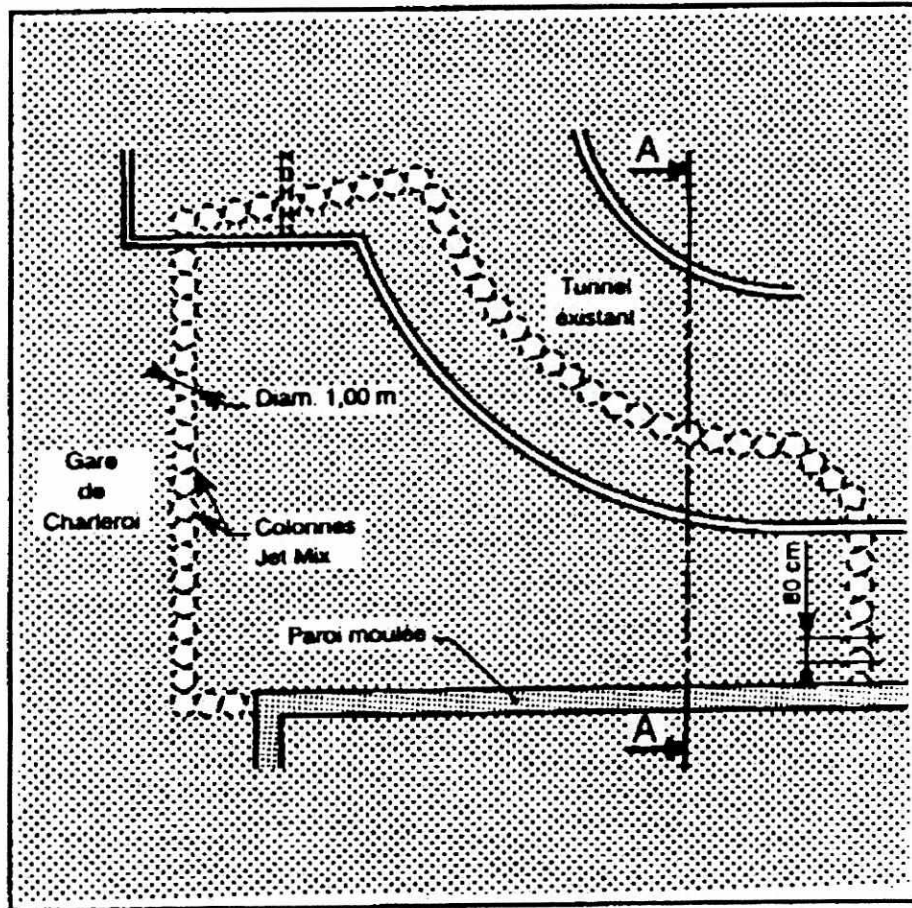


FIGURA No. 32  
Vista en planta



### C. Recalces por asentamientos de la construcción

**Nombre de la obra:** Cancha de tennis de Servas

**Lugar:** Ain, Francia

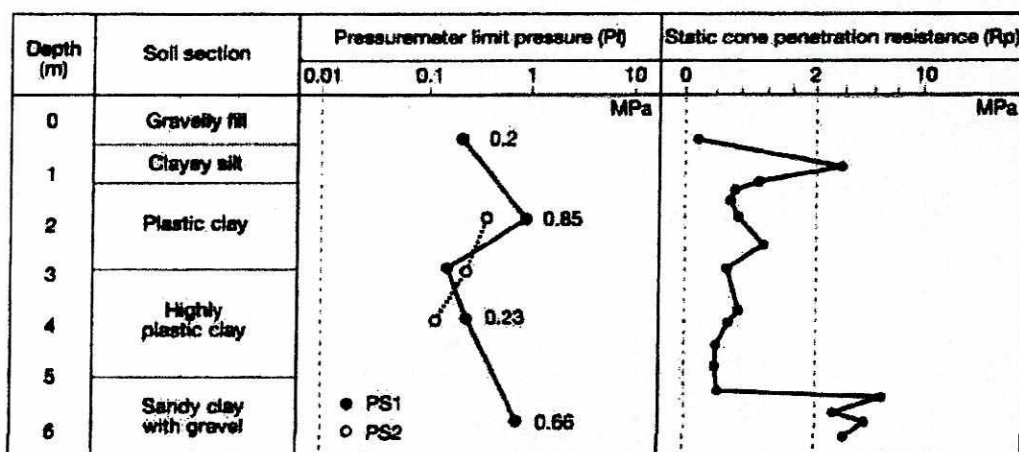
**Año de ejecución:** 1990

**Descripción del trabajo:** Después de construida la cancha de tennis de Servas se confirmó, por medio de pruebas estáticas de penetración (Figura No. 33), que las capas de suelo sobre las que se apoyaban sus cimientos se asentarían a un grado peligroso e intolerable para la estructura.

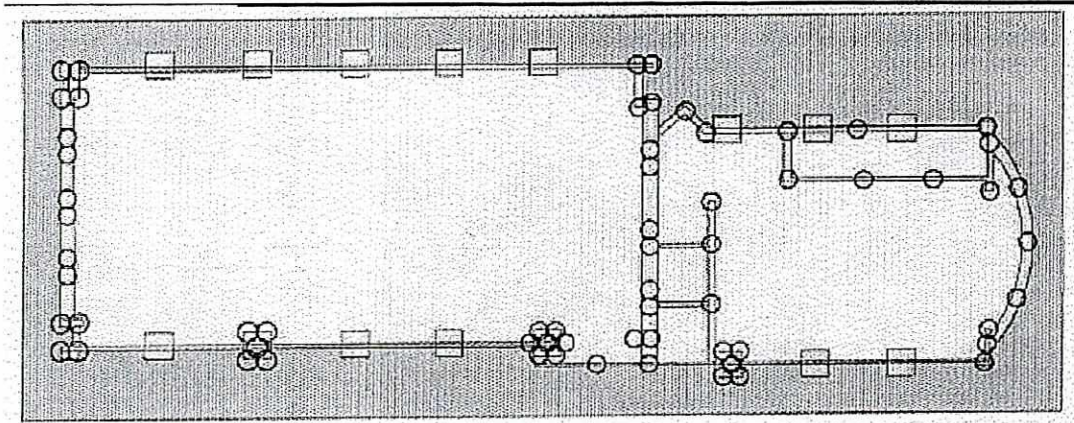
La solución fue transferir las cargas de los cimientos hasta donde el suelo tiene mejores características de capacidad portante (entre 5 y 6 metros de profundidad). (Ver figuras No. 34 y 35)

**Cantidades de obra:** 129 columnas de Jet-Grouting triple que representaron un total de 663 metros lineales.

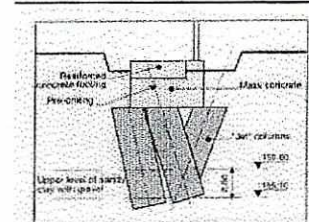
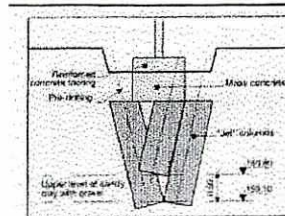
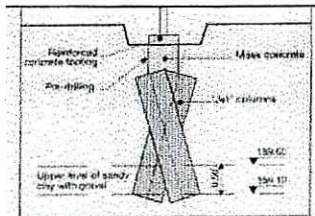
**FIGURA No. 33**  
Resultados de las pruebas de penetración estática



**FIGURA No. 34**  
**Puntos de los cimientos que necesitaban ser recalzados**



**FIGURA No. 35**  
**Detalles de los recalces practicados**



**Nombre de la obra:** Iglesia de Sissonne

**Lugar:** Sissonne, Francia

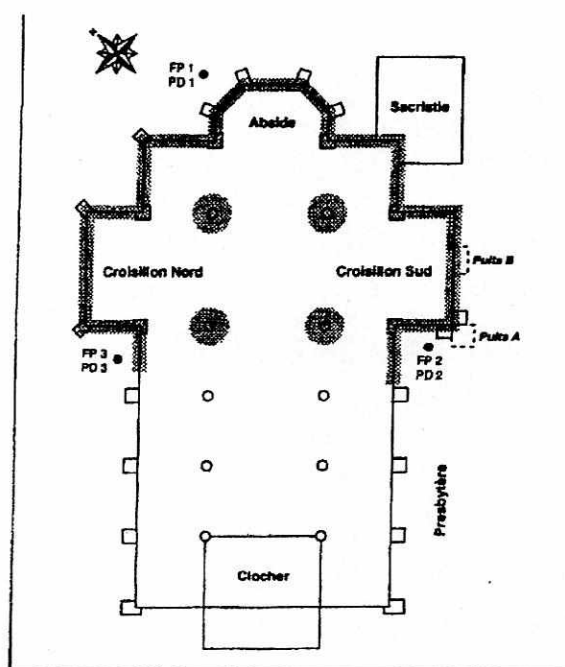
**Año de ejecución:** 1993

**Descripción del trabajo:** La antigua iglesia de Sissonne (Figura No. 36) se encontraba cimentada sobre pilotes pequeños de madera que con el tiempo fueron desintegrándose. Esta desintegración de los pilotes ocasionó que sus cimientos, constituidos por roca pobremente cementada, empezarán a ceder y que la iglesia se asentara a niveles peligrosos.

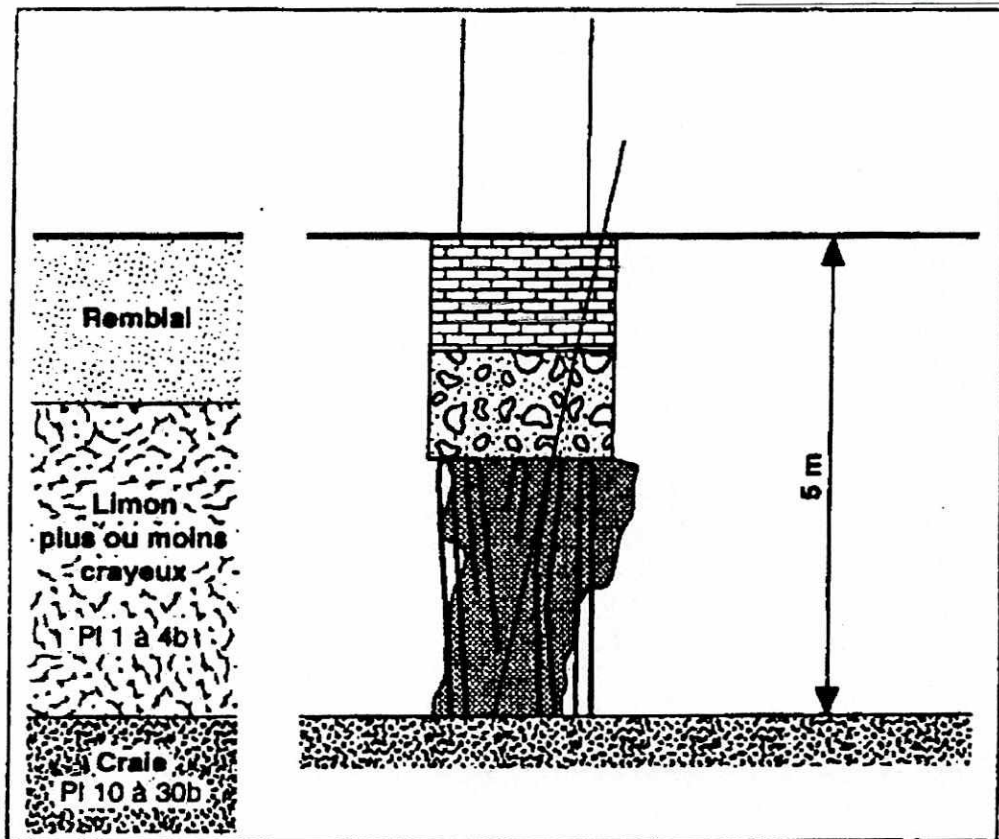
La solución que se practicó fue la construcción de columnas de jet simple para reestablecer el apoyo que daban anteriormente los pequeños pilotes de madera. La técnica de Jet-Grouting fue la más propicia, porque durante su ejecución no se indujeron al terreno ni a la estructura vibraciones que podrían haber dañado considerablemente a la iglesia. (Figura No. 37)

**Cantidades de obra:** Construcción de 52 columnas de jet simple con un diámetro aproximado de 1.00 metros.

**FIGURA No. 36**  
**Planta de la iglesia y puntos de recalce**



**FIGURA No. 37**  
**Estratigrafía del terreno y esquema del recalce**



**Nombre de la obra:** Recalce de la Línea C de la red RER de París

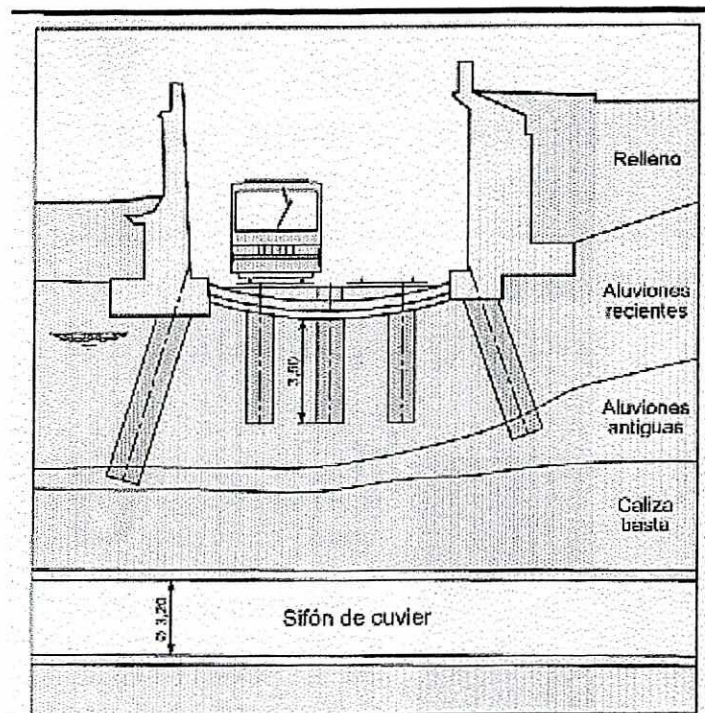
**Lugar:** París, Francia

**Año de ejecución:** 1996

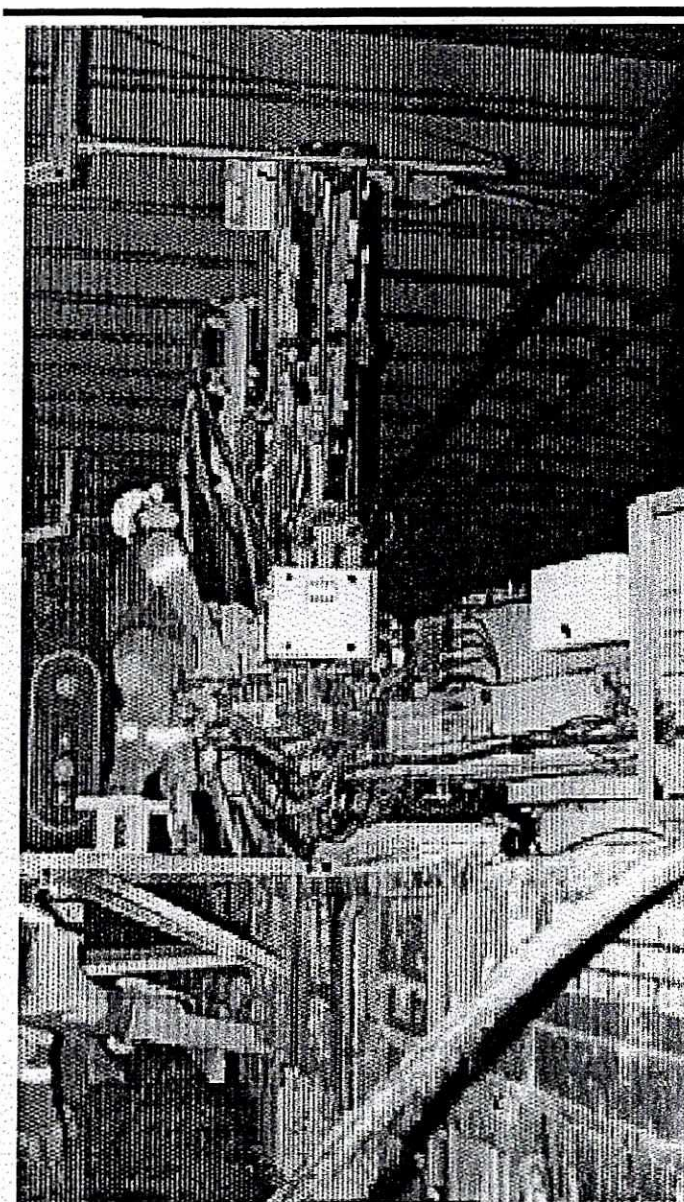
**Descripción del trabajo:** Los pilares y soleras de la línea C de la red ferroviaria RER de Francia sufrían asentamientos debidos al mal suelo de cimentación sobre el que fueron construidos (Figura No. 38). El tráfico constante y la importancia de la línea no permitían que esta línea saliera de servicio por mucho tiempo, por lo que la técnica del Jet-Grouting presentó la mejor opción por su tiempo de ejecución y versatilidad. La obra se organizó de tal manera que todos los equipos fueron montados sobre un carro de ferrocarril, el cual movilizaba la maquinaria hasta los puntos de recalce necesarios (Fotografía No. 19)

**Cantidades de obra:** 57 columnas de Jet-Grouting de diámetros variados.

**FIGURA No. 38**  
**Sección de los recalces realizados**



**FOTOGRAFÍA No. 19**  
**Fotografía del equipo montado sobre un carro de ferrocarril**



**Nombre de la obra:** Sede del BNU

**Lugar:** Lisboa, Portugal

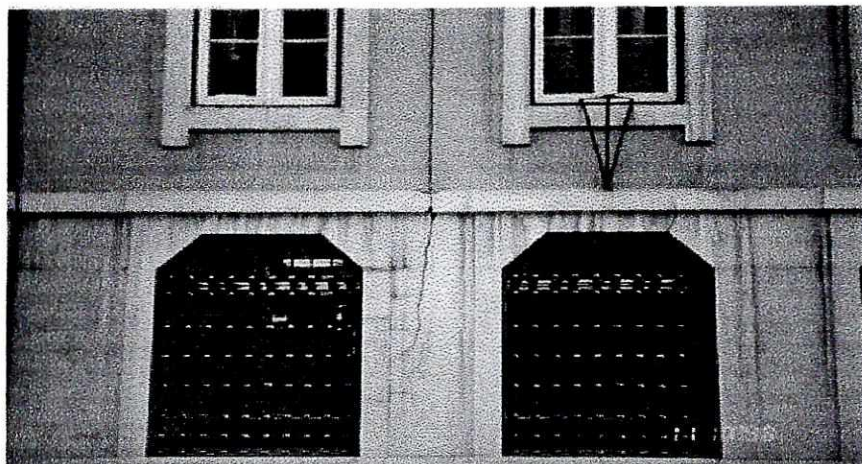
**Año de ejecución:** 1999

**Descripción del trabajo:** El edificio que sirve de sede del BNU en Lisboa contaba con un largo de 45 metros. Pero decidieron aumentar el tamaño del edificio para darle un frente de 60 metros.

La cimentación del edificio antiguo constaba de una losa apoyada sobre pilotes. Y el edificio nuevo se diseñó estructuralmente igual al viejo, salvo la cimentación, que constaba solamente en una losa de cimentación de 1.1 metros de espesor. Una mala estimación en el cálculo de la capacidad portante del terreno ocasionó que el nuevo edificio comenzara a asentarse y que se “colgara” de la vieja edificación. Por esta razón la construcción empezó a sufrir agrietamientos (Fotografía No. 20). El recalce debía efectuarse con la edificación en uso y libre de molestias, por lo que se procedió a recalzar al edificio desde afuera.

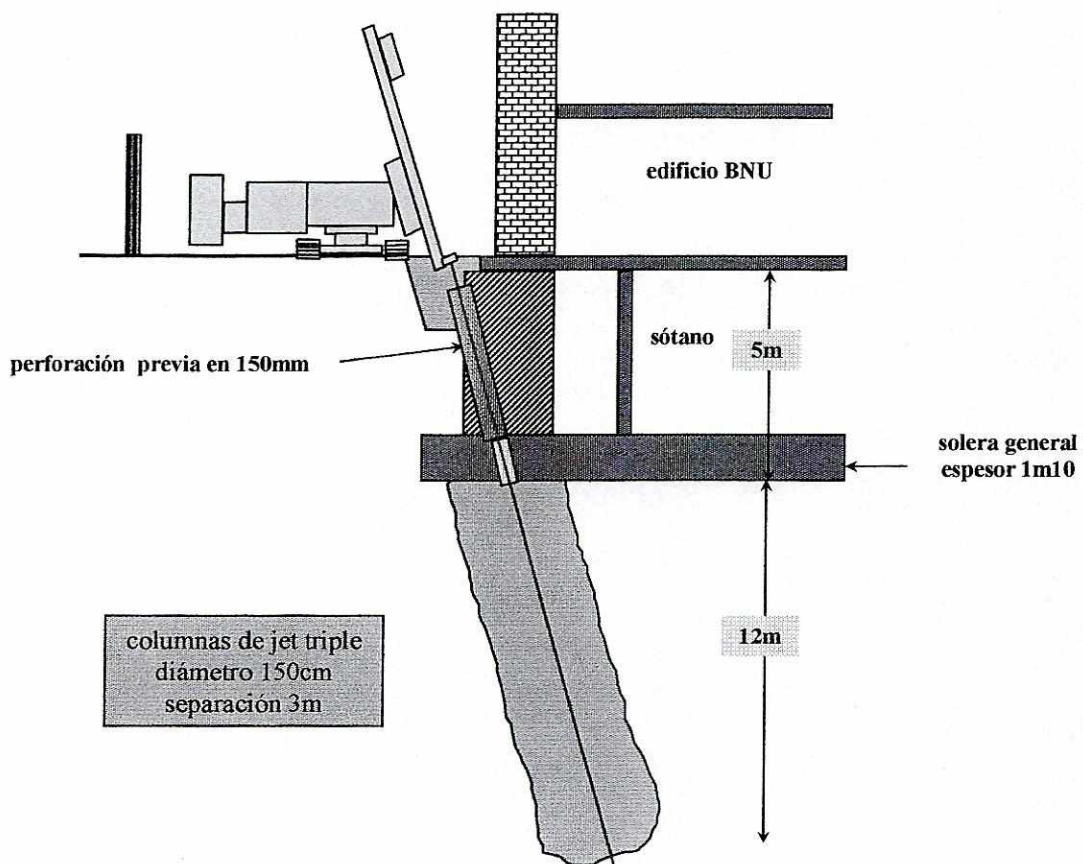
**Cantidades de obra:** Recalce por medio de columnas de triple jet en todo el perímetro del nuevo edificio. Las columnas eran de 1.5 metros de diámetro y separadas 3 metros entre centros.

**FOTOGRAFÍA No. 20**  
**Fotografía de la fachada de ambos edificios**



Se observa la grieta por la separación de ambas fachadas debido al asentamiento

**FIGURA No. 39**  
**Esquema del recalce**



## VII. CONCLUSIONES

### A. De las ventajas del Jet-Grouting

Las ventajas que presenta la técnica del Jet-Grouting frente a otras técnicas utilizadas en recalces, hacen de ella una solución muy atractiva y competitiva técnicamente. Algunas ventajas que se desprenden de lo expuesto anteriormente, son:

- El Jet-Grouting ofrece la posibilidad de determinar a priori el consumo de lechada que se empleará por metro de columna y en base al diámetro estimado. Mientras que en el resto de inyecciones en las que el producto inyectado circula a través de la red de vacíos existentes no se puede saber o determinar a priori el volumen interesado, ni su forma de reparto. Lo cual resulta en una gran indeterminación y duda acerca de los volúmenes a emplear y las zonas que podrán ser tratadas por medio de esos tratamientos de mejora del terreno.
- El producto de área por esfuerzo permisible que es el que define el tope estructural de la columna se mantiene bastante regular, a pesar que el diámetro final que se estima tendrán las columnas variará debido a los cambios en la compacidad y cohesión del suelo a tratar. Debe considerarse que cuando el suelo es más blando, mayor será el área tratada (o el volumen), y la resistencia del suelo cemento conseguido será algo más baja.
- La técnica del Jet-Grouting no se ve limitada por la granulometría del terreno, la permeabilidad de éste. Y tampoco depende de la compatibilidad de las sustancias del agente cementante que se utilizan con el tamaño de los vacíos del suelo, lo cual sí es importante cuando la lechada debe desplazarse a través de la red que forman los huecos en el terreno. El jet está basado únicamente en la capacidad de erosión de un chorro de fluido que rompe la estructura del suelo. Además, por no depender de la granulometría del suelo a tratar, no se

distintas fases de inyección por medio de manguitos para evitar que la lechada de inyección recorra distancias tan grandes, que abandone la zona objetivo del tratamiento (como en el caso de la inyección repetitiva selectiva).

- La capacidad de erosión del chorro de alta velocidad que se emplea en el Jet-Grouting permite que la adherencia entre las columnas de jet y pilotes, o entre columnas de jet y pantallas de concreto proyectado o lanzado, o bien, entre otras columnas de jet sea prácticamente perfecta. Esta erosión simula un efecto de picado de la superficie del elemento “viejo”, y crea una superficie rugosa de tal forma, que la limitación mecánica responde únicamente a las limitaciones propias del material. Esta ventaja se convierte en un aspecto muy importante, ya que se puede combinar la técnica del Jet-Grouting con las demás técnicas de construcción sin temer una rotura entre ambos elementos en la superficie de contacto.
- La combinación de una perforación de pequeño diámetro con la inyección a velocidades del orden de minutos por metro, además del ágil desplazamiento del equipo de perforación e inyección entre columnas, dan a la técnica rendimientos industriales muy elevados y atractivos para proyectos con plazos de ejecución comprometedores.
- El Jet-Grouting proporciona una alta relación de radio de columnas a radio de perforación, lo cual es muy adecuado cuando se realizan tratamientos profundos en los que hay que atravesar longitudes importantes de suelo sin que interese tratar los niveles superiores. Un ejemplo de esto último es el caso de tratamientos del suelo bajo puntas de pilotes realizados previamente, y que tienen capacidades portantes insuficientes. O bien, es igual de ventajosa la técnica cuando se realizan tratamientos bajo espesores significativos de capas de rocas o conglomerados, en los que atravesar con un pilote tradicional o con elementos de pantalla se torna en procesos muy costosos por su gran diámetro.

- La carencia de un refuerzo de acero en las columnas de jet, más el elevado contenido de cemento en una lechada de agua y cemento (que brindan una alta impermeabilidad) hacen muy durables a las columnas en medios acuosos y agresivos. Y todo esto se logra sin agregar agentes químicos que pueden no cumplir con las más estrictas regulaciones sobre conservación del medio ambiente.
- La similitud de la maquinaria de ejecución de anclajes y micropilotes con la requerida en proyectos de Jet-Grouting, permite adaptar a las primeras para ser utilizados en los segundos, o viceversa. Esto permite que el equipo no sea dedicado exclusivamente a la actividad del Jet-Grouting, lo cual presenta una gran ventaja frente a la maquinaria pesada necesaria para la ejecución de pilotes y pantallas, que no tienen tanta versatilidad. Además la maquinaria es más pequeña, requiere de plataformas de trabajo mucho más reducidas y tiene capacidad de moverse en pasillos.
- En lo que se refiere a transporte y almacenamiento de materiales, se tiene una gran comodidad en los casos en que se utiliza agua y cemento para la fabricación de la lechada de inyección. Estos materiales son fáciles de almacenar en silos verticales u horizontales y a una distancia razonable fuera del área del proyecto sin estorbar o en sitios reducidos donde no pueden entrar los camiones de concreto.
- Los dispositivos de unión o complejos armados para unir las columnas de jet con las zapatas recalzadas no son necesarios en los proyectos practicados con Jet-Grouting. Esto se debe a la alta relación de diámetro de la columna al radio de la perforación, ya que el agujero que se le practica a la zapata será muy inferior al tamaño final de la columna de Jet-Grouting que se consigue.

## **B. De las desventajas del Jet-Grouting**

El Jet-Grouting tiene bastantes ventajas, sin embargo, también cuenta con limitaciones que pueden llegar a ser tan restrictivas como para descartar su aplicación en casos de recalces. Estas limitaciones son, entre otras:

- El Jet-Grouting, por ser una técnica de inyección in situ, es susceptible a los flujos de agua subterránea, ya que hasta que no se produce el fraguado de la lechada del agente cementante, ésta es indefensa frente a la acción de flujos de agua que pueden provocar un “lavado” total o parcial de las zonas del suelo tratado. Si la lechada de inyección se “lava” el tratamiento será prácticamente nulo y hasta perjudicial, debido a que al romper la estructura del suelo la cohesión que poseía disminuye o se anula.
- La presencia de grandes huecos dentro del terreno, en combinación con granulometrías de suelo muy abiertas, hacen potencialmente propensa a la técnica a ser ineficaz, ya que es posible que el terreno no tenga capacidad de retener la lechada inyectada, quedando el terreno como si no se hubiese inyectado.
- El Jet-Grouting es muy susceptible al efecto “sombra”, el cual se produce cuando se encuentra un bolo de relativamente gran tamaño a una distancia cercana a la tobera. Este bolo intercepta el chorro del fluido total o parcialmente, creando una “sombra” de inyección detrás de él y habiendo entonces una reducción considerable del diámetro de la columna esperada. De esto se desprende que cuando se trabaja en terrenos constituidos por aluviones, es más seguro recurrir a realizar mayor número de columnas pequeñas en lugar de pocas y grandes.
- Al rechazo debe facilitársele un camino expedito hacia afuera de la perforación, de lo contrario puede ocasionar un levantamiento del terreno en

la superficie. Esto se debe al incremento de presiones internas dentro del terreno y/o debido a los desplazamientos de volumen que conlleva la técnica del Jet-Grouting.

- La variación de la resistencia a la compresión simple entre terrenos tratados con Jet-Grouting se debe a que la calidad del material inyectado está condicionada por la naturaleza del suelo. Esta variación crea una gran indeterminación a la hora del diseño y de la implementación de un factor de seguridad lógico.
- La necesidad de trabajar con altas presiones y caudales durante la ejecución de columnas de jet conlleva una utilización de materiales de alta calidad que serán sometidos a un desgaste muy rápido. Esto resulta en un período muy corto de la vida útil de los accesorios auxiliares y de los consumibles.
- La calidad del producto final se torna poco confiable cuando no hay conocimiento preciso del terreno y de sus variaciones. Esto se debe a la dependencia de la naturaleza del suelo. Cuando se da este caso es necesario efectuar pruebas post-ejecución que generalmente son estadísticamente insuficientes, como lo son la toma de muestras o testigos de los núcleos de una columna.
- Durante la investigación bibliográfica no se encontró una normativa que guíe o norme la aplicación de esta técnica. Existen únicamente estándares de calidad que deben cumplir los distintos materiales o sustancias que se utilizan en la técnica. Por lo que la práctica y metodología de ejecución del Jet-Grouting es responsabilidad de las empresas que la aplican.

#### **D. De la aplicación del Jet-Grouting como una solución de recalces**

Según lo arriba expuesto, el Jet-Grouting es una solución técnicamente factible en aquellos casos en los que aumentar la capacidad de valor soporte del terreno de fundación, la eliminación o disminución de su tendencia a asentarse por nuevas cargas, o bien, en los proyectos en los que las cargas deben de ser transmitidas a estratos de suelo más profundos y competentes sin tener que cambiar o reforzar los elementos estructurales de una edificación.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Ahn, T. *et al.* 1998. <<Maintenance of the leakage for the underground structure by Grouting>>. Ponencia de 2<sup>nd</sup> International Conference on GROUND IMPROVEMENT TECHNIQUES: 8-9 October 1998 (Pre-Conference international symposium on Jet Grouting : 7 October 1998), Singapore.
- Andrus, R. y Riley Chung. 1995. <<Ground improvement techniques for liquefaction remediation near existing lifelines>>. Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, Estados Unidos de América. 82 págs.
- Bielza, Ana. 1999. *Manual de técnicas de tratamiento del terreno*. Madrid, U.D. Proyectos E.T.S. Minas – UPM. 432 págs.
- Biosca, Ferrán. 1999. *Aplicaciones del Jet-Grouting en la mejora de suelos*. Madrid, Rodio Cimentaciones Especiales S.A. 22 págs.
- Celma, José. 1993. <<Parámetros de tratamiento del Jet Grouting>>. *Revista Ingeniería Civil*. (91):43-47.
- Fang, Y. y F. Yu. 1998. <<Engineering properties of jet-grouted soilcrete and slime>>. Ponencia de 2<sup>nd</sup> International Conference on GROUND IMPROVEMENT TECHNIQUES: 8-9 October 1998 (Pre-Conference international symposium on Jet Grouting : 7 October 1998), Singapore.
- Estudios de costos de obras de jet*. 2000. Soletanche-Bachy. Nanterre, Francia. 115 pág.
- Groppo, P y G. Sembenelli. 1999. <<Deep Jet-Grouted cut-offs in riverine alluvia for ERTAN cofferdams>>. *Revista Journal of geotechnical and geoenvironmental Engineering*. 125 (2): 142-153.

Ho, C; Tan C. y Lim C. 1998. <<Fan shaped jet grout strut for improved excavation support>>. Ponencia de 2<sup>nd</sup> International Conference on GROUND IMPROVEMENT TECHNIQUES: 8-9 October 1998 (Pre-Conference international symposium on Jet Grouting : 7 October 1998), Singapore.

<<In-situ Ground Reinforcement>>. 1987. *Soil Improvement. A ten year update*. Estados Unidos de América, ASCE Geotechnical Special Publications. Págs 43-57.

Jameson, R.; G. Pellegrino y M. Shea. 1998. <<Instrumentation for performance monitoring of jet grouting>>. Ponencia de 2<sup>nd</sup> International Conference on GROUND IMPROVEMENT TECHNIQUES: 8-9 October 1998 (Pre-Conference international symposium on Jet Grouting : 7 October 1998), Singapore.

Jardine, R. y J. Standing. 1998. <<Geotechnics in the new millennium. Predictions competition information pack>>. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College. Londres, Inglaterra. 43 págs.

*Jet Grouting. Tecnología y experiencia*. Base de datos de Soletanche-Bachy. Nanterre, Francia.

Lloret, A. *et al.* 1992. <<Pruebas de carga horizontal de columnas de suelo tratado mediante Jet-Grouting>>. *Revista Ingeniería Civil*. (83): 33-39

Morey, J. y Campo D. 1996. <<Quality control of jet grouting on the Cairo metro>>. Base de datos de Soletanche-Bachy. 11 págs.

Nicholson, Meter. 1998. <<Cement soil mixing in soft ground>>. Artículo de University of Houston. 3 págs.

Parker, E. *et al.* 1999. <<Jet Grouting to improve offshore pile capacity: GOPAL Project>>. Ponencia en 1999 Offshore Technology Conference, Houston Texas, 3-6 May 1999. 6 págs.

Sopeña, Luis. 2002. << Jet-Grouting>>. *Módulo de refuerzo del terreno*. Master en Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cimentaciones. Madrid, CEDEX. 46 págs.

Wang, J. *et al.* 1998. << Studies on soil disturbance caused by grouting in treating marine clay>> Ponencia de 2<sup>nd</sup> International Conference on GROUND IMPROVEMENT TECHNIQUES: 8-9 October 1998 (Pre-Conference international symposium on Jet Grouting : 7 October 1998), Singapore.

## **IX. APÉNDICE**

### **A. RENDIMIENTOS Y PRODUCCIÓN DE RECHAZO**

En este apartado se presentan cuadros de rendimientos de ejecución de columnas de Jet-Grouting, consumos de cemento estimado, criterios para valorar sobre consumos de cemento indicativos y las producciones de rechazo que se pueden obtener en proyectos de Jet-Grouting. Adicionalmente se muestra un par de gráficas comparativas de la resistencia a la compresión simple de las columnas de suelo tratado versus el consumo de cemento entre el tipo de Jet-Grouting simple y el Jet doble.

En cada cuadro que aquí se expone, se hace una comparación entre los dos tipos de Jet-Grouting más comunes de encontrar en proyectos de Europa (Jet simple y doble). Y a manera de establecer un rango estimado de estos rendimientos, consumos y producciones de rechazo se evalúan dos casos extremos: un caso de fácil ejecución contra un caso de difícil ejecución. La descripción de estos es:

- Caso sin dificultad de ejecución: perforación y ejecución de columnas de Jet-Grouting a cielo abierto y verticales.
- Caso con dificultades en su ejecución: perforación y ejecución de columnas en galerías de túneles subterráneos e inclinados con respecto a la vertical.

Toda la información vertida en estos cuadros ha proporcionada por la empresa Soletanche-Bachy, que cuenta con una gran experiencia en la ejecución de proyectos con Jet-Grouting .

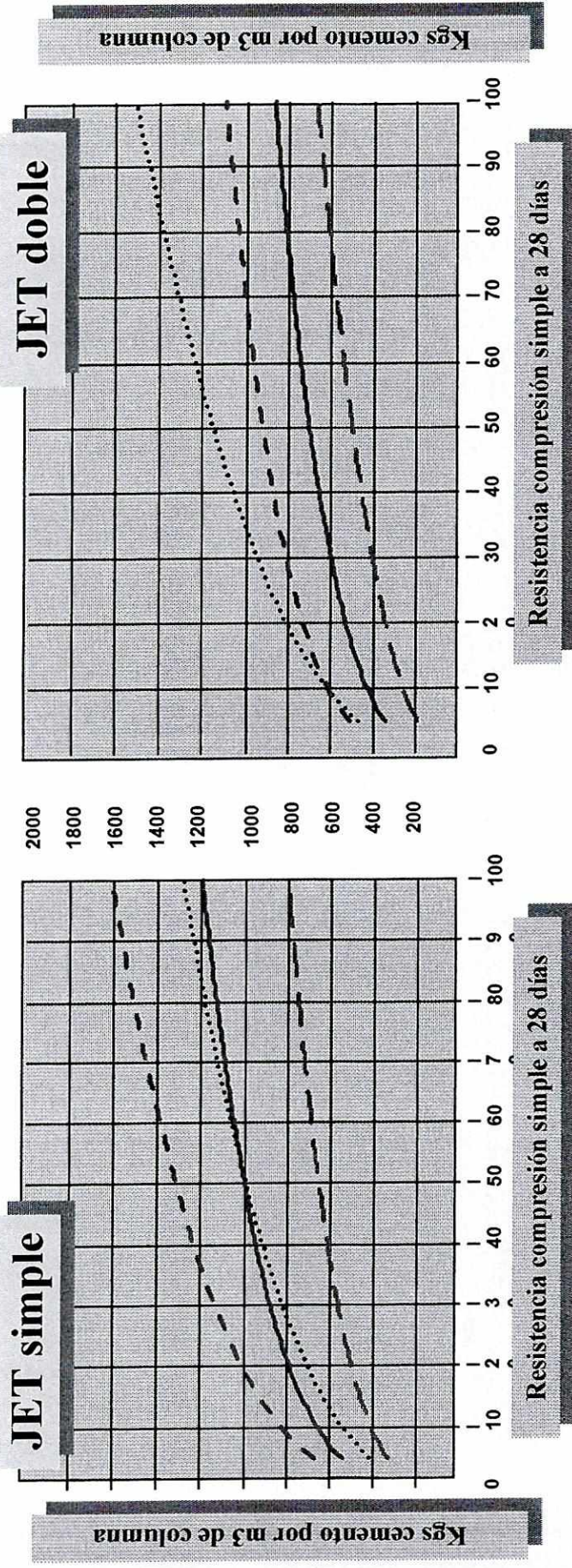
## CUADRO DE CÁLCULO DE RENDIMIENTO APROXIMADO PARA PROYECTOS DE JET-GROUTING

		Unidad	Ejecución de columnas verticales y en terreno fácil		Ejecución de columnas en galerías y en terreno difícil	
			Jet simple	Jet doble	Jet simple	Jet doble
Datos del proyecto	Profundidad de perforación	metros	15	15	10	15
	Diámetro de columna	centímetros	80	120	80	120
	Altura de columna	metros	12	12	4	4
	Altura del mástil	metros	10	10	2	2
	Longitud de barras	metros	2	2	1	1
Tiempos	Emplazamiento	minutos	10	15	15	20
	Arreglo del mástil	minutos	5	5	10	10
	Velocidad de perforación	minutos/metro	0.5	1	1	1.5
Tiempos Fase de perforación	Tiempo de perforación	minutos	7.5	15	10	22.5
	Tiempo de cambio de barras	minutos/cambio	0.5	1	0.5	1
	Número de cambios	Unidad	2	2	9	9
	Tiempo de cambio de barras	minutos	1	2	4.5	9
Tiempos Fase de ejecución del Jet-Grouting	Puesta de presión	minutos	3	5	3	5
	velocidad de ascenso	minutos/metro	3	3	6	6
	Tiempo ejecución de Jet	minutos	36	36	24	24
Tiempo fase de desarmado y limpieza	Tiempo de cambio de barras	minutos/cambio	1	2	1	2
	número de cambios	Unidad	1	1	9	9
	Tiempo de cambio de barras	minutos	1	2	9	18
	Limpieza de monitor	minutos	3	5	3	5
<b>Total de tiempo en ejecución de columna</b>	<b>Tiempo total</b>	<b>minutos</b>	<b>66.5</b>	<b>85</b>	<b>78.5</b>	<b>113.5</b>
Tiempo de imprevistos	Coefficiente de fallas	porcentaje	15%	25%	20%	30%
<b>Tiempo estimado de ejecución de columnas</b>	<b>Tiempo por columna</b>	<b>minutos</b>	<b>76</b>	<b>106</b>	<b>94</b>	<b>148</b>
Tiempo efectivo de trabajo por turno	Duración del turno	horas / minutos	8 / 480	8 / 480	8 / 480	8 / 480
	Tiempo de limpieza	minutos	60	60	60	60
	Tiempo efectivo	minutos	420	420	420	420
Rendimientos	Columnas por turno	unidad	5.5	4	4.5	2.8
	Metros de Jet / turno	metros	66	47	18	11
	Metros cúbicos / turno	metros cúbicos	33	54	9	13

**CUADRO DE CÁLCULO DE CONSUMO  
DE CEMENTO ESTIMADO**

Datos del proyecto	Profundidad de perforación	Unidad	Ejecución de columnas al aire libre y en terreno fácil		Ejecución de columnas en galerías y en terreno difícil	
			Jet simple	Jet doble	Jet simple	Jet doble
	Diámetro de columna	metros	15	15	10	15
	Altura de columna	centímetros	80	120	80	120
	Velocidad de perforación	metros	12	12	4	4
Parámetros y tiempos de ejecución	Velocidad de perforación	minutos/metro	0.5	1	1	1.5
	Tiempo de perforación	minutos	7.5	15	10	22.5
	Caudal de perforación	litros/minuto	120	120	120	120
	Lechada de perforación	metros cúbicos	0.9	1.8	1.2	2.7
	Velocidad de ascenso	minutos/metro	3	3	6	6
	Tiempo de ejecución de jet	minutos	36	36	24	24
	Caudal durante la ejecución de jet	litros/minuto	200	200	200	200
	Lechada del jet	metros cúbicos	7.2	7.2	4.8	4.8
	Lechada por columna	metros cúbicos	8.1	9	6	7.5
	Sobre consumo de lechada	porcentaje	15%	20%	30%	40%
<b>Total de lechada</b>	<b>Total de lechada/columna</b>	<b>metros cúbicos</b>	<b>9.3</b>	<b>10.8</b>	<b>7.8</b>	<b>10.5</b>
Dosificación de mezcla	Dosificación	Kgs/metro cúbico	700	600	700	600
	<b>Cemento por columna</b>	<b>toneladas</b>	<b>6.5</b>	<b>6.5</b>	<b>5.5</b>	<b>6.3</b>
Consumos	Kgs de cemento / m de jet	Kgs/metro	540	540	1375	1575
	Kgs de cemento / m <sup>3</sup> de jet	Kgs/metro cúbico	1100	500	2800	1400

**GRÁFICAS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE  
A LOS 28 DÍAS VERSUS CONSUMO DE CEMENTO  
SEGÚN EL TIPO DE JET-GROUTING**



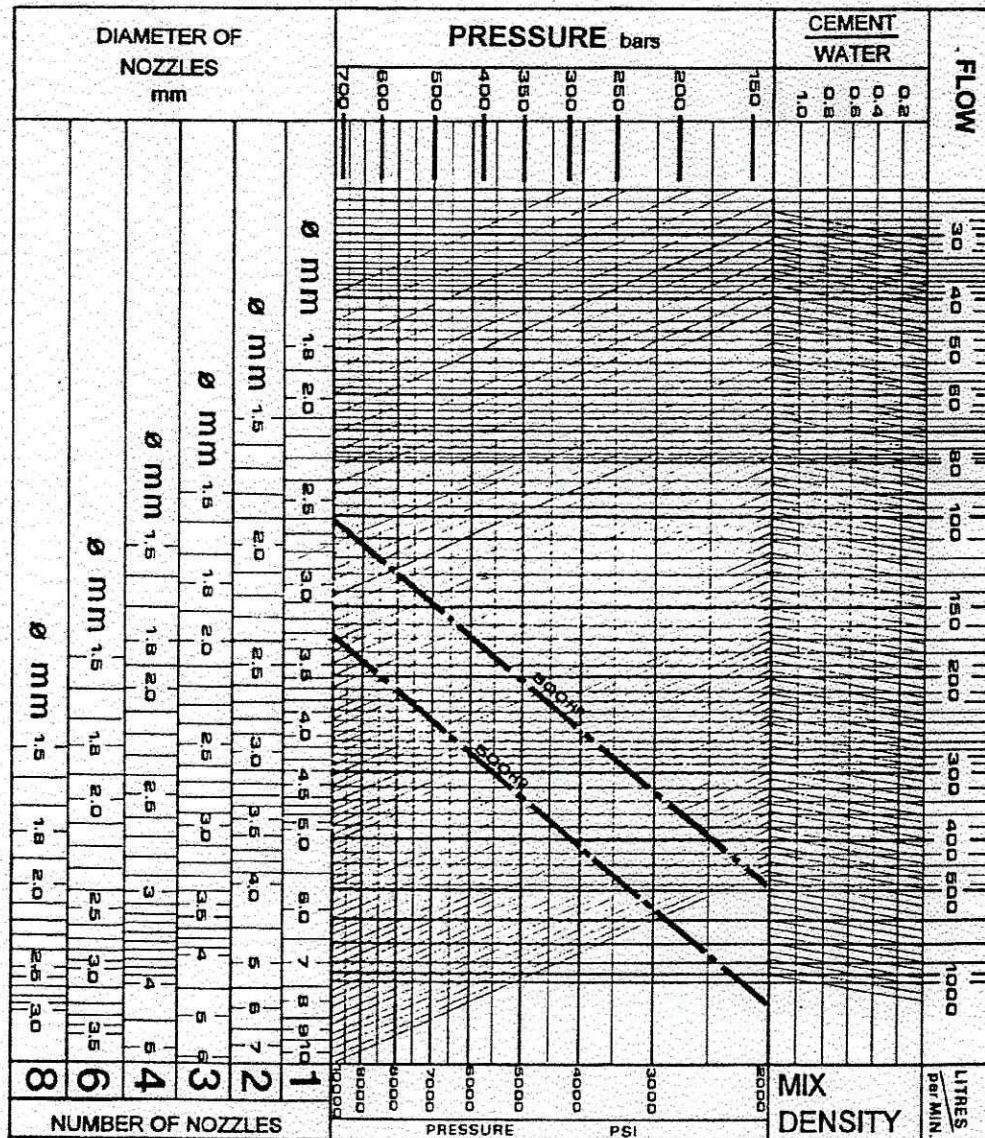
**CRITERIO DE VALORACIÓN DE SOBRE CONSUMO DE CEMENTO EN PROYECTOS DE JET-GROUTING**

JET SIMPLE		Corte barras	
Tiempo jet / columna	No	Si	
> 2 horas	5%	15%	
entre 1 y 2 horas	10%	20%	
entre 0,5 y 1 hora	15%	25%	
< 0,5 hora	20%	30%	

**JET DOBLE = +25% JET SIMPLE**

La siguiente gráfica relaciona el diámetro y cantidad de toberas con la presión de inyección de distintas lechadas de agua-cemento para determinar el caudal que será necesario aportar en el proyecto.

**GRÁFICA DEL CAUDAL DE LA LECHADA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE TOBERAS, SU DIÁMETRO Y LA PRESIÓN DE INYECCIÓN**



## CUADRO DE CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE RECHAZO

Datos del proyecto	Unidad	Ejecución de columnas al aire libre y en terreno fácil		Ejecución de columnas en galerías y en terreno difícil	
		Jet simple	Jet doble	Jet simple	Jet doble
Profundidad de perforación	metros	15	15	10	15
Diámetro de columna	centímetros	80	120	80	120
Altura de columna	metros	12	12	4	4
Velocidad de perforación	minutos/metro	0.5	1	1	1.5
Tiempo de perforación	minutos	7.5	15	10	22.5
Caudal de perforación	litros/minuto	120	120	120	120
Lechada de perforación	metros cúbicos	0.9	1.8	1.2	2.7
Velocidad de ascenso	minutos/metro	3	3	6	6
Tiempo de ejecución del jet	minutos	36	36	24	24
Caudal para ejecución de jet	litros/minuto	200	200	200	200
Lechada para jet	metros cúbicos	7.2	7.2	4.8	4.8
Lechada por columna de jet	metros cúbicos	8.1	9	6	7.5
Sobre consumo	porcentaje	15%	20%	30%	40%
<b>Total lechada</b>	<b>metros cúbicos</b>	<b>9.3</b>	<b>10.8</b>	<b>7.8</b>	<b>10.5</b>
Agua de dilución	litros/minuto	20	50	20	200
Agua de dilución / columna	metros cúbicos	0.7	1.8	0.5	4.8
<b>Total de rechazo</b>	<b>metros cúbicos</b>	<b>10</b>	<b>12.6</b>	<b>8.3</b>	<b>15.3</b>
Sub producción	porcentaje	-50%	-50%	0%	0%
<b>Totales de evacuación</b>	<b>Evacuación de rechazo/columna</b>	<b>5</b>	<b>6.3</b>	<b>8.3</b>	<b>15.3</b>
	<b>Litros de rechazo por metro de jet</b>	<b>416</b>	<b>525</b>	<b>2075</b>	<b>3825</b>
	<b>m<sup>3</sup> de rechazo / m<sup>3</sup> de jet</b>	<b>0.8</b>	<b>0.5</b>	<b>4.2</b>	<b>3.5</b>

## CUADROS DE PRODUCCIÓN DE RECHAZO TÍPICAS

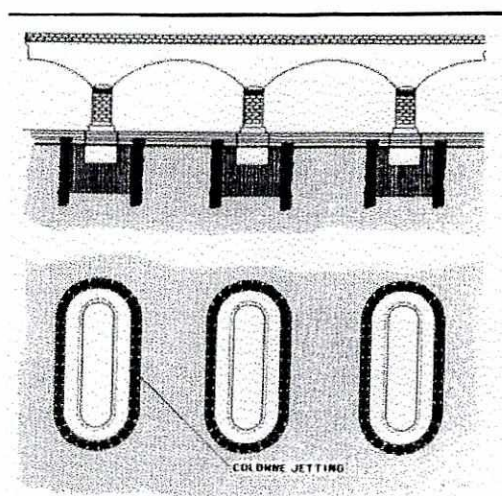
m3 rechazo / m3 columna	jet simple	jet doble
arena suelta	0,7	0,5
arena densa	1,4	0,8
arcilla blanda	0,8	1,0
arcilla plástica	1,6	1,2
relacionado con los parámetros de jet		
relacionado con los consumos de lechada		
multiplicar por 0,7 en caso de uso de cemento de alta resistencia y aplicando los mismos porcentajes que para los sobre consumos de cemento		
estos porcentajes resultan de fenómenos de dilución o de decantación		
aplicar al final las sobre (o sub) producciones siguientes		
columnas aisladas en arenas		- 50%
columnas solapadas en arenas		- 25%
arcillas blandas, jet simple		+ 10%
arcillas plásticas, jet simple		+ 20%
arcillas blandas, jet doble		+ 25%
arcillas plásticas, jet doble		+ 50%

## **B. OTRAS APLICACIONES DEL JET-GROUTING**

En esta sección se muestran algunas aplicaciones de Jet-Grouting distintas a los casos de recalce, y que aparecen en actividades comúnmente relacionadas con situaciones en las que se requiere mejorar zonas de suelo, cuyas características no cumplen con las necesidades del proyecto.

- 1. Barreras de protección contra la erosión de pilas de puentes sobre ríos o prevención de socavación de sus cimientos.**

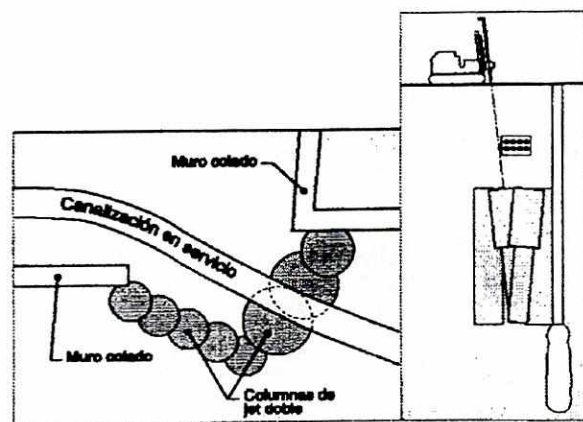
Columnas de Jet-Grouting alrededor de las pilas de un puente



(Biosca, 1999)

2. Consolidación del terreno bajo líneas de servicio, así como mejoramiento de suelos con peligro de licuefacción bajo estas líneas.

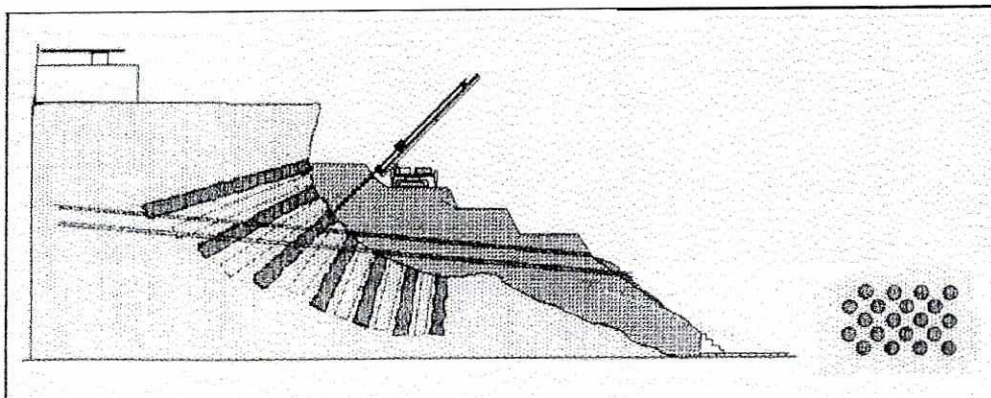
### Consolidación del terreno



(Soletanche-Bachy)

3. Estabilización de cortes y taludes

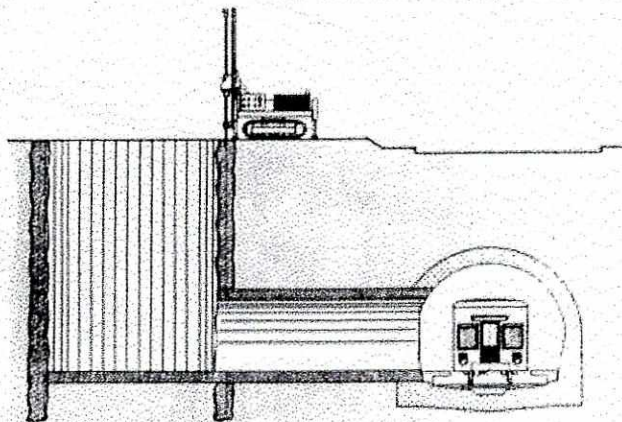
Ejecución de columnas de jet que trabajan bajo esfuerzos cortantes



(Soletanche-Bachy)

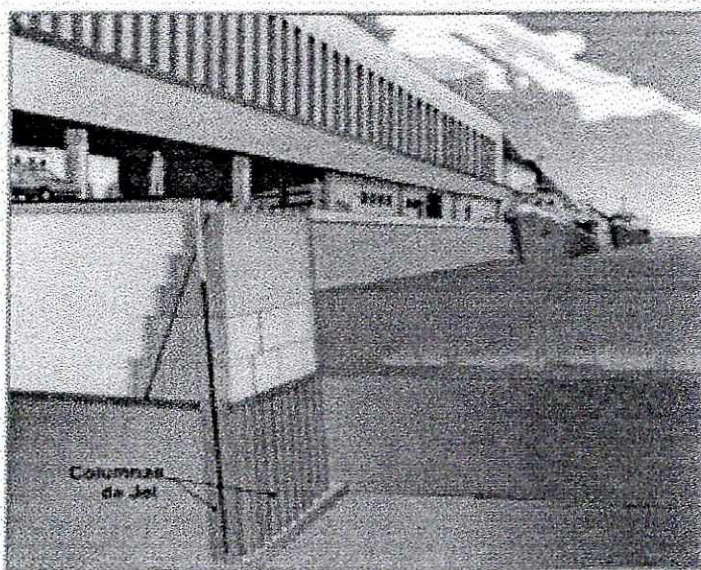
### Estabilización de paredes de corte

---



(Soletanche-Bachy)

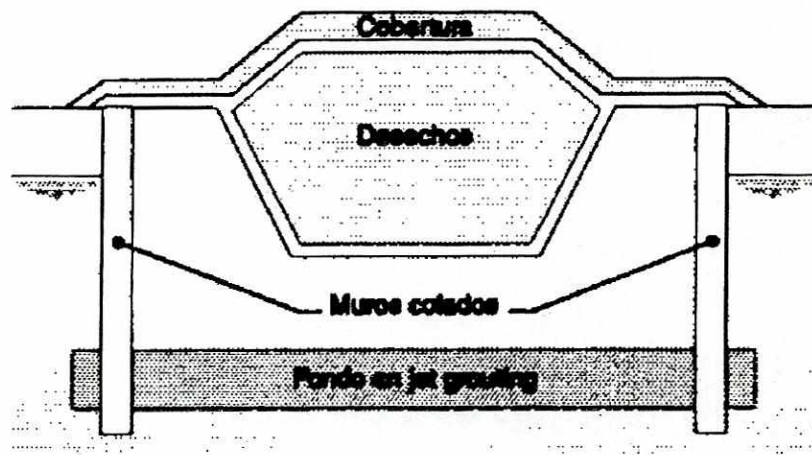
### Estabilización de muros en muelles de puertos



(Soletanche-Bachy)

#### 4. Creación de macizos impermeables en el fondo de vertederos

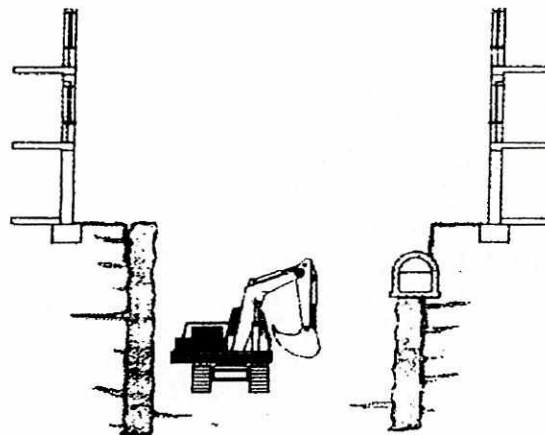
Losa maciza impermeable



(Soletanche-Bachy)

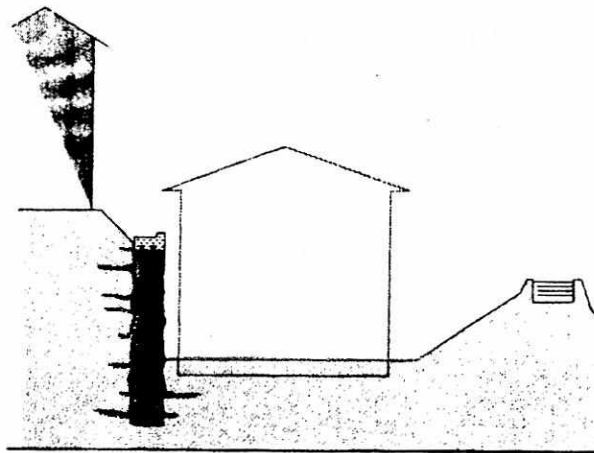
#### 5. Muros de contención y pantallas ancladas

Muros de contención en cortes no profundos



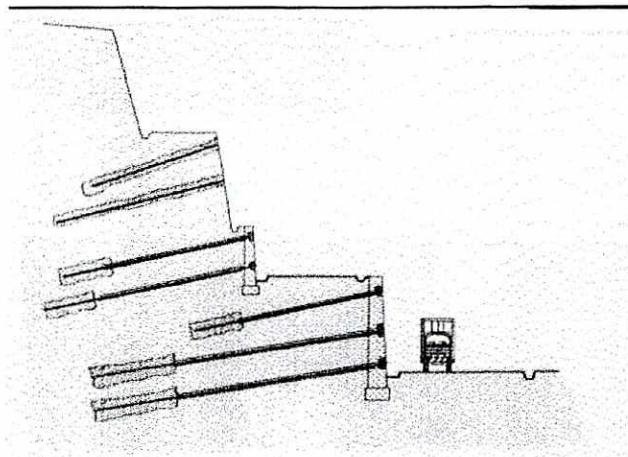
(Biosca, 1999)

### Muros de contención por gravedad



(Biosca, 1999)

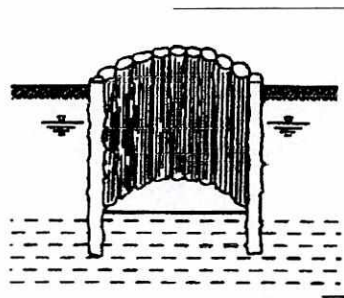
### Ejecución de bulbos de anclajes



(Biosca, 1999)

## 6. Paredes o pantallas impermeables creadas bajo niveles freáticos para excavación de pozos

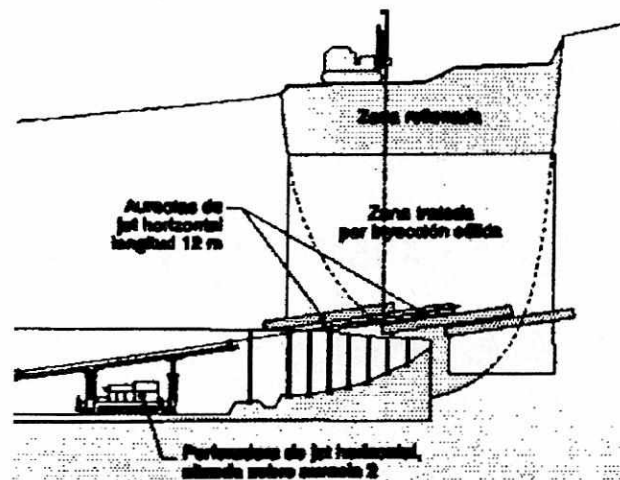
Sección de un pozo creado con columnas de Jet-Grouting



(Soletanche-Bachy)

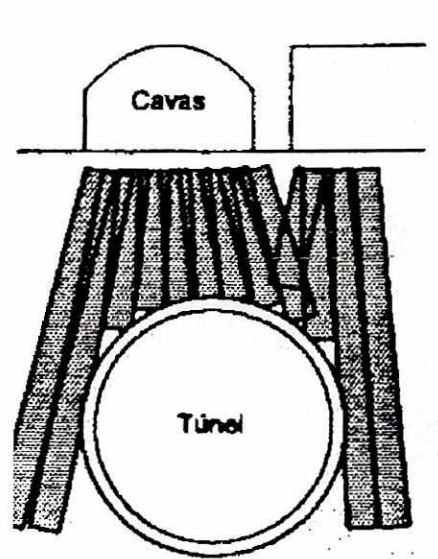
## 7. Paraguas para sostenimiento de túneles

Construcción de túneles



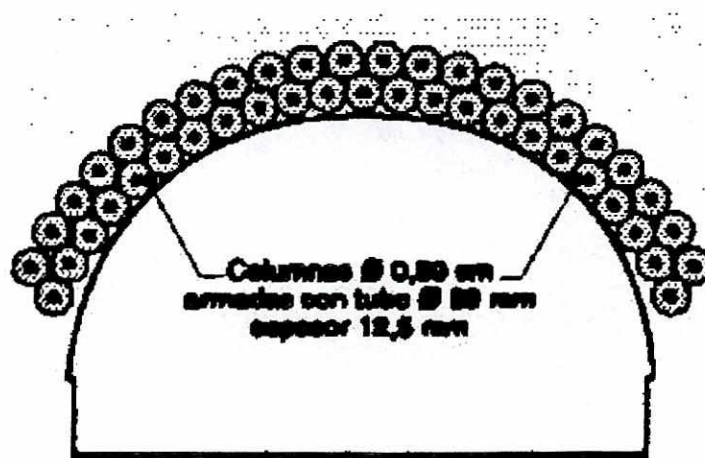
(Soletanche-Bachy)

Prevención de asentamientos en superficie por la construcción de túnel



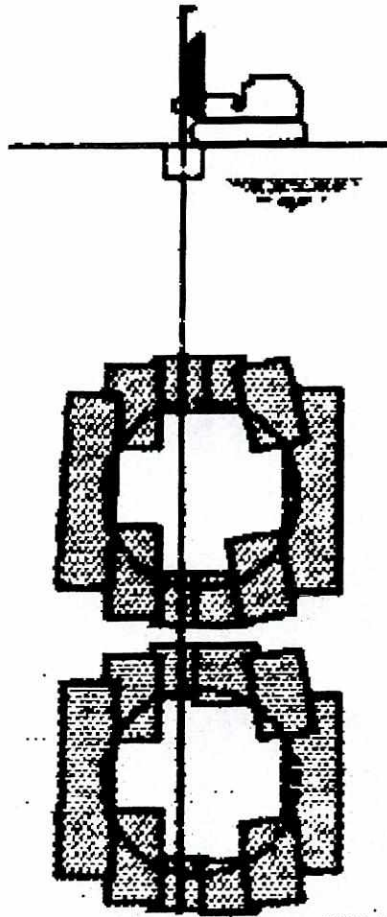
(Biosca, 1999)

Sección del paraguas de un túnel



(Soletanche-Bachy)

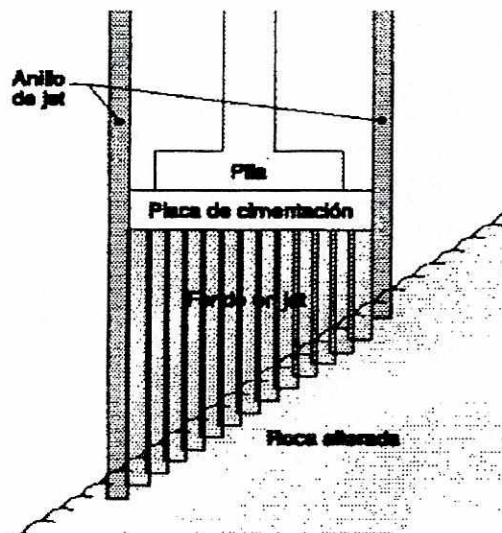
## Estabilización de las paredes de túneles



(Soletanche-Bachy)

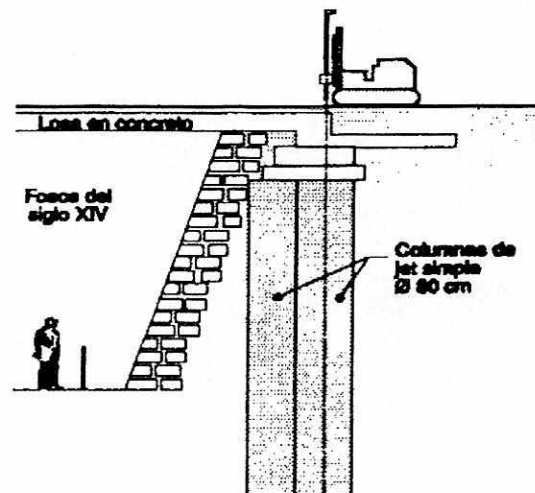
## 8. Pilotes de fundación en laderas o cerca de monumentos antiguos

Pilotes de cimentación en Puente Cuscatlán – El Salvador



(Soletanche-Bachy)

Pilotes para losa de concreto en el Museo de Louvre - Francia



(Soletanche-Bachy)