

JET GROUTING

Juan Manuel Fernández Vincent
Ingeniero Civil

RESUMEN

Este artículo describe la técnica del Jet Grouting, el cual constituye un método de mejora del terreno en el cual se inyecta un fluido mediante el empleo de una alta energía que rompe la estructura del terreno para luego mezclarse con el mismo y formar un suelo mejorado. Se presentan lineamientos de diseño y ejecución mediante esta técnica.

ABSTRACT

This paper describes the Jet grouting, it is a ground improvement method in which a fluid is injected with the aid of a high energy, the structure of the soil is broken and then it forms a mix that makes an improved soil. Design and execution guides are presented.

Palabras clave: jet grouting, superjet grouting, mejora del terreno, inyecciones, diseño.

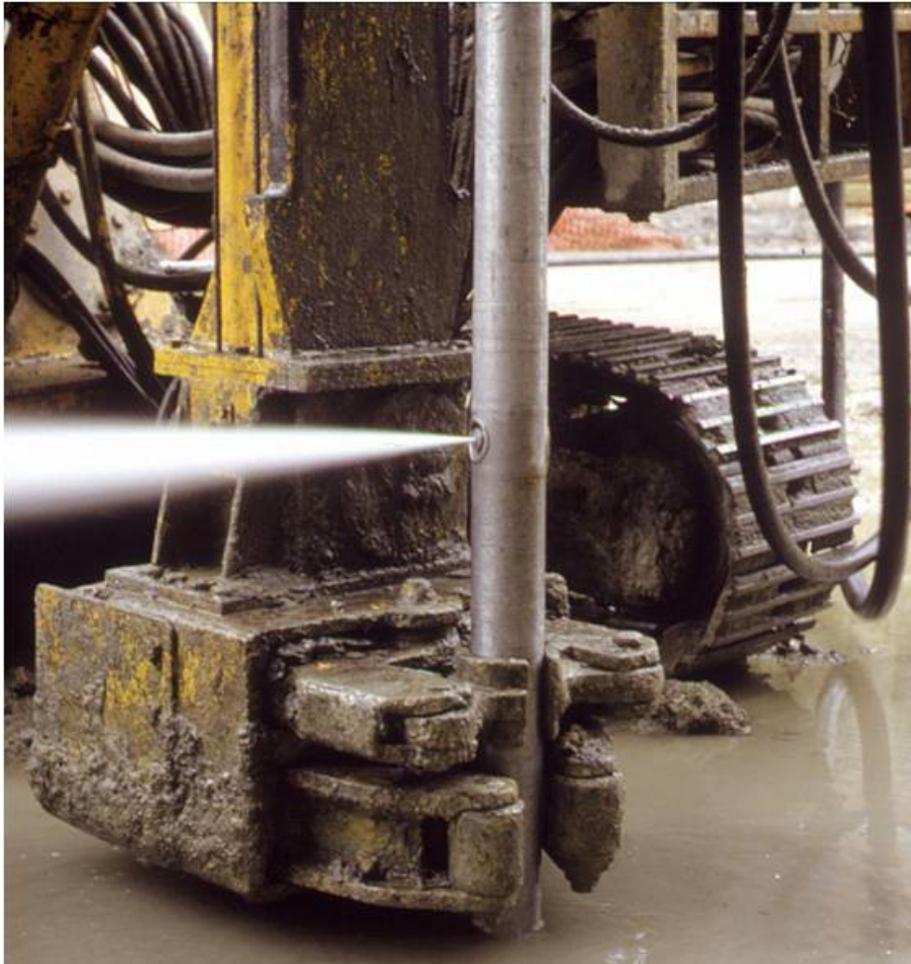


Figura 1: Jet de agua saliendo por la tobera del monitor de Superjet grouting

INDICE

1. INTRODUCCION.
2. SISTEMAS DE JET GROUTING
3. DESCRIPCION DEL METODO
4. DISEÑO – PROPIEDADES DEL SUELO TRATADO
5. PROCEDIMIENTOS DE CONTROL
6. APLICACIONES
7. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

1. INTRODUCCION

El Jet-Grouting es una tecnología que utiliza la inyección radial de fluidos, a muy alta velocidad, para desagregar (erosionar) el terreno, sustituyendo parcialmente el material erosionado y mezclándolo con un agente de cementación para formar un nuevo material.

La aplicación de esta técnica, tan versátil, nos permite introducir en el terreno nuevos materiales en la forma de columnas enteras o truncadas, que consiguen mejorar las características geotécnicas resistentes de la zona tratada, reducir su deformabilidad, o disminuir su permeabilidad. Sus aplicaciones se han extendido a una gran variedad de trabajos que incluyen: cimentaciones, recalces, soporte de excavaciones, mejoras del terreno, obras auxiliares para la construcción de túneles, estabilización de laderas, control del agua freática, etc.

Es una de las tecnologías más demandantes de los sistemas de mejora, requiriendo excelencia técnica en el diseño y la construcción por parte de especialistas.

Las ventajas de aplicación de esta técnica radican en su aplicabilidad a casi todos los tipos de suelos; tratamientos particularizados o a estratos de suelos específicos; utiliza componentes inertes; su ejecución es sin vibraciones; puede evitar instalaciones enterradas; y la posibilidad de trabajar con limitaciones de espacio.



Figura 2

2. SISTEMAS DE JET-GROUTING

Hay tres sistemas tradicionales de jet grouting. La selección del sistema más apropiado es una función del suelo a tratar, la aplicación, y las propiedades del suelo tratado para el fin deseado. Sin embargo, cualquier sistema puede ser utilizado en casi todas las aplicaciones si el diseño y la ejecución son congruentes con el sistema elegido.

Monofluido: La inyección de lechada de cemento es bombeada por el varillaje y sale por la tobera horizontal del monitor con una alta velocidad (aprox. 200 m/seg). Esta energía causa la erosión, disgregación, mezcla y desplazamiento del suelo. Este sistema es el más antiguo y simplificado. Se pueden emplear varias toberas.

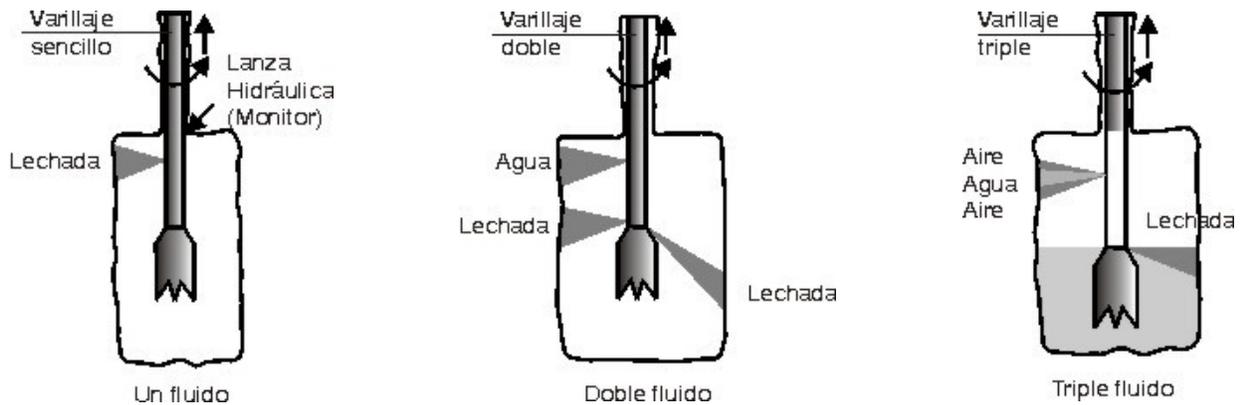


Figura 3: Sistemas Estándar de Jet-Grouting

Doble fluido (agua): un varillaje interno de dos fases es empleado para separar la provisión de agua y lechada de cemento a dos toberas desplazadas verticalmente del suelo. La disgregación del terreno se realiza con agua a alta presión por la tobera superior y la inyección de relleno de lechada por la tobera inferior.

Triple fluido: lechada, aire y agua son bombeadas a través de diferentes líneas al monitor inferior. Agua a alta velocidad envuelta en un chorro de aire forman el medio erosivo. La lechada sale a una velocidad menor por una tobera separada, debajo del jet de erosión. Esto separa el proceso de erosión del proceso de inyección.

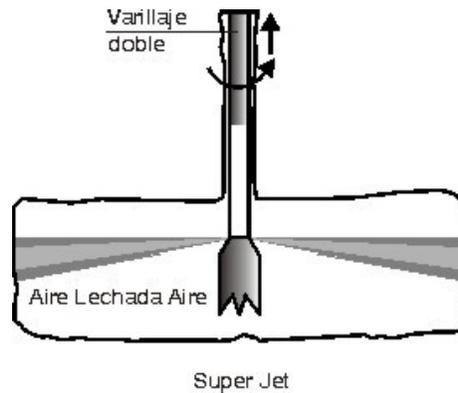


Figura 4: Sistema de Superjet-Grouting

SuperJet (doble fluido, aire): este sistema utiliza la base de un sistema de doble fluido (aire+lechada), pero con un monitor altamente sofisticado, especialmente diseñado para gobernar y focalizar de una manera precisa la energía de la materia inyectada. La lechada es empleada para erosionar y mezclarse con el suelo. El aire envuelve el jet de lechada para incrementar la eficacia de la erosión. Valiéndose de una baja velocidad de rotación y ascenso, se alcanzan grandes diámetros de columnas de suelo tratado ⁽¹⁾.

3. DESCRIPCION DEL METODO

El procedimiento de ejecución comienza con la realización de una perforación en el terreno hasta la profundidad requerida, que permite que el útil de inyección acceda al lugar deseado del tratamiento. A continuación se inicia la inyección para poder formar el cuerpo de suelo tratado, mediante el desplazamiento vertical del monitor (la cabeza de inyección) y aplicando simultáneamente rotación.

El jet rompe el terreno que es desplazando parcialmente hacia el exterior por el espacio anular que queda disponible entre el varillaje y la perforación. La holgura entre el monitor y las paredes de la perforación es de vital importancia para el tratamiento pues si se obtura este camino el recinto perforado entrará en carga y podrá producirse una fracturación. La inyección de cemento se mezcla con el terreno y también parte de la misma es expulsada. Todo el material expulsado a la superficie constituye el material de resurgencia.

El monitor se extrae con una velocidad de ascenso y una velocidad de rotación por lo que las formas constructivas habituales son "columnas". También se puede programar el equipo para realizar otras formas o porciones de la columna (restringiendo la rotación entre ciertos rangos) o como paneles (ascenso casi sin rotación). Se comprende que, ejerciendo una acción constante con el jet (chorro), la respuesta del

terreno es variable según la resistencia que oponga al mismo, y por ello el tamaño y forma del cuerpo tratado obtenido mostrará oscilaciones en dimensiones, configuración, etc., en función del tipo de suelo encontrado.

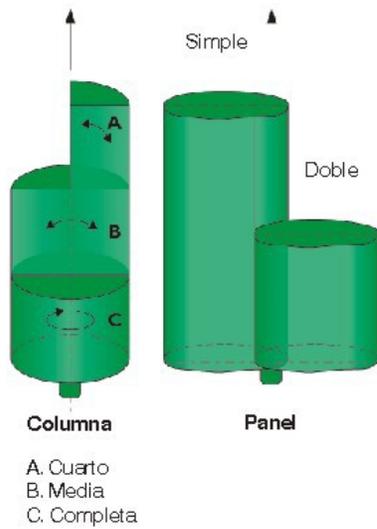


Figura 5: Formas constructivas

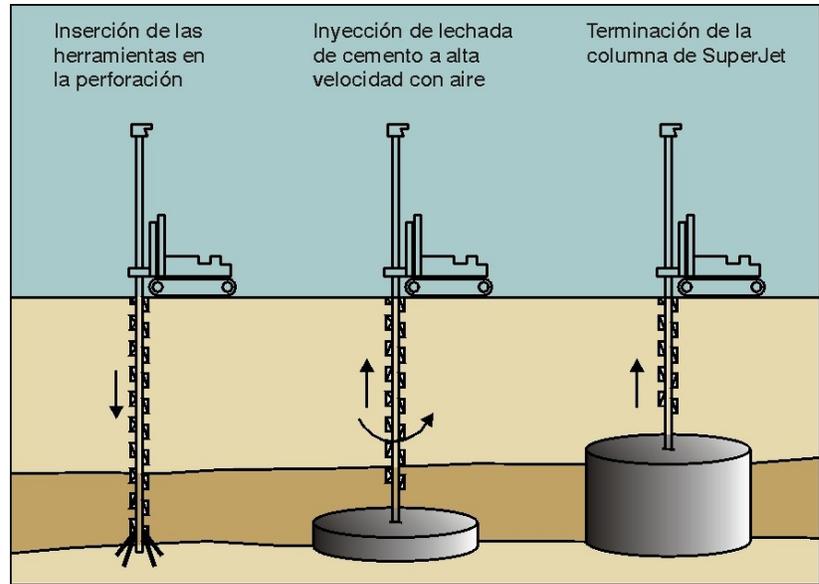


Figura 6: Proceso de ejecución de SuperJet-Grouting.

Hay dos formas de ascenso del monitor, una en forma discontinua con etapas de permanencia en cada escalón de ascenso y otra continua formando, en conjunto con la rotación, un espiral.

Las instalaciones para el equipamiento consisten habitualmente en: silos de cemento, plantas automáticas (batch plants), especialmente diseñadas para facilitar una mezcla vigorosa de las partículas coloidales, con proporciones exactas y con una producción suficiente (hasta 30 m³/hora), bombas hidráulicas capaces de suministrar los fluidos en los volúmenes y presiones apropiados, perforadora hidráulica, varillaje y herramientas adecuadas tanto de perforación como de inyección, mangueras de alta presión, etc.

El método de perforación se elige de acuerdo a las condiciones del terreno, los rasgos característicos del sitio de la obra, y las especificaciones de diseño con relación a la longitud e inclinación de inyección. Los diámetros más habituales del varillaje del tratamiento oscilan entre los 60 y los 114 mm, y los de los útiles de perforación entre 90 y 150 mm.

Parámetros de trabajo	Monofluido	Doble fluido (aire)	Doble fluido (agua)	Triple fluido	SuperJet
Presión de la lechada (MPa)	30-50	30-50	> 2	> 2	30-50
Caudal de la lechada (l/min)	50-450	50-450	50-200	50-200	300-450
Presión de agua (MPa)	-	-	30-60	30-60	-
Caudal de agua (l/min)	-	-	30-150	50-150	-
Presión de aire (MPa)	-	0,2-1,7	-	0,2-1,7	0,2-1,7
Caudal de aire (m ³ /min)	-	3-12	-	3-12	3-12
Toberas de corte (mm)	1,5-5	1,5-6	1,5-6	1,5-6	4-6
Toberas de relleno (mm)	-	-	4-12	4-12	-
Velocidad de ascenso (cm/min)	20-70	10-50	10-50	10-50	5-30
Velocidad de rotación (rpm)	10-30	5-20	5-20	5-20	2-15

Tabla 1

Los parámetros de trabajo utilizados por la maquinaria de jet-grouting se encuentran normalmente, comprendidos en los intervalos dados por la tabla 1⁽²⁾.



Figura 7: Ejecución una barrera hidráulica en el trasdós de un muro pantalla

4. DISEÑO – PROPIEDADES DEL SUELO TRATADO

El diseño de un tratamiento del terreno mediante la técnica de jet-grouting precisa conocer las propiedades medias del suelo-cemento de las columnas. Tanto las propiedades intrínsecas del suelo tratado, (resistencia media a tracción, compresión, cortante y módulo de deformación, y el coeficiente de permeabilidad), como las propiedades geométricas, en particular el diámetro mínimo de la columna creada. Estas propiedades se pueden obtener mediante métodos empíricos, con tablas obtenidas en tratamientos realizados en terrenos similares ó mediante columnas de prueba realizadas “in situ”, previamente al tratamiento general.

El producto que se obtiene con un tratamiento tipo jet grouting depende muchos factores, que a su vez residen tanto en los parámetros del propio sistema (tipo de jet, presión de inyección, caudal, material inyectado, velocidad de rotación y de ascensión, etc.) como del terreno (granulometría, densidad, estructura, nivel freático). Las lechadas de cemento utilizadas en las inyecciones de relleno y mezcla con el terreno habitualmente están dosificadas con una relación agua/cemento (a/c), en peso, comprendida entre 0,5 y 1,5. Se pueden emplear aditivos para reducir el contenido de agua, o para variar la viscosidad, estabilizar o aumentar la impermeabilidad de la mezcla adoptada. Además se pueden utilizar otros materiales tales como bentonita, fíller y cenizas volantes.

La resistencia a compresión simple (RCS) del jet grouting puede variar de 2 a 25 MPa, y está determinado por el contenido de cemento o cementante, la porción y tipo de suelo remanente en el suelo tratado.

La resistencia a la tracción se puede aproximar como un 10% de la RCS y la resistencia al corte como un 8% de la RCS. En la tabla 2 se dan referencias de rangos de valores del suelo tratado ⁽²⁾.

Tipo de suelo tratado	Arcilla	Arenas limosas	Arenas y gravas limpias
Resistencia a la compresión simple (RCS, MPa)	2 - 5	3 - 7	4 - 15
Módulo de deformación E (MPa) = $\alpha \cdot$ RCS (MPa)	$\alpha = 300$	$\alpha = 700$	$\alpha = 1000$

Tabla 2

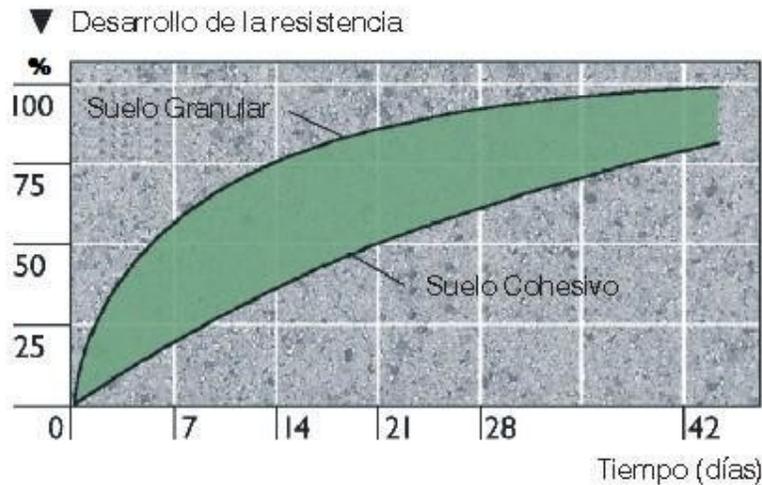


Figura 8: Desarrollo porcentual de la resistencia en el tiempo ⁽³⁾

Los valores bajos de diámetro de la tabla 3 corresponden normalmente a los suelos muy cohesivos o muy densos, y los altos a los granulares flojos ⁽²⁾.

En terrenos especiales, el diseño de la solución deberá tener en cuenta las características particulares de estos. En terrenos orgánicos baja resistencia, en bolos un efecto sombra y en suelos cementados estrechamiento del diámetro.

Tipo de Jet Grouting	Diámetro (m)	Consumo de cemento (kg/m)limosas
Monofluido	0,45 ÷ 0,80	250 ÷ 400
Doble fluido	0,60 ÷ 2,00	500 ÷ 1400
Triple fluido	1,00 ÷ 2,50	800 ÷ 1500
SuperJet	2,00 ÷ 5,00	1000 ÷ 8000

Tabla 3: Para dosificaciones de lechada a/c de 0,67 a 1

En el diseño de una barrera de impermeabilización realizada mediante columnas de jet-grouting, hay que tener en cuenta que su misión fundamental es limitar el paso de agua a través suyo y disminuir los arrastres del terreno.

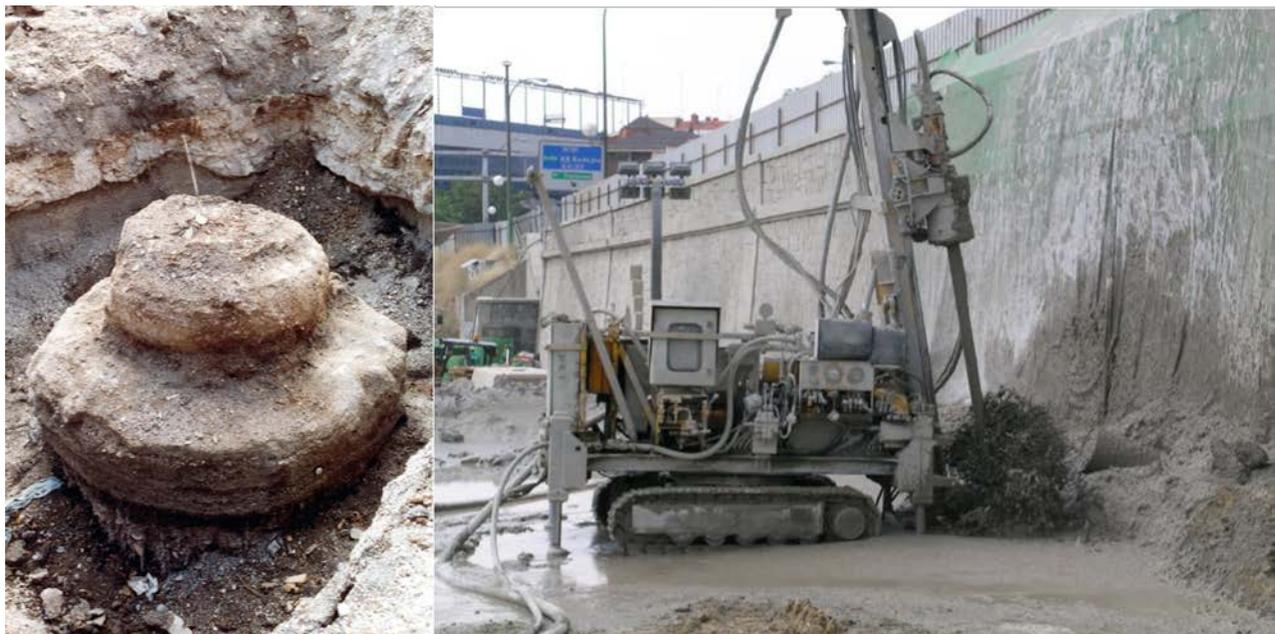


Figura 9: Estrangulamiento por cambio de suelo. **Figura 10:** Resurgencia o rechazo durante la inyección.

El proceso de diseño del tratamiento debe seleccionar el tipo de sistema a emplear más adecuado al terreno existente, y a las características medias, tanto geométricas como mecánicas, buscadas del terreno tratado. También se debe evaluar las desviaciones previstas en la perforación de cada elemento, para que de acuerdo con las características geométricas de las columnas, se pueda diseñar la malla del tratamiento, para evitar zonas localizadas no tratadas. Esto conlleva a determinar solapes mínimos entre elementos. El coeficiente de permeabilidad se puede estimar entre 10^{-7} y 10^{-9} m/seg. Es importante en todo caso indicar que la permeabilidad global depende tanto de la continuidad del tratamiento como de la permeabilidad del propio suelo tratado.

5. PROCEDIMIENTOS DE CONTROL

Se deben de practicar dos tipos de controles: de ejecución y del resultado obtenido. La Norma Europea EN 12716⁽⁴⁾ detalla los procedimientos de supervisión, control y ensayo que se deben seguir.

Los procedimientos de control del tratamiento tienen por objeto comprobar que los elementos ejecutados, individual y en su conjunto, tienen las propiedades que se les solicita en el diseño, tanto durante la fase de realización, permitiendo adoptar modificaciones si se entendiera necesario, como en fase definitiva.

En los tratamientos de Jet-Grouting estos objetivos se logran controlando por una parte la ejecución del mismo, quedando registrada en los partes de trabajo de ejecución, y por otra efectuando ensayos una vez realizado, con sondeos y toma de muestras, ensayos geofísicos y ensayos de permeabilidad.



Figura 11: Campo de pruebas. Columnas de SuperJet Grouting en arcillas firmes

Para garantizar la homogeneidad en el tratamiento, según los parámetros propuestos, se hace muy recomendable la utilización de aparatos electrónicos que mediante la colocación de sensores en los distintos circuitos de fluidos, máquinas y varillaje, nos proporcione información en espacio y tiempo de los parámetros fundamentales que definen los distintos tipos de Jet.

- i. Velocidad de ascensión
- ii. Velocidad de rotación
- iii. Caudal de lechada
- iv. Presión de inyección (agua, lechada, aire)



Figura 12: Sondeo con recuperación de testigos del tratamiento. **Figura 13:** Panel de prueba -

Cuando no se disponga de experiencia comparable, y aún cuando se disponga, es conveniente que se proyecte y realice un ensayo de campo preliminar a pie de obra que se adecue a las condiciones encontradas. Esta prueba deberá abarcar todas las condiciones pertinentes probables que se puedan encontrar en el lugar de la instalación, con el fin de: permitir una selección del sistema más efectivo y de los parámetros de la inyección, verificar que los resultados están conformes a los requisitos del proyecto, que se está empleando el sistema y los parámetros de inyección adecuados.

Con relación a la mezcla de inyección se deberá determinar la densidad, la decantación, la viscosidad y el tiempo de fraguado, debiéndose, asimismo, tomar muestras con la periodicidad para la realización de ensayos de compresión simple.

En el caso de que se efectúe extracción de testigos de elementos ejecutados, ésta se deberá hacer una vez haya transcurrido un tiempo de endurecimiento suficiente. Además, se deberá prestar especial cuidado en que las muestras sean representativas. Cuando se extraigan testigos para la determinación de la geometría del elemento inyectado, se deberá realizar, siempre que sea posible, mediante testigos inclinados con relación al eje del elemento, debiendo determinarse la inclinación del eje de extracción y la posición e inclinación del eje del elemento.

6. APLICACIONES

6.1- ESTACION MONCLOA – METRO DE MADRID

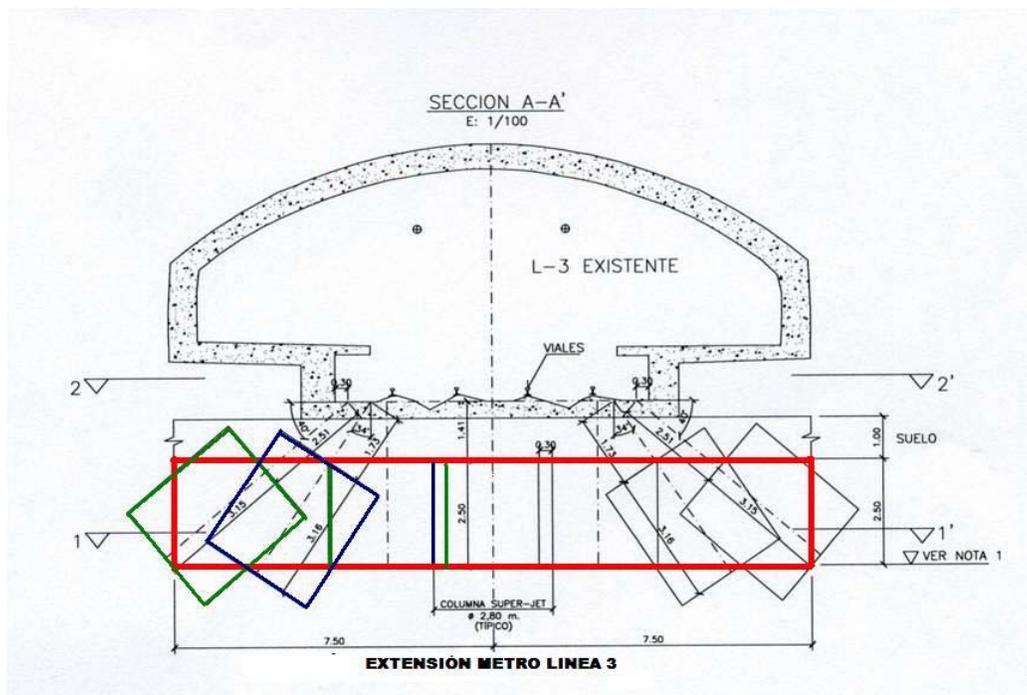


Figura 14: solera de protección

En la Fig. 14 se muestra el diseño de la ejecución de un tratamiento de refuerzo bajo la solera del túnel de la línea 3 existente en la estación de Moncloa. Este refuerzo se necesitaba por la presencia de un suelo de relleno granular con presencia de finos de compacidad media, que no era adecuado para que se excavara un túnel por debajo de la misma estando la línea operativa. Se disponían de 15 días de trabajo con parada de tráfico y el proyecto original contemplaba la ejecución de aproximadamente 500 columnas de jet tradicional. Dado que no era factible cumplir con el plazo, se diseñó una alternativa con 65 columnas de Superjet Grouting de 2,80 metros de diámetro. Con este cambio se pudo cumplir con el objetivo fijado. Para poder hacer un correcto manejo del material de resurgencia se planteó la ejecución de las columnas con angulación desde la solera de tránsito.

Se empleó una mezcla de inyección de cemento con una relación $a/c=1$, trabajando a una presión de 31 MPa y un caudal de 400 l/min. La resistencia a la compresión simple del producto terminado fue mayor de 4 MPa.

6.2- PUERTO DE VALENCIA

El Muelle de Levante, ubicado en el Puerto de Valencia, requirió de una mejora del terreno en base a la técnica de SuperJet-Grouting, con el fin de reforzar el terreno bajo la cimentación del cajón (compuesto por gravas y arenas), para permitir la profundización del calado del puerto bajo la cota de cimentación actual -14,0 hasta la cota -15,20.

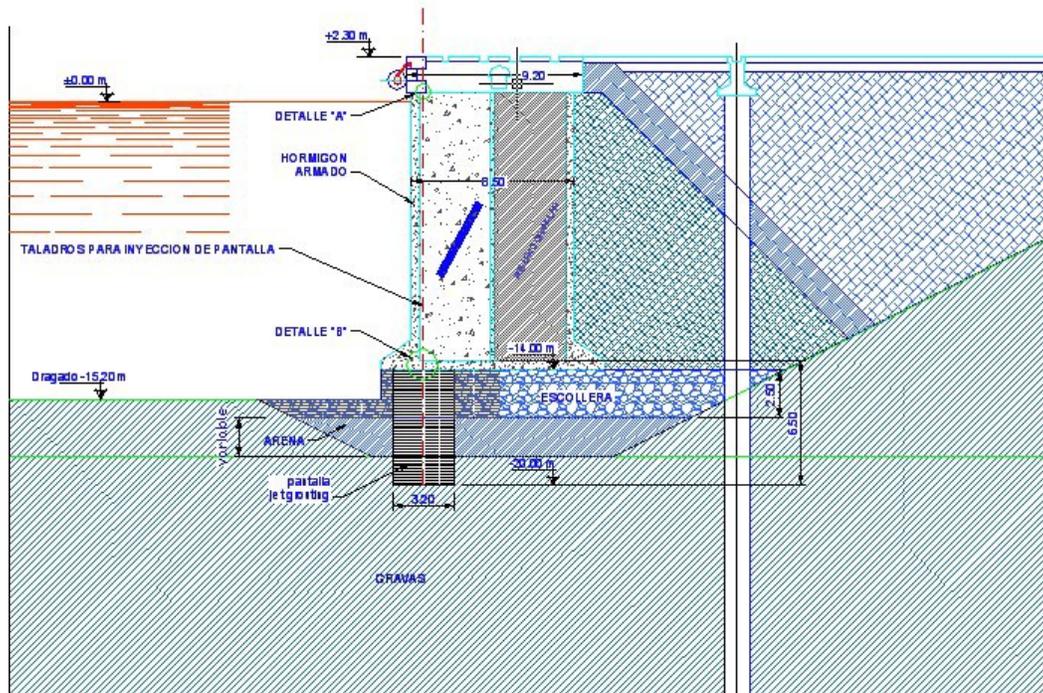


Figura 15: refuerzo del pie del cajón.

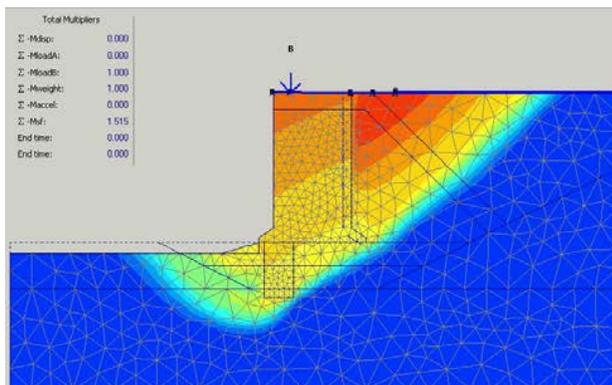


Figura 16: Superficie de falla potencial FS= 1,52.

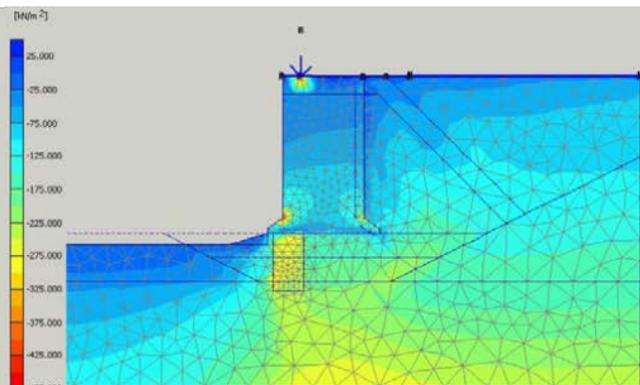


Figura 17: Estado tensional luego del dragado.

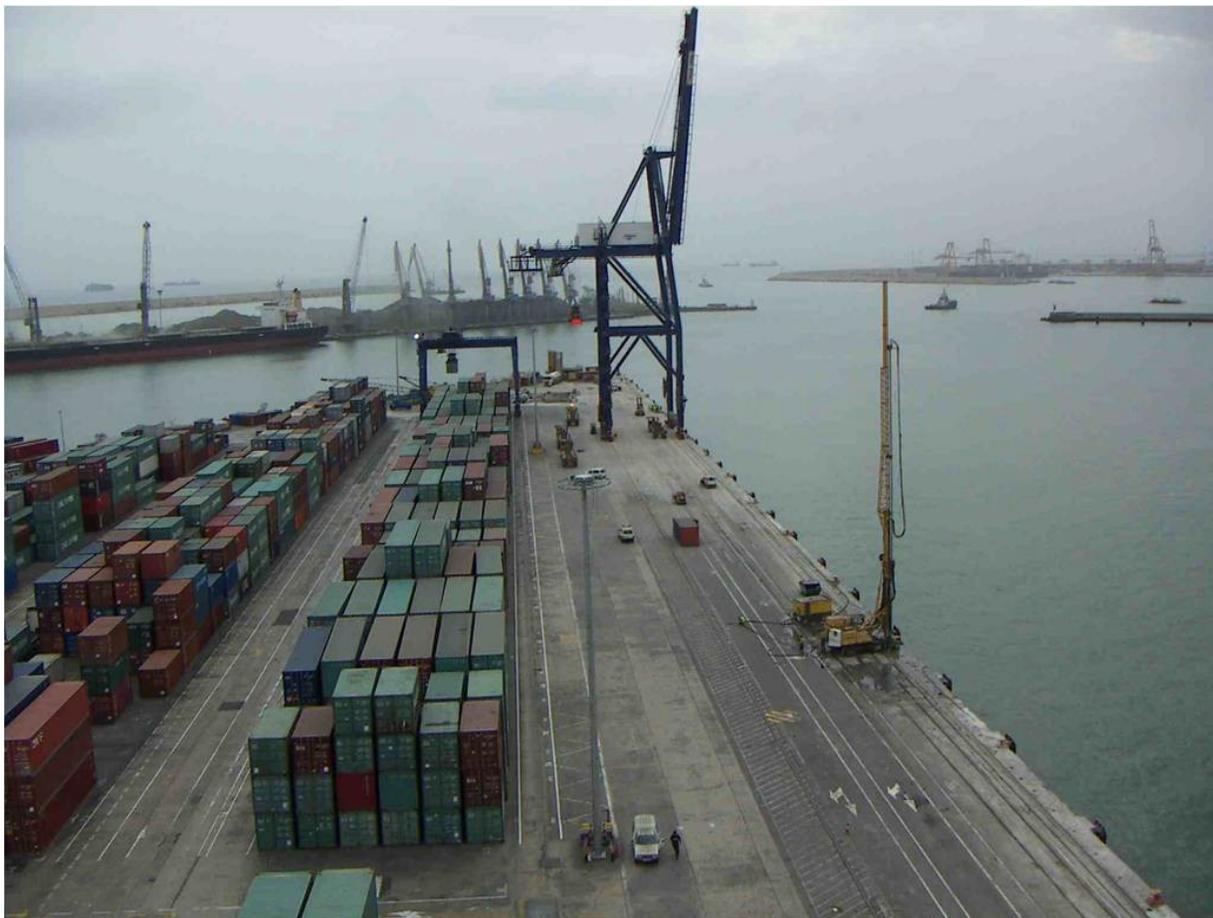


Figura 16: Equipo de SuperJet Grouting durante el proceso de ejecución.

Se colocó un tubo metálico por el interior de los cajones, para guiar tanto la perforación, como para manejar la resurgencia. El trabajo se realizó con una mezcla de inyección de cemento con una relación $a/c=1$, trabajando a una presión de 31 MPa y un caudal de 400 l/min. La resistencia a la compresión simple del producto terminado fue mayor de 5 MPa.

La presencia del suelo tratado de mayor rigidez, bajo la cimentación, hace que al realizarse el dragado se concentren las tensiones sobre ese macizo, trabajando a tensiones de servicio admisibles ⁽⁵⁾. Su presencia condiciona la superficie potencial de falla aumentando la seguridad global a valores de diseño.

El macizo permite un dragado cuasi vertical y evita cualquier problema de erosión.

El tratamiento permitió realizar un aumento de calado del puerto sin condicionar la operación del puerto.

7. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- 1) ZULOAGA FABREGA, IGNACIO, 2003. SuperJet Grouting – Nueva tecnología para la mejora in situ del terreno. AETESS, Madrid.
- 2) AETESS, 2002. Borrador de Guía para el diseño y ejecución de Jet Grouting
- 3) FOLLETO DE JET GROUTING, 2005. Kellerterra.
- 4) AENOR, 2001. EN 12716 Ejecución de Trabajos Geotécnicos Especiales. Inyecciones de Alta Presión. Jet Grouting. Comité Europeo de Normalización. Bruselas.
- 5) FERNANDEZ VINCENT, JUAN MANUEL, 2008. Mejora del terreno mediante SuperJet Grouting. Seminario de Geomecánica Computacional (Plaxis Course), FIUBA, Buenos Aires.