

REFLEXIONES SOBRE EL «JET-GROUTING»

Fernando MUZÁS LABAD Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos
Profesor de Mecánica del Suelo ETSAM

RESUMEN: La técnica del jet-grouting encuentra aplicación en problemas de recalce, contención de terrenos e impermeabilización. El artículo describe los fundamentos del método y sus parámetros técnicos fundamentales, así como sus principales aspectos de ejecución y económicos.

1. INTRODUCCION

Durante el mes de abril de 1974, tuvo lugar en Cambridge (Inglaterra) el II Simposio de Jet-Cutting en el que T. Yahiro y H. Yoshida, de Japón, presentaron un método de tratamiento del terreno, aplicado industrialmente ya entonces en este país, con la denominación de Jet-Grouting.

El procedimiento en esencia consistía en la realización de un hueco en el terreno, de forma plana, utilizando como herramienta un chorro de agua a alta velocidad (jet), hueco que se iba rellenando, al mismo tiempo, con una mezcla de inyección que se hacía llegar por un tubo independiente. El sistema requería la perforación de taladros próximos por los que evacuar el detritus, y mediante él se podían crear en el terreno paneles o elementos planos impermeables y coherentes, dispuestos en sentido vertical u horizontal. Para mejorar la eficacia del corte, el chorro de agua se lanzaba en el interior de un chorro de aire comprimido.

Desde entonces este método se ha generalizado ampliamente, utilizando en general como fluido de corte la misma mezcla de inyección y eliminando los taladros próximos para la evacuación del detritus, que queda en el terreno mezclado con el producto de inyección. La aplicación más general hoy día se orienta a la creación de columnas a base de suelo-cemento, que aisladas o contiguas unas a otras pueden servir para resolver problemas de recalce, de contención del terreno y/o de impermeabilización.

Para aplicar la técnica del jet-grouting es preciso disponer de maquinaria adecuada, cuya producción es lenta debido a la velocidad reducida del tratamiento y a la densidad de taladros normalmente necesarios. A pesar de ello la técnica está de moda pretendiendo a veces utilizarse para resolver problemas en competencia con otras técnicas mas adecuadas de tratamiento del terreno.

En los apartados siguientes trataremos de recoger una serie de reflexiones con la esperanza de que puedan servir para aclarar algunos aspectos de esta técnica y para centrar su campo de aplicación y su racional utilización.

2. BREVE DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Según se acaba de indicar, la técnica jet-grouting como método de estabilización del suelo consiste esencialmente en la disgregación del terreno «in situ» y en la mezcla simultánea con productos adecuados que mejoren su resistencia e impermeabilidad.

El proceso de tratamiento se efectúa tal como, de manera esquemática, se representa en la Fig. 1. La primera operación consiste en la perforación de un taladro de unos 10 cm. de diámetro, hasta la profundidad máxima del tratamiento, en la que se introduce un varillaje metálico equipado en el fondo con dos o más toberas de pequeño diámetro (1,5 a 3,0 mm) para la posterior inyección de la mezcla. En el sistema más sencillo, la perforación se realiza, con el mismo varillaje de inyección provisto, en la punta, del útil adecuado. Una vez alcanzada la profundidad requerida se obtura la salida del fluido de perforación y se sustituye éste por la mezcla de inyección que impulsada por una

bomba de alta presión (400 a 700 atm) únicamente puede salir por las toberas a gran velocidad provocando la disgregación del terreno.

El tratamiento se lleva a cabo haciendo girar el varillaje mientras se va levantando lentamente, al mismo tiempo que se efectúa la inyección de la mezcla. Como resultado del proceso se va creando una columna sensiblemente cilíndrica, de suelo estabilizado hasta la altura deseada.

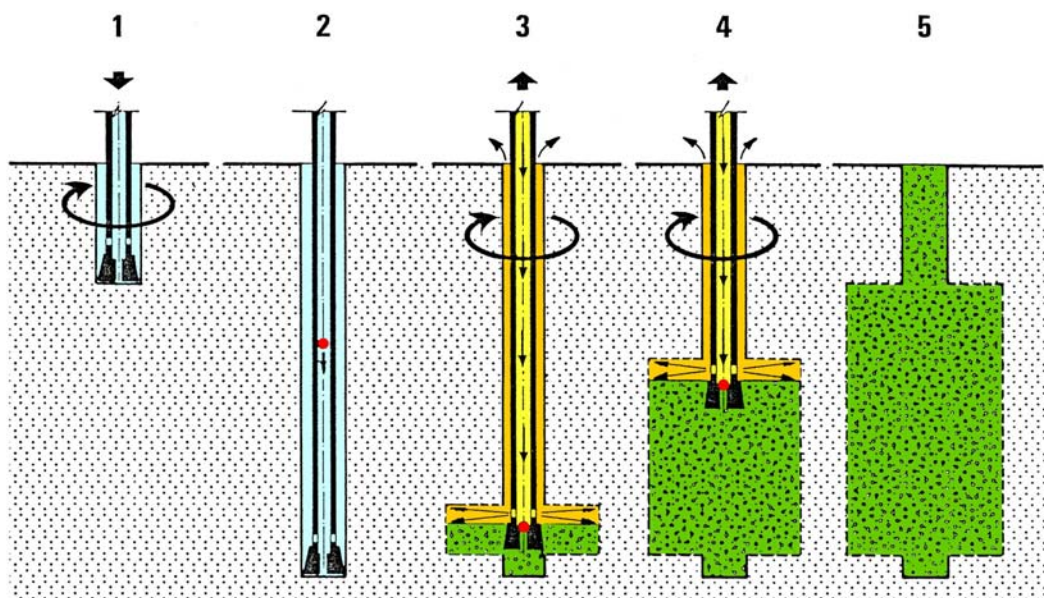


Fig. 1. Secuencia de operaciones del Jet-Grouting

1 y 2. Perforación

3 y 4. Tratamiento del terreno

5. Columna de suelo tratado

Como ilustración de la rapidez del tratamiento indicaremos que la velocidad de rotación del varillaje puede ser de 10 a 30 revoluciones por minuto y la velocidad de extracción del orden de 20 a 70 cm por minuto. Los caudales de inyección suelen oscilar entre 60 a 180 litros por minuto.

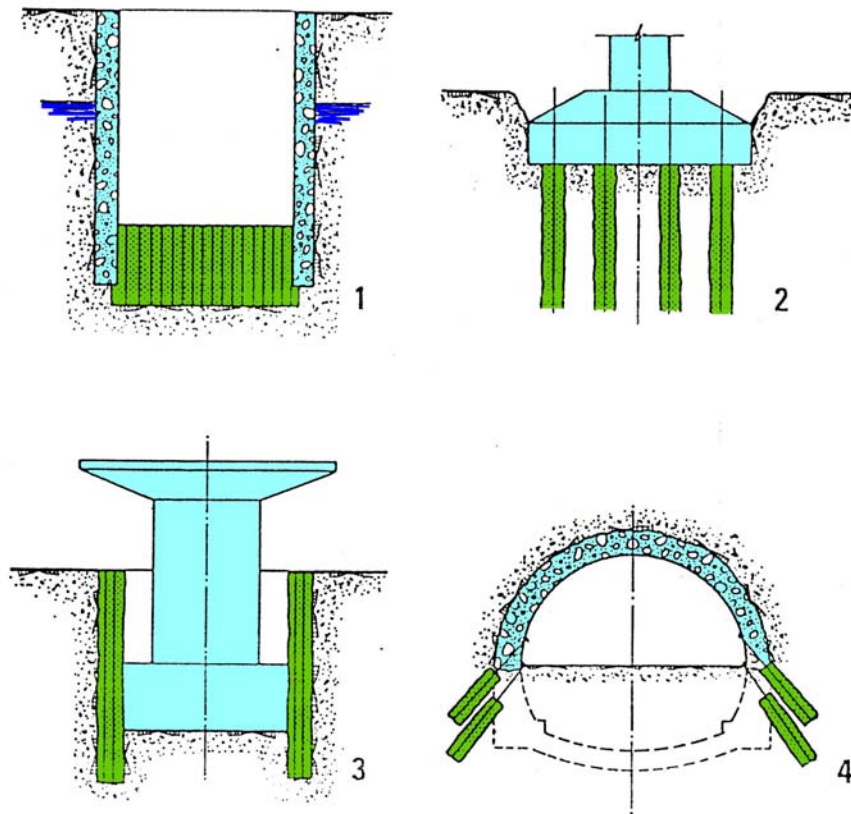


Fig. 2.-Algunos ejemplos de aplicación del Jet-Grouting

1. Impermeabilización de fondos de excavación

2. Recalce de cimentaciones

3. Entibación de pozos de cimentación

4. Entibación de túneles

El diámetro de las columnas depende de las características del terreno y de la velocidad de salida de la mezcla por las toberas, función, evidentemente, de la presión de inyección. Es frecuente obtener diámetros inferiores a 1,0 metro, aunque se han conseguido columnas de más de 3,0 m de diámetro en arenas, utilizando equipos más complejos que efectúan una rotura preliminar del suelo mediante la inyección de agua a elevada presión, en el interior de un chorro de aire comprimido.

Las características resistentes de las columnas dependen lógicamente de la naturaleza del terreno y del tipo de mezcla utilizada, normalmente a base de cemento. Los resultados experimentales indican que la resistencia a compresión simple puede ser de 10,0 a 40,0 kg/cm², tratándose de suelos arcillosos, hasta unos 200,0 kg/cm² para gravas arenosas.

En la figura 2 pueden verse algunos ejemplos prácticos de aplicación.

3. QUÉ ES EL JET-GROUTING

En su aplicación actual, podríamos decir que el Jet-Grouting es un método de mejora del terreno, en profundidad, mediante mezcla del mismo con una lechada que se introduce en su interior. Esta definición no es exclusiva del jet-grouting ya que, con la técnica de las columnas de cal, también se consigue una mejora del terreno mediante mezcla del mismo en profundidad.

¿Es el Jet-grouting una verdadera inyección? A menudo se califica esta técnica como de inyección a alta presión, ya que la bomba necesaria para introducir la lechada debe ser capaz de alcanzar presiones elevadas, del orden de 400 a 700 atm. La realidad es que en el interior del taladro no reina esa presión, sino la debida al peso de la columna del fluido, que rebosa por la boca del mismo, más la presión adicional necesaria para mantener esta circulación. De no ser así, la batería de perforación e inyección saldría disparada hacia el exterior con grave peligro para el personal operario. Hecha esta salvedad, se puede afirmar que el jet-grouting es una técnica de inyección por cuanto la mejora del terreno, en profundidad, se consigue mediante la introducción en el mismo, a través de perforaciones, de fluidos capaces de modificar posteriormente sus propiedades mecánicas y características de permeabilidad.

La particularidad esencial de esta técnica es la aplicación del «jet» o chorro de alta velocidad como herramienta de corte y mezcla del terreno. Las elevadas presiones que debe suministrar la bomba no se utilizan para romper el terreno por fracturación

hidráulica, como en otras técnicas de inyección, sino en crear velocidad del fluido que se inyecta, siendo su energía cinética la que se utiliza para romper el terreno. Hay que tener en cuenta que, con las presiones habituales, la velocidad del fluido, en las toberas de salida, puede ser del orden de 200 a 300 m/s, valores que justifican la denominación del «jet».

4. PARÁMETROS QUE CONTROLAN EL TRATAMIENTO

Los parámetros que fundamentalmente regulan la aplicación práctica del tratamiento son los siguientes:

1. Diámetro de los cilindros de la bomba de inyección.
2. Velocidad del motor de la bomba.
3. Diámetro de las toberas de salida de la lechada.
4. Velocidad de giro del varillaje.
5. Velocidad ascensional del varillaje.
6. Tipo de terreno. Granulometría y facilidad de corte.
7. Separación entre taladros.
8. Características de la lechada inyectada.

Todos estos parámetros tienen su influencia en el resultado técnico-económico del tratamiento, en el que, por conveniencia de exposición, vamos a diferenciar dos procesos, uno primero de corte del terreno y otro de mezcla del detritus con la lechada, a pesar de que, evidentemente, ambos procesos son simultáneos y están íntimamente relacionados entre sí.

5. PROCESO DE CORTE

Normalmente las bombas de jet-grouting disponen de dos o más tamaños de cilindro y de varias velocidades de funcionamiento del motor con objeto de seleccionar en primera aproximación el caudal de suministro de la bomba. El régimen de funcionamiento queda establecido, además, por el diámetro de las toberas de salida de la lechada, diámetro que usualmente oscila alrededor de los dos milímetros. La combinación de estos tres parámetros determina en cada caso, de acuerdo con las curvas características de la bomba, su régimen de funcionamiento, es decir, el caudal y la presión de suministro a pié de máquina. Naturalmente, de la energía total consumida, una parte pequeña se emplea en vencer rozamientos en las tuberías que conducen la lechada desde la bomba a la sonda de tratamiento, pero la parte fundamental se almacena en forma de presión que en la tobera se transforma en energía cinética de la lechada, que sale a muy alta velocidad.

Según lo anteriormente expuesto, para un determinado tamaño de cilindro y una velocidad de funcionamiento de la bomba, es decir para un caudal de inyección, a menor diámetro de las toberas se establece mayor presión y se obtiene, por tanto, un aumento de la velocidad de salida de la lechada. Esta velocidad es la que le da al chorro su poder de corte en función de la naturaleza y de las características resistentes del terreno. Debe señalarse que el radio de acción que puede alcanzar la operación de corte, aunque crece con la presión o sea con la velocidad de salida del chorro en la tobera, no lo hace de manera proporcional y que el método tiene limitaciones de tipo práctico.

La fuerza que el chorro transmite al terreno en el choque es proporcional al producto del caudal inyectado por la velocidad. En consecuencia, para un caudal dado, esta fuerza resulta inversamente proporcional al cuadrado del diámetro del chorro. Dado que este diámetro irá aumentando desde la tobera al difundirse la lechada en el medio fluido en que se inyecta, la eficacia del chorro necesariamente tiene que ir disminuyendo al alejarse de la tobera de salida. A título de ejemplo señalaremos que, para una tobera de 2,0 mm de diámetro, con una apertura del chorro del 1 por ciento la fuerza de impacto se reduce a la décima parte a 20,0 cm de distancia y se divide por cien a 1,0 m de distancia. Si la apertura es del 10 por ciento las citadas reducciones de

la fuerza se producen a distancias diez veces menores. Estos valores sirven para ilustrar la importancia que tiene la concentración del chorro y justifican el interés de los sistemas Jet-grouting más complejos.

La velocidad de giro del varillaje y su velocidad ascensional tienen también influencia en la eficacia del corte del terreno y, como consecuencia, en el radio de acción del tratamiento. Ello se debe a que el efecto cortante del chorro no es instantáneo sino que progresa poco a poco.

Cabe pensar en la existencia de una relación óptima entre los distintos parámetros enumerados, de manera que, para una misma potencia de! «jet» y en un terreno dado, se obtenga la máxima producción de detritus. Este valor óptimo para cada taladro aislado, no tiene por qué corresponder con el óptimo económico en un tratamiento continuo con múltiples columnas adyacentes - como por ejemplo en el caso de tener que impermeabilizar un fondo de excavación - ya que la perforación de los taladros suele tener una importante repercusión económica. En este caso puede ser aconsejable apurar las posibilidades de corte y conseguir mayor radio de acción aunque no se obtenga el óptimo aprovechamiento energético del jet.

6. PROCESO DE MEZCLA

En la técnica Jet-grouting, tal como se aplica actualmente en la mayoría de los casos, el detritus por la acción de corte de! «jet» o chorro de alta velocidad, no se expulsa al exterior como ocurría en las primeras aplicaciones, sino que permanece en el interior del terreno que se está tratando y se mezcla con la lechada que se va inyectando. Normalmente esta lechada es una suspensión de cemento en agua, con adición o no de bentonita u otros productos. La relación C/A suele oscilar entre 0,5 y 1,0.

El producto obtenido mediante este proceso de mezcla, simultáneo al proceso de corte, depende lógicamente, en primer lugar, de la naturaleza del terreno tratado y de las características de la lechada inyectada, pero viene influenciado también por otra

serie de fenómenos, en los que de alguna manera intervienen la mayoría de los parámetros indicados anteriormente.

La dosificación de la mezcla resultante terreno-lechada vendrá determinada, en principio, por la proporción entre los caudales de lechada inyectada y de creación de detritus, pero su composición puede ser un problema complejo según la permeabilidad del terreno y, fundamentalmente, si nos encontramos por debajo del nivel freático, como ocurre frecuentemente.

En un terreno saturado y poco permeable, al inyectar un caudal determinado en su interior, debido a la baja compresibilidad del agua y a su difícil expulsión a otras zonas, si no existiera comunicación del taladro con el exterior subiría la presión hasta reventar por el punto más débil como es el contacto del varillaje con el terreno. En este momento la zona de tratamiento queda sometida a una presión equivalente al peso de la columna de mezcla que rebosa por la boca del taladro, más el incremento necesario para mantener la circulación. El caudal que rebosa, en el supuesto de terreno incompresible, tiene que ser igual necesariamente a la diferencia entre el caudal de lechada inyectado y el volumen que va dejando libre el varillaje, según su velocidad ascensional.

El material expulsado por la boca del taladro deberá ser una mezcla de lechada con el agua y el detritus fino del terreno, quedando en el interior la misma mezcla, bien como una masa homogénea o bien como ligante de los materiales más gruesos no afectados por la acción de corte, o que no pueden ser arrastrados al exterior. La dosificación, como ya hemos indicado, viene determinada por los caudales de lechada inyectada y de detritus creado.

Siguiendo estas ideas, es posible analizar la dosificación de los distintos materiales (agua, áridos finos, áridos gruesos, cemento) que resulta, tanto para el material que rebosa por la boca del taladro como para el que queda en el interior del terreno.

Para que no haya rebose de material inyectado es preciso que exista o se cree el hueco necesario para la lechada. Ello puede ocurrir si se actúa por encima del nivel freático o cuando el terreno es bastante permeable para ir expulsando el agua subterránea. Ahora bien, esto no es suficiente ya que, además debe existir una

adecuación entre el caudal inyectado y la porosidad del terreno tratado por unidad de tiempo, que puede ser mayor que el transformado en detritus, si la permeabilidad y el tamaño de los poros permiten la circulación de la lechada. Conviene señalar, por otra parte, que aunque en teoría el ideal sería no inyectar más lechada que la estrictamente necesaria para colmatar el suelo, en cuyo caso no habría expulsión de lechada, el hecho de verla salir por la boca del taladro es un buen control de que se van rellenando los huecos del terreno, creados o no por la acción del chorro.

Es evidente que en todo este proceso intervienen todos los parámetros indicados anteriormente, ya que están íntimamente relacionados entre sí y que deberían guardar una cierta relación, en función del resultado que se desea conseguir. Se intuye que la solución óptima para definir el tratamiento es muy compleja. En la práctica conviene comprobar que entre los distintos valores que se adopten en principio, existe una relación adecuada con el resultado que se desea conseguir y controlar en obra el proceso tratando de detectar las desviaciones sobre lo previsto, fundamentalmente en cuanto al caudal y dosificación del producto que rebosa.

7. ASPECTOS ECONÓMICOS

El tratamiento del terreno mediante la técnica jet-grouting es relativamente caro, si se tiene en cuenta que el producto obtenido equivale a un pilote de baja resistencia constituido por una mezcla de suelo-cemento y que su coste es igual o superior al de un pilote de hormigón. En el precio del tratamiento interviene fundamentalmente la densidad de la malla de taladros, pero además, en muchos casos, influye el coste de la perforación adicional para acceder a la zona de tratamiento, atravesando terreno que no es preciso mejorar.

Una de las grandes ventajas de esta técnica estriba en que a través de perforaciones de pequeño diámetro (igual o inferior a 10 cm.) se pueden crear columnas de diámetro muy superior (por ejemplo 80 cm.) sin llegar a la superficie del terreno. Debido a ello

tienen aplicación en problemas de recalce, en competencia con los micropilotes, o como alternativa cuando no puede hacerse frente al punzonamiento.

Cuando la mejora del terreno, con esta técnica, debe llevarse hasta la superficie del terreno, conviene no olvidar la posible aplicación de otras técnicas como la ejecución de pilotes tangentes o secantes, que puede resultar más económica.

En tratamientos continuos, como puede ser la ejecución de fondos impermeables de excavación, la perforación de los taladros suele tener una gran incidencia económica por lo que es conveniente conseguir el mayor radio de acción del chorro. Ello quiere decir que en principio conviene apurar, de manera razonable, la capacidad de la bomba de inyección seleccionando máxima presión y máximo caudal compatible, con lo que automáticamente queda fijado el diámetro de las toberas. El posterior control y análisis del producto expulsado y su comparación con la lechada inyectada, puede dar un índice de si es adecuada la velocidad del tratamiento. En estos casos tampoco debe olvidarse la alternativa de efectuar un tratamiento con inyecciones químicas que suele exigir una malla de taladros más abierta, reduciéndose la perforación en ocasiones a la cuarta parte.

De todas maneras, en este tipo de aplicaciones superficiales del jet-grouting convendría estudiar a fondo el coste del tratamiento. Hay que tener en cuenta que para una determinada potencia de la bomba, al aumentar la presión debe disminuir el caudal de inyección y en consecuencia el tiempo que se requiere para la creación de una columna crece más que proporcionalmente con el volumen de la misma. Desde el punto de vista económico es posible que exista una relación óptima entre la presión y el caudal, para cada tipo de terreno, pero también es posible que el coste del tratamiento por metro cúbico de terreno tratado resulte muy similar al variar la apertura de la malla.

8. FINAL

A título de ejemplo se incluyen a continuación los parámetros correspondientes a un caso concreto de inyección de 120,0 l/min. de una lechada de cemento con dosificación A/C = 1 y peso específico 1,5 t/m³. a través de dos toberas de 2,2 mm de diámetro.

Con estas hipótesis la velocidad del chorro a la salida de la tobera resulta de 263,0 m/seg. y la presión de la bomba de unas 530 atm.

Supondremos que el terreno natural está saturado, es poco permeable y tiene la siguiente composición por metro cúbico:

Agua:	350 l	=	350 Kg.
Árido fino:	300 l	=	795 Kg.
Árido grueso:	350 l	=	928 Kg.
Suma:	1000 l	=	2.073 Kg.

Si el tratamiento se efectuara a una velocidad ascensional de 40 cm./min., consiguiendo crear una columna de 80 cm. de diámetro y admitimos la hipótesis de terreno incompresible por estar saturado y ser poco permeable, por la boca del taladro tendría que rebosar un caudal de mezcla ligeramente inferior a los 120,0 l/min. inyectados. Efectuando la composición de los caudales de lechada y de detritus, se pueden determinar las dosificaciones que cabría esperar en el material que rebosa y en el terreno tratado, obteniendo los resultados siguientes:

Material que rebosa:

Agua:	640 Kg./m ³	
Cemento:	359 Kg./m ³	
Árido fino:	638 Kg./m ³	
Suma:	1.637 Kg./m ³	A/C = 1,78

Terreno tratado:

Agua:	416 Kg./m ³
-------	------------------------

Cemento:	233 Kg./m ³	
Árido fino:	414 Kg./m ³	
Árido grueso:	928 Kg./m ³	
Suma:	1.991 Kg./m ³	A/C = 1,78

Se observa un enriquecimiento en agua, al quedar incorporada la del terreno, y un aumento del peso específico del material que rebosa al incluir una fracción de árido (1,64 t/m³ frente a 1,5 t/m³). El terreno tratado resulta con una dosificación de cemento bastante más baja que en la lechada inicial.

En la hipótesis de suelo seco y con la misma composición de áridos, efectuando unos cálculos análogos, el caudal expulsado por la boca del taladro sería de 50 l/min, manteniéndose la relación A/C = 1, pero subiendo el peso específico a 1,88 t/m³. El material tratado tendría un peso específico de 2,15 t/m³, una dosificación de cemento de 325 kg/m³ y la misma relación A/C = 1.

Estos cálculos elementales ilustran cómo puede variar el resultado del tratamiento según los casos. Es claro que en la hipótesis de suelo seco, a igualdad de los demás parámetros y variables, el consumo de cemento sería menor y el terreno tratado tendría mayor resistencia. Como conclusión se deduce también la importancia que puede tener el control y análisis del producto expulsado por la boca del taladro, como medio para enjuiciar la evolución del proceso y corregir, si procede, los parámetros del tratamiento.