Jet Grouting. Elemento reductor de permeabilidad. Campo de aplicación, diseño, ejecución y control

Jet Grouting. Permeability reducer element. Field of application, design, execution and control

Lara Montero Cuesta[1*] y Goran Vukotić[2]

Palabras clave

Jet Grouting;
elemento reductor
permeabilidad;

Sumario

En la actualidad, el jet grouting es un sistema de mejora del terreno muy utilizado por su gran versatilidad, lo que permite su uso en multitud de aplicaciones. En concreto, se pretende analizar el empleo de esta técnica como barrera hidráulica o elemento reductor de permeabilidad.

En España, no existe una normativa relativa a este tratamiento de mejora del terreno que englobe las pautas para la realización del diseño, ejecución y control del jet grouting. Las empresas especialistas utilizan normativas existentes en otros países, como Japón y Alemania, para suplir esta carencia. Además, dichas empresas cuentan con muchos años de experiencia en este tratamiento de mejora del terreno, con lo que utilizan parámetros obtenidos y contrastados experimentalmente en numerosas obras realizadas.

El objetivo del artículo es establecer los criterios básicos para el diseño de un tratamiento de jet grouting cuando actúa como elemento reductor de la permeabilidad, analizando los procedimientos de cálculo para la optimización de la solución. Se pretende establecer las fases que se deben llevar a cabo para el diseño de las columnas de jet grouting, así como indicar los parámetros de ejecución que se deben imponer para llegar a la solución inicialmente diseñada. Además, se recopilarán las diferentes formas de control durante la construcción y las diferentes pruebas que se deben realizar para verificar y optimizar el tratamiento.

Keywords

*Jet Grouting;
permeability reducer
element;*

Abstract

Nowadays, the jet grouting is a ground improvement system widely used for its great versatility, allowing its application in many different situations. Specifically, this article aims to analyze the utilization of such technique as hydraulic barrier or reducing permeability element.

In Spain, there is no regulation regarding the treatment of ground improvement encompassing guidelines for carrying out the design, execution and control of jet grouting. The specialist enterprises use existing regulations in other countries, such as Japan and Germany to fill this gap. In addition, these companies have many years of experience in the treatment of soil improvement, that use parameters obtained and verified experimentally in many performed works.

The purpose of this article is to establish the basic criteria for the design of jet grouting treatment when it acts as reducing permeability element, analyzing calculation procedures for the optimization of the solution. It also pretend to establish the steps to be carried out for the design of jet grouting columns, as well as, to indicate the execution parameters to be imposed to reach the solution initially designed. Besides, different forms of control will be collected during construction and diverse tests that must be realized to verify and optimize treatment.

1. INTRODUCCIÓN

El jet grouting es un tratamiento del terreno en el que se mejoran sus propiedades, aumentando sus características resistentes y su compresibilidad, y reduciendo la permeabilidad.

Se basa en la disgregación del terreno "in situ" y en la mezcla y sustitución de parte del material por un agente cementante, habitualmente lechada de cemento, obteniendo un nuevo material, producto de la mezcla de la lechada con el suelo que se pretende mejorar, en forma de columnas pseudo-cilíndricas o paneles de suelo-cemento.

Es un método muy versátil, que le ha permitido su uso en muchas aplicaciones y para distintas tipologías del terreno natural. Existen diferentes tipos de jet grouting en función del número de fluidos y de la eficiencia del sistema de ejecución, como se observa en la tabla 1 y f igura 1.

Además de los tres tipos de jet grouting convencionales, el superjet grouting es una mejora tecnológica del sistema de doble fluido, en la que se perfeccionan los sistemas de inyección y aumenta la eficiencia del sistema completo. La lechada es empleada para la erosión y mezcla con el terreno, y el aire incrementa la eficacia de la erosión. Este nuevo método implica el perfeccionamiento del sistema de inyección, una mayor energía de inyección, y un aumento de la capacidad de corte y mezcla del terreno, de la eficiencia del sistema y de la calidad de ejecución, obteniendo

* Corresponding author: laramonterocuesta@hotmail.com

[1] Investigador independiente.

[2] Keller Cimentaciones, S.L.U., Madrid, España.

Tabla 1. Tipos de Jet Grouting

	Tipos de Jet Grouting			
Nomenclatura de jet grouting	1	2A	2B	3
Tipos de tratamiento en función del número de fluidos utilizados	simple	doble	doble	triple
Fluido de disgregación/ desplazamiento del terreno	lechada de cemento	agua alta presion	lechada de cemento con ayuda de aire a presión	agua alta presión envuelto aire comprimido
Fluido de mezcla con el terreno	lechada de cemento	lechada de cemento	lechada de cemento	lechada de cemento

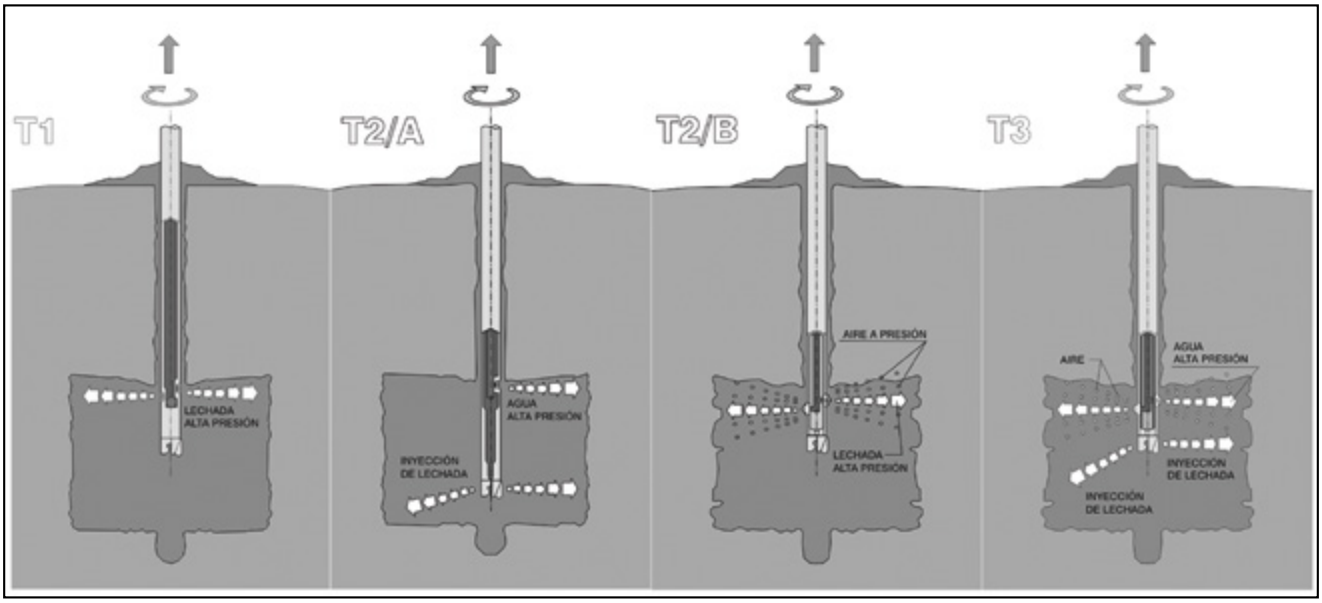


Figura 1. Tipos de Jet Grouting.

Figura 2. Columnas de superjet grouting. Foto izquierda (Dosier Hayward Baker). Foto derecha (Cortesía Keller Cimentaciones).

como resultado columnas de mayores diámetros (hasta 5 metros) y de mejor calidad.

2. CAMPO DE APLICACIÓN

El jet grouting es una técnica de inyección aplicable a cualquier tipo de terreno, sin embargo, se tiene distinta eficacia en caso de tratarse de gravas, arenas, limos o arcillas, en función de la granulometría, permeabilidad, consistencia/compacidad y de la resistencia a la erosión.

No existen hasta el momento fórmulas analíticas de amplia utilización, que establezcan una correlación directa entre el diámetro de las columnas y otros parámetros del suelo. Las empresas especialistas suelen tener sus fórmulas empíricas para estimar el diámetro en diferentes tipos de terreno. La experiencia en este aspecto resulta fundamental.

El jet grouting resulta muy efectivo en suelos granulares, mientras que en suelos de grano fino sus efectos son inferiores. Además, en suelos densos o compactos los diámetros conseguidos son menores que en suelos suelos

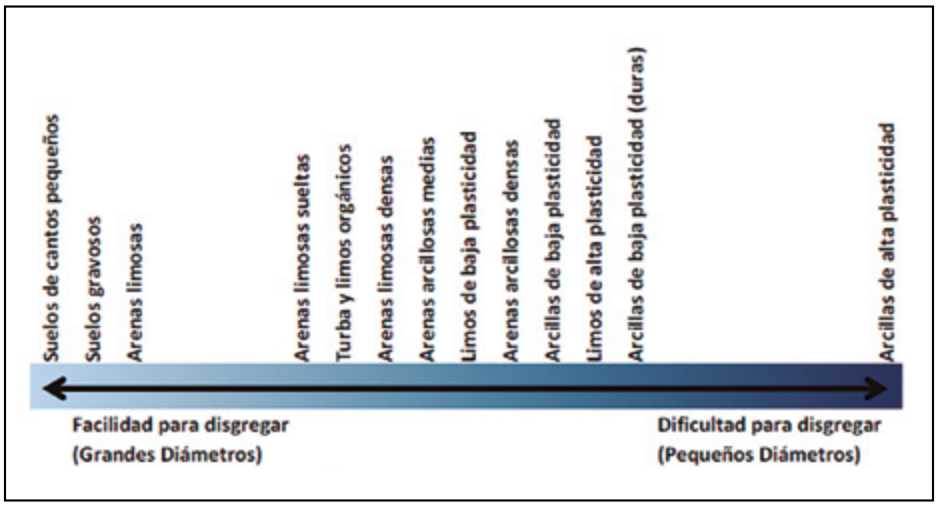


Figura 3. Dificultad de disgregación según el tipo de terreno (Vukotić, 2011a).

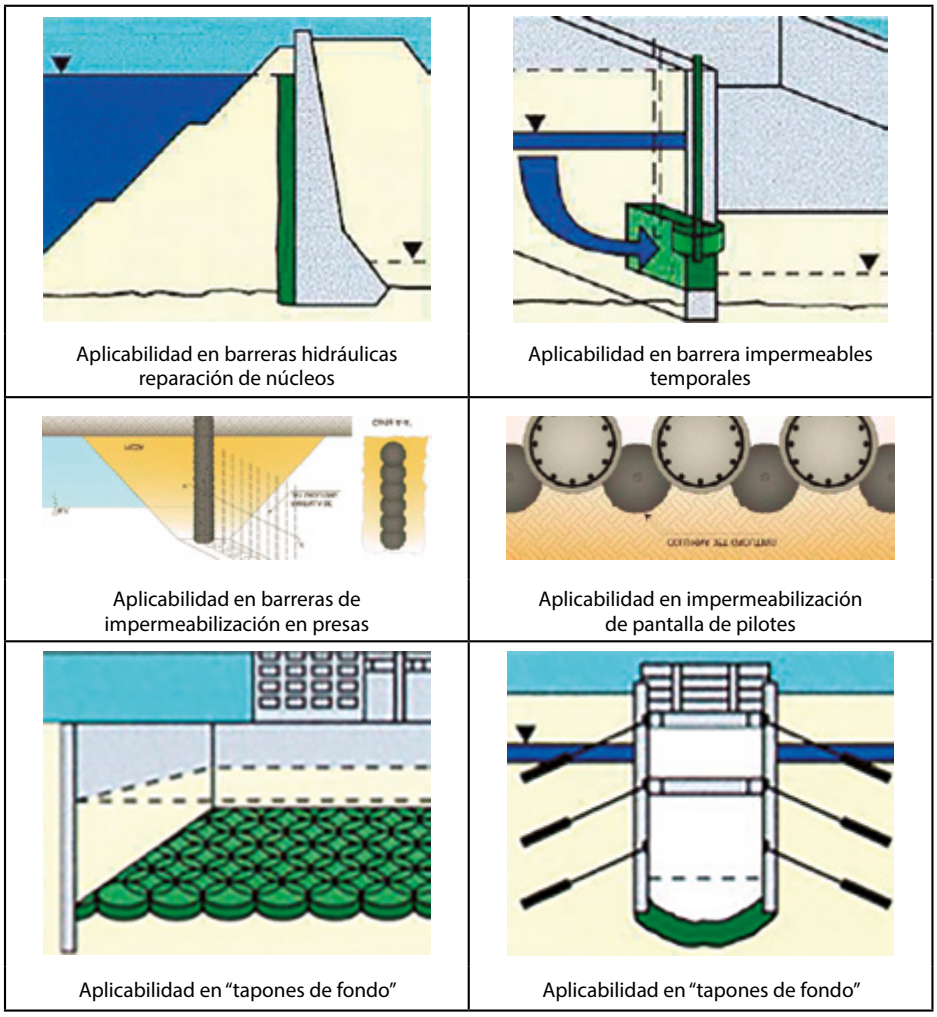


Figura 4. Aplicaciones de las barreras hidráulicas (Dosier de Keller Holding GmbH; Delgado, C. y Panadero, S. (2012)).

sueltos o flojos, como queda de manifiesto en el diagrama de la figura 3.

El jet grouting es una técnica muy versátil, aplicándose tanto a obra nueva como a recalce y refuerzo, así como a trabajos permanentes como provisionales. Las ventajas del jet grouting respecto a otros tratamientos del terreno, básicamente otros tipos de inyección, son la mayor predicción del grado de mejora del suelo tras su aplicación y la mayor flexibilidad geométrica.

Esta técnica puede emplearse en diversos campos como cimentaciones, excavaciones, túneles, estabilización de terrenos, contención y control de contaminantes, así como en barreras hidráulicas, que engloban a "tapones de fondo" para recintos apantallados, barreras hidráulicas en presas, pantallas verticales para el control del agua freática y como elemento de impermeabilización en pantallas de pilotes o micropilotes, así como, la protección contra la erosión en obras marítimas y fluviales. Algunas de estas aplicaciones quedan reflejadas en la figura 4.

3. DISEÑO

3.1. Introducción

La barrera hidráulica está formada por columnas independientes entrelazadas entre sí, lo que permite la creación de una estructura continua. Por tanto, es de vital importancia un diseño con el solape adecuado, y una ejecución que minimice las desviaciones y que cumpla con las tolerancias impuestas en el esquema diseñado, ya que los solapes teóricos son físicamente imposibles de alcanzar (figura 5).

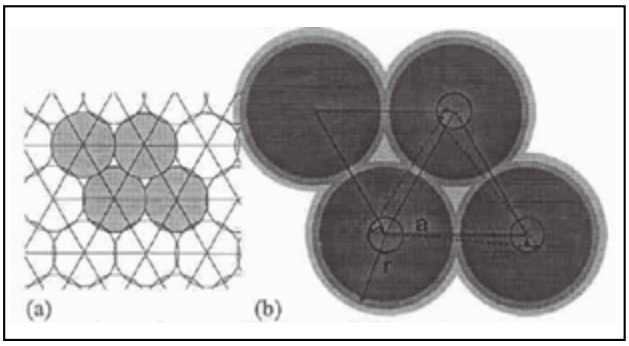


Figura 5. Distribución teórica (a) y real (b) de las columnas (Saurer et al., 2011).

El jet grouting empleado en una barrera hidráulica puede tener una doble función: actuar como elemento reductor de permeabilidad y como elemento estructural. Se debe diseñar el tratamiento en función del objetivo de la mejora que se pretenda conseguir.

En España, no existe una normativa de jet grouting que englobe las pautas para la realización del diseño de este tratamiento de mejora del terreno. Por tanto, para exponer los criterios básicos para el diseño del jet grouting se ha utilizado como referencia la normativa y recomendaciones existentes en otros países, como Japón ("Japanese Jet Grouting Technology and Design Guideline (JSG method, Column Jet Grout method)") y Alemania (Deutsche Norm (DIN 4093, Design of ground improvement – Jet grouting, deep mixing or grouting, 2012), así como un documento del año 2002, creado por la Asociación de Empresas Especialistas en Cimentaciones Especiales y Tratamientos del Terreno (AETESS) denominado "Borrador de Guía para el diseño y ejecución de Jet Grouting", que no se ha publicado oficialmente y que, por supuesto, no tiene carácter normativo. Además de estos documentos mencionados, existen otras muchas publicaciones de referencias, entre las cuales se puede resaltar el "Manual de Técnicas de Mejora del Terreno" (Bielza, 1999), y otros autores como Croce et al. (2014), Saurer et al. (2011), Burke and Joshida (2013), etc.

3.2. Criterios de diseño

Para realizar un diseño de jet grouting se deben conocer como datos de partida las solicitaciones de la estructura, terreno o del agua en su caso; las propiedades del terreno antes del tratamiento y las propiedades esperadas en el suelo una vez realizado el tratamiento. Además, se deben elegir los parámetros de ejecución en función de los puntos anteriores. A estos cuatro elementos anteriores se debe añadir la definición del objetivo que se pretende conseguir con el tratamiento, así como, el ámbito de ejecución donde se desarrolla.

El primer dato que se debe conocer son las diferentes solicitaciones a las que se verá sometida la solución que se pretende calcular, teniendo en cuenta que las acciones a considerar serán nominales, debiendo aplicar los coeficientes de seguridad necesarios en cada caso, y debiendo calcular los estados límites, último y de servicio, para calcular los esfuerzos más desfavorables, todo ello según establezca la legislación correspondiente.

En segundo lugar se deben conocer las propiedades del terreno original, como la granulometría y el contenido finos (#200), la densidad relativa, la humedad natural, los límites de Atterberg, la resistencia al corte y el coeficiente de permeabilidad, así como, la ubicación nivel freático y la profundidad de la zona a tratar.

Las propiedades del suelo tratado que se deben conocer son la resistencia a compresión simple (RCS) y el diámetro de la columna ($Ø_{columna}$). Con estos dos parámetros se obtienen el resto de las características necesarias para el dimensionamiento como son la resistencia a tracción ($RT \leq 0{,}10 \cdot RCS$), la resistencia a compresión ($RQ = 0{,}08 \cdot RCS$), el módulo de elasticidad ($E = \alpha \cdot RCS$) y la permeabilidad real (k_{real}).La permeabilidad global depende de "k_{real}" del terreno mejorado y de la continuidad del tratamiento (solape y verticalidad columnas ejecutadas).

El coeficiente de permeabilidad del terreno tratado con jet grouting es función de la naturaleza del terreno original. Se observa que el coeficiente de permeabilidad de las columnas de jet grouting es muy reducido por lo que el material es muy impermeable. Sin embargo, la permeabilidad global del tratamiento no sólo tiene en cuenta este coeficiente, sino también la continuidad del jet grouting.

Tabla 2. Valores del coeficiente de permeabilidad del suelo tratado (Borrador Guía para diseño y ejecución de Jet Grouting, 2002)

Naturaleza del terreno inicial	k (m/s)
Arcillas	10^{-7} a 10^{-9}
Limos	10^{-7} a 10^{-9}
Arenas y gravas	10^{-8} a 10^{-10}

En la tabla 2 se representa el coeficiente de permeabilidad del terreno tratado, pero la permeabilidad real o global de un elemento reductor de permeabilidad será función de la geometría real del recinto y de los posibles desperfectos geométricos. En ocasiones, la permeabilidad real o global puede ser hasta 10 veces más permeable, como puede observarse en la figura 6, donde se observa la reducción del coeficiente de permeabilidad del suelo original al suelo mejorado con jet grouting.

El diámetro de la columna de terreno tratado es función del tipo de terreno y de la energía aplicada. Los rangos de los valores de los diámetros de las columnas según el tipo de jet grouting se reflejan en la tabla 3, donde los valores bajos corresponden a terrenos cohesivos compactos, y los altos a los granulares sueltos.

Los condicionantes que determinan la función de una barrera hidráulica de jet grouting son el diámetro, la distribución en planta, la continuidad de las columnas y la permeabilidad del terreno original. Por tanto el objetivo del

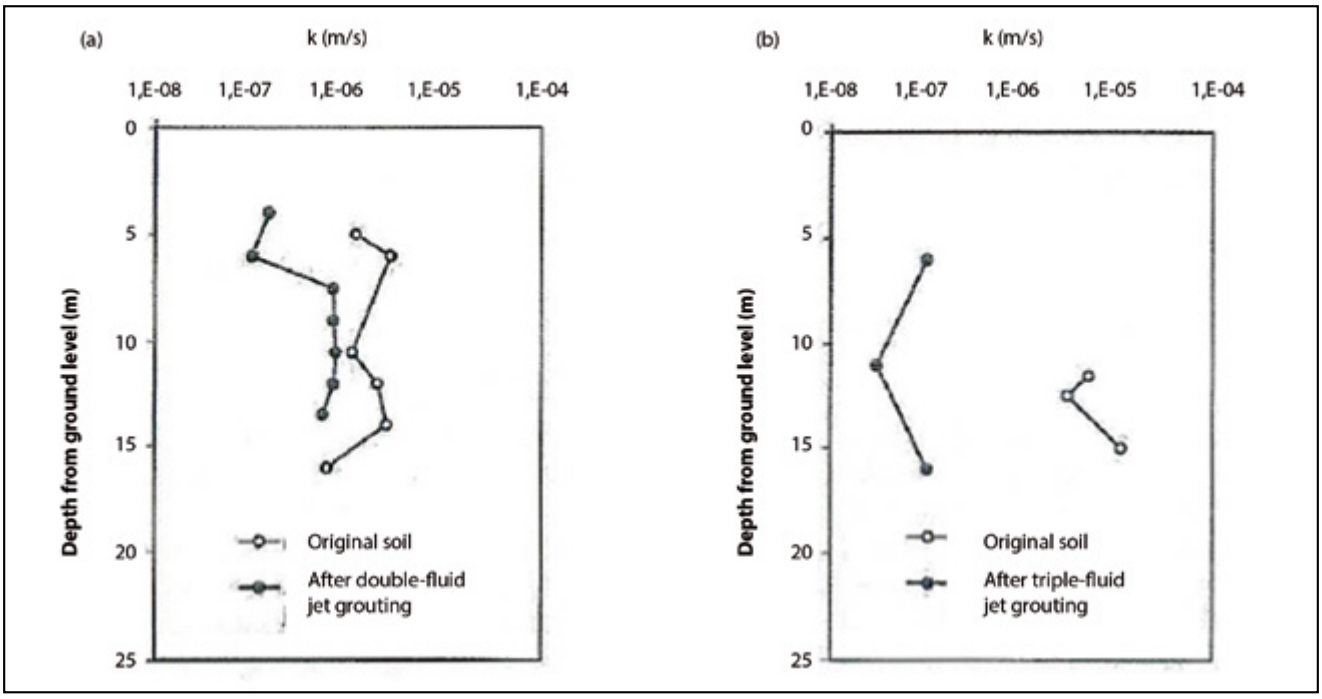


Figura 6. Reducción de la permeabilidad del terreno original al terreno tratado con jet grouting (Croce et al., 2014).

diseño de estos elementos es ver cómo afectan estos parámetros mencionados en la permeabilidad de la solución de jet grout ing planteada.

Tabla 3. Diámetros de las columnas en función del tipo de jet

Tipo de suelo	Diámetro (m)
Jet 1	0,45-0,80
Jet 2	0,60-2,00
Jet 3	1,00-2,50
Superjet	2,00-5,00

Los criterios de diseño deben adaptarse al tipo de sistema de barrera hidráulica (figura 7), bien sea vertical (pantalla de impermeabilización) u horizontal (tapón de fondo). En este artículo únicamente se va a hacer referencia al caso horizontal.

3.3. Cálculo de barrera hidráulica horizontal

El objetivo al realizar un cálculo de una barrera hidráulica horizontal o tapón de fondo es determinar los parámetros necesarios para su dimensionamiento que hagan posible que cumpla con su función de reducción de la permeabilidad. Estos parámetros son el espesor y la profundidad del tapón, así como, una distribución en planta que consiga un solape adecuado. Para ello se deben analizar varios aspectos:

– La estabilidad del tapón de fondo, obteniendo la profundidad del tapón y su espesor.

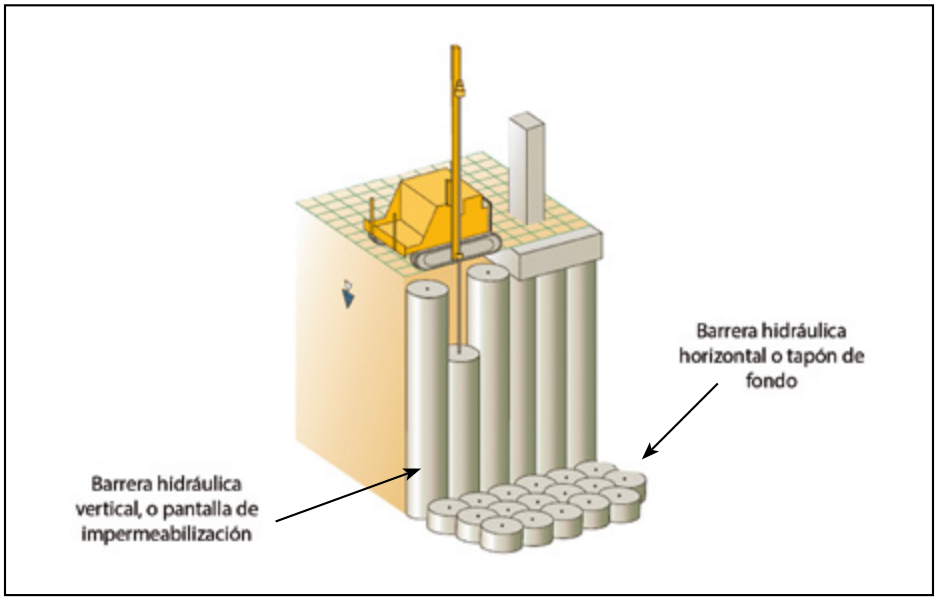


Figura 7. Aplicaciones de barrera hidráulica: pantalla de impermeabilización y tapón de fondo (Hayward Baker, 2002).

- La distribución en planta de todas las columnas de jet grouting, determinando así, el solape necesario para garantizar la reducción de la permeabilidad y además que se ejecute con un determinado coeficiente de seguridad.
- Las diferentes comprobaciones resistentes (flexión, cortante, y contacto entre material tratado y elemento estructural vertical) verificando que se cumplen todas ellas.

A continuación se expone el desarrollo de cada uno de los puntos anteriores:

1. Estabilidad del tapón de fondo

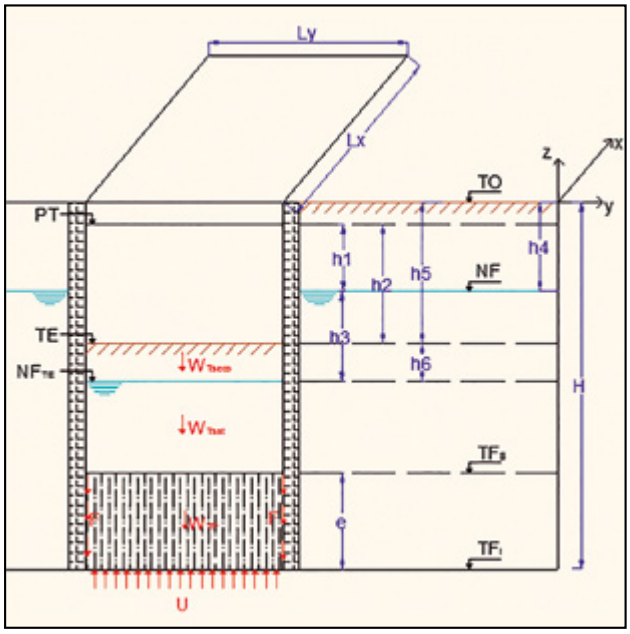


Figura 8. Esquema de las fuerzas intervinientes y la nomenclatura utilizada.

– Fuerzas intervinientes

Empuje de subpresión del agua en fondo	U
Peso propio terreno seco sobre tapón	W_{Tseco}
Peso propio terreno saturado sobre tapón	W_{Tsat}
Peso propio tapón de fondo	W_{TP}
Rozamiento tapón-paredes laterales	F

– Factor de seguridad.
→$FS_{sin\ rozamiento}$ = 1,1; $FS_{con\ rozamiento}$ = 1,5

Estará comprendido entre 1,1 y 3,0, siendo 1,5 un valor habitual. En ocasiones es aconsejable no considerar el rozamiento entre el tapón de jet grouting y la estructura vertical adyacente. De esta forma el cálculo se realiza del lado de la seguridad. Por ello es común realizar un diseño sin contemplar la fuerza de rozamiento entre el tapón y las paredes laterales. En este caso, el factor de seguridad que se debe aplicar será algo menor que 1,5 ($FS_{sin\ rozamiento}$=1,1), ya que en éste cálculo se tienen menos incertidumbres. Esta práctica arroja resultados menos conservadores, es decir, tapones menos profundos.

– Equilibrio de fuerzas

$FS = \frac{W_{Tseco} + W_{Tsat} + W_{TP} + F}{U}$	$FS = \frac{W_{Tseco} + W_{Tsat} + W_{TP}}{U}$
Con rozamiento tapón de fondo-paredes laterales	Sin rozamiento tapón de fondo-paredes laterales

– Solicitaciones

U	$U = A \cdot \gamma_w \cdot (H - h_4)$
WTseco	$W_{Tseco=} A \cdot \gamma_{Tseco} \cdot (h_6)$
WTsat	$W_{Tsat=} A \cdot \gamma_{Tsat} \cdot (H - h_5 - h_6 - e)$
WTP	$W_{TP=} A \cdot \gamma_{TT} \cdot (e)$
F	$F = f_{unitaria} \cdot e$

Tipo de suelo	Conexión interceptada c (kN/m²)	Adhesión unitaria funitaria (kN/m²)
Suelo arenoso	500	c/3
Suelo arcilloso	300	c/3

(* Según norma japonesa)

– Datos de entrada

Cota del terreno original	TO (m)
Cota del nivel freático	NF (m)
Cota de plataforma de trabajo	PT (m)
Cota de terreno excavado	TE (m)
Cota del nivel freático terreno excav.	NF_{TE} (m)
Espesor del tapón de fondo	e (m)

El espesor mínimo de la losa será de: e_{min} = 1,5 m, y la incógnita del proceso de cálculo será la H.

2. DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

El objetivo es determinar un solape necesario para garantizar reducción de permeabilidad y el factor de seguridad o eficiencia del tratamiento de jet grouting que se pretende emplear.

La disposición básica recomendada para conseguir el objetivo de reducción de la permeabilidad es la que se muestra en la figura 9.

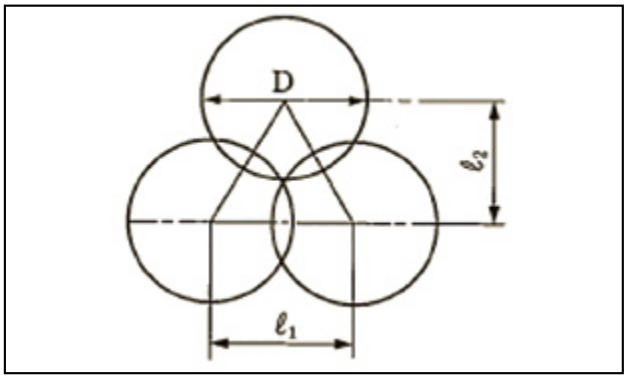


Figura 9. Disposición de las columnas (Japan Jet Grout Association, 2005).

– Datos de entrada

Profundidad del fondo del tapón	h_{TAPON} (m)
Diámetro de la perforación	D_{PERF} (m)
Diámetro columna (d.influencia)	D (m)
Porcentaje de desviación máxima	d_{MAX} (%)
Separación entre centros	x (m)

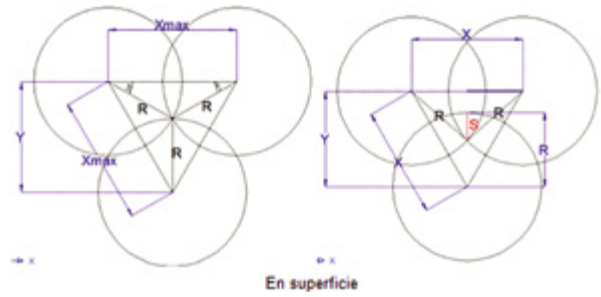
– Datos de salida

Radio columna	R (m)
Separación máxima posible	x_{MAX} (m)
Distancia entre filas máxima	y_{MAX} (m)
Desviación en el fondo	d_F (m)
Distancia entre filas consecutivas	y (m)
Solape entre las tres columnas adyacentes	S (m)
Factor de seguridad en superficie	FS_S (%)
Separación en el fondo, considerando desviación	x_F (m)
Distancia entre filas fondo, considerando desviación	y_F (m)
Separación máxima en el fondo	x_{MAXF} (m)
Distancia maxima entre filas fondo	y_{MAXF} (m)
Solape entre las tres columnas fondo	S_F (m)
Factor de seguridad en el fondo	F_{SF} (%)

Las expresiones del solape entre las columnas adyacentes, en superficie y en el fondo, tienen las siguientes expresiones:

En superficie:

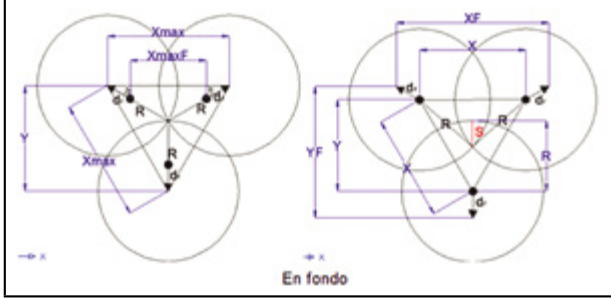
$$S = R - \left(y - \sqrt{R^2 - \left(\frac{x}{2}\right)^2} \right) \qquad FS = \frac{S}{R} \cdot 100\%$$



En fondo:

$$d_F = h_{TAPON} \cdot d_{MAX} \qquad S_F = R - \left(y_F - \sqrt{R^2 - \left(\frac{x_F}{2}\right)^2} \right)$$

$$FS_F = \frac{S_F}{R} \cdot 100\%$$



La determinación de las coordenadas de los centros de las columnas debe analizar varios as pectos. Por ejemplo para tres filas consecutivas de columnas, como puede observarse en la figura 10, cuyos centros están representados por las letras A, B, C, D y E, se puede visualizar el solape en superficie y en fondo que se va a producir entre dichas columnas. Con la fila superior (D y A) se pretende analizar un solape mínimo, con la fila inferior (E y B) se contempla la interferencia de ejes, y con la fila central se estudia la máxima desviación.

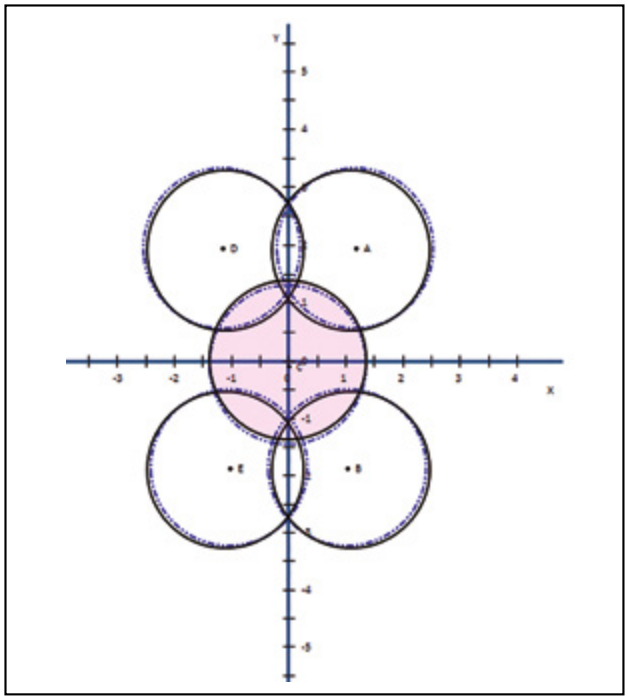


Figura 10. Esquema de la distribución de planta de la malla de columnas de jet grouting.

3. COMPROBACIONES RESISTENTES

El análisis estructural que se debe llevar a cabo consiste en el estudio del comportamiento del tapón a flexión, a cortante y el comportamiento entre el terreno tratado y el elemento estructural adyacente.

Las solicitaciones que intervienen en el cálculo (U, W_{TP}, W_{tseco}, W_{tsat}, F) se obtienen una vez determinados los valores del espesor y la profundidad del tapón de fondo. Una vez obtenidas las solicitaciones se procede a calcular los momentos flectores y cortantes en la sección del tapón de fondo. Para el análisis estructural se suele considerar un modelo plano con flexión bidireccional, teniendo en cuenta tanto las dimensiones en planta del tapón de fondo como la distribución uniforme de la subpresión de agua. Así determinamos los valores de los momentos flectores por metro lineal M_x y M_y (kN·m/m), así como los cortantes por metro lineal en ambas direcciones, Q_1 y Q_2 (kN/m). Se deben determinar los valores máximos, M_{MAX} y Q_{MAX}.

Además, se deben determinar los parámetros resistentes y de deformabilidad.

Por último, para realizar las comprobaciones estructurales, se debe utilizar un factor de seguridad, con un rango de variación comprendido entre 2,50 y 4,00, dependiendo del número de ensayos, de la disposición de los resultados y de la responsabilidad del elemento.

La comprobación a cortante consiste en corroborar que el máximo cortante admisible estructuralmente es mayor que el máximo cortante actuante en la sección. Se establecerá un factor de seguridad de 3.

$$Q_{adm}\left(kN/m^2\right)=\frac{RQ}{FS}>\frac{Q_{MAX}}{h_{TAPON}}$$

A flexión, se debe comprobar que la resistencia a tracción admisible, con un factor de seguridad de 3, es mayor que la máxima tensión de flexión. En la formulación se ha despreciado el término de flexión del axil, por simplicidad al estar del lado de la seguridad, pero se podría tener en cuenta, restándole a la parte del momento flector el término N/A.

$$RT_{adm}\left(kN/m^2\right)=\frac{RT}{FS}>\sigma_{FLEXION}=\frac{M_{MAX}}{W_{TAPON}}=\frac{M_{MAX}}{h_{TAPON}^2/6}$$

La comprobación del contacto entre el terreno tratado y el elemento estructural vertical consiste en verificar que el cortante o adherencia admisible entre estos dos elementos es mayor que el máximo cortante en la zona de contacto.

$$T\left(kN/m^2\right)>\frac{Q_{MAX}}{h_{CONTACTO}}$$

Si todas las comprobaciones realizadas son favorables, entonces el espesor determinado del tapón de fondo es el adecuado. En caso de no cumplirse alguna de las especificaciones, se debería aumentar dicho espesor hasta que cumpla todas y cada una de ellas.

3.4. Análisis de la eficacia del tratamiento

Se pretende analizar la eficiencia del diámetro de las columnas de jet grouting, para el caso del tapón de fondo, en función de las distintas profundidades, considerando diferentes porcentajes de desviación de dichos elementos formados tras el tratamiento de mejora del terreno. Para ello se propone el estudio de cuatro diámetros distintos: 1,5 – 2,0 – 2,5 – 4,0 metros, para cinco pares de valores de porcentaje de desviación y profundidad diferentes: (d_{MAX}=0%, h_{TAPON}=8 m.), (d_{MAX}=1,0%, h_{TAPON}=8 m.), (d_{MAX}=1%, h_{TAPON}=12 m.), (d_{MAX}=1,5%, h_{TAPON}=20 m.) y (d_{MAX}=2,0%, h_{TAPON}=30 m.). Cabe indicar que en el caso de grandes profundidades se ha analizado también el diámetro de 6 metros, ya que no son viables diámetros pequeños.

Se pretende analizar la eficiencia de diferentes diámetros de las columnas de jet grouting, a través del factor de seguridad en superficie obtenido con el cálculo, para una misma profundidad y desviación. Para ello, se ha fijado un solape en el fondo de 0,16 metros para todos los casos considerados. En la figura 11 se representan los esquemas explicativos del procedimiento de análisis, y en la tabla 4 se presenta un ejemplo de la tipología de tablas que se han desarrollado.

Siendo el factor de seguridad en superficie la relación entre solape y el radio a través de la siguiente expresión:

$$FS=\frac{S}{R}\cdot 100\%$$

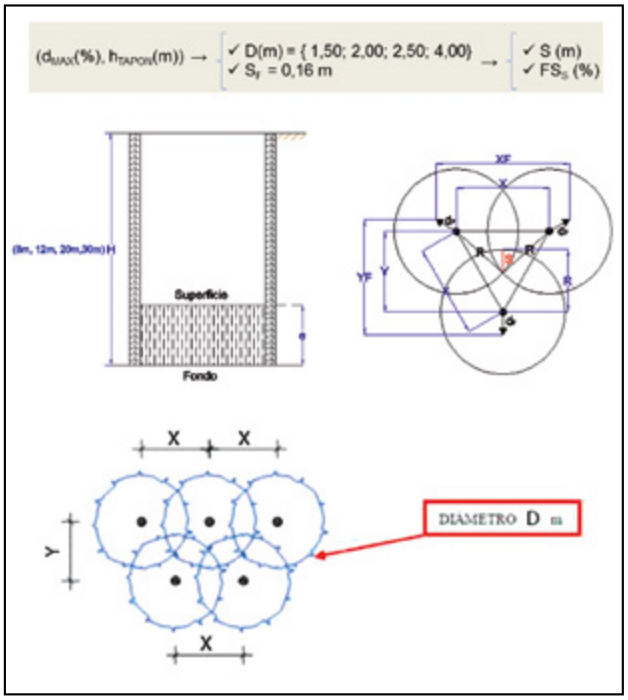


Figura 11. Esquemas explicativos del procedimiento de análisis.

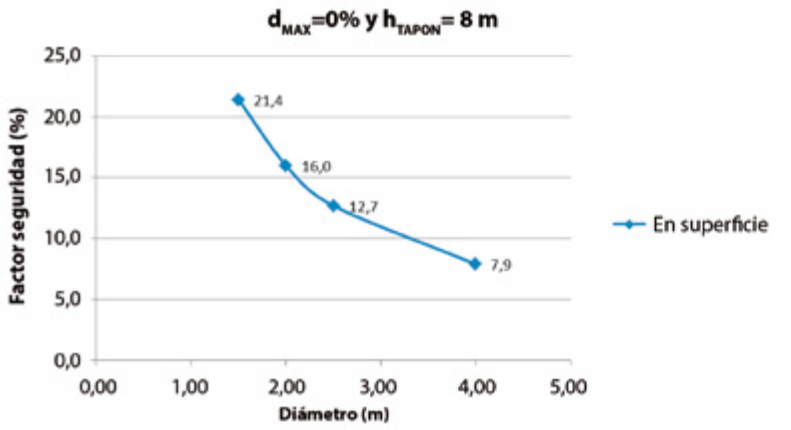
Cabe indicar que la eficiencia del tratamiento es inversamente proporcional a dicho factor de seguridad en superficie, es decir, a ↓ FS → ↑ eficiencia $_{tratamiento}$

A continuación se muestras parte de las gráficas obtenidas en el análisis de sensibilidad y los comentarios pertinentes a cada caso. Además, se presentan las distintas conclusiones obtenidas tras el estudio.

1. Al aumentar el diámetro de las columnas de jet grouting la eficiencia en la ejecución aumenta, siempre considerando un solape en el fondo fijo para poder comparar.
2. Por otro lado, se puede analizar la influencia de la desviación, observando para una misma profundidad diferentes porcentajes de desviación. De esta forma cuanto mayor sea el porcentaje de des viación mayor debe ser el factor de seguridad y por tanto menor será la eficiencia.

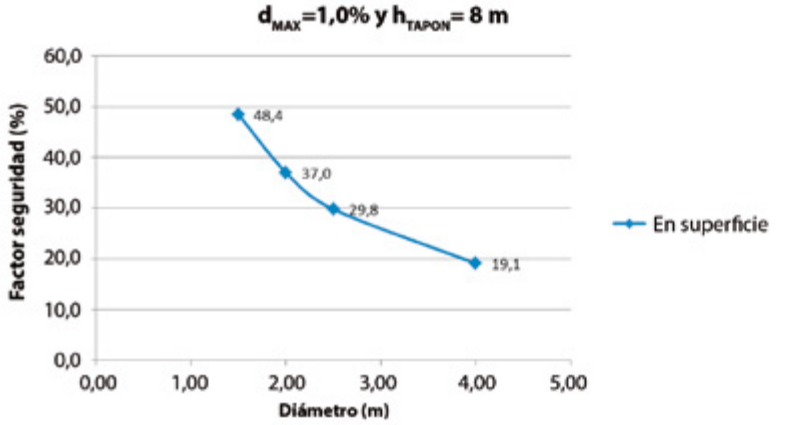
Tabla 4. Análisis de diferentes diámetros para $h_{tapón}$=8 m y d_{MAX}=1%

Para una h_{tapon} = 8 y d_{max} = 1%					
Diámetros D (m)	Solape en superficie S (m)	Solape en fondo S_F (m)	Factor de seguridad superficie FS_S	x (m)	y (m)
1,50	0,36	0,16	48,4	1,06	0,92
2,00	0,37	0,16	37,0	1,50	1,29
2,50	0,37	0,16	29,8	1,93	1,67
4,00	0,38	0,16	19,1	3,23	2,80



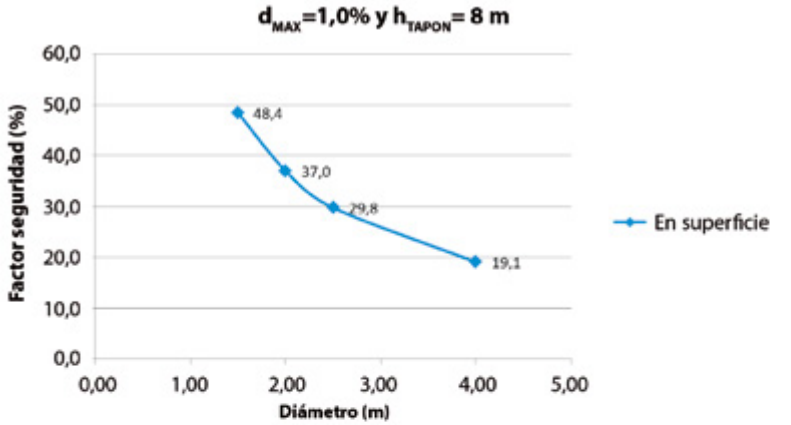
1. Influencia del diámetro

: ↑ D →↓ eficiencia



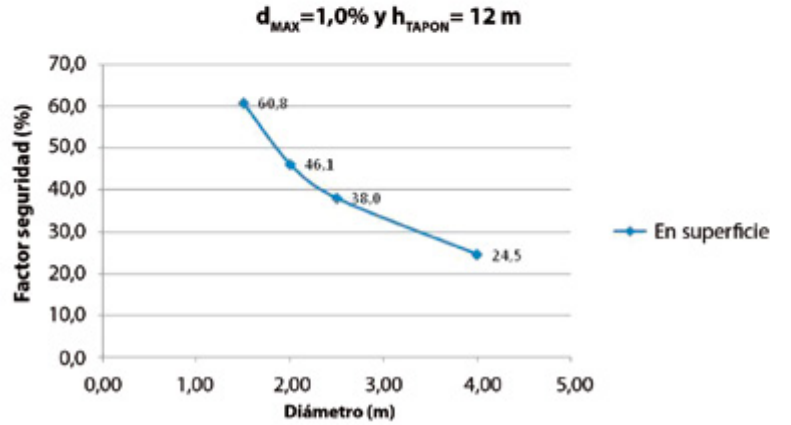
2. Influencia de desviación

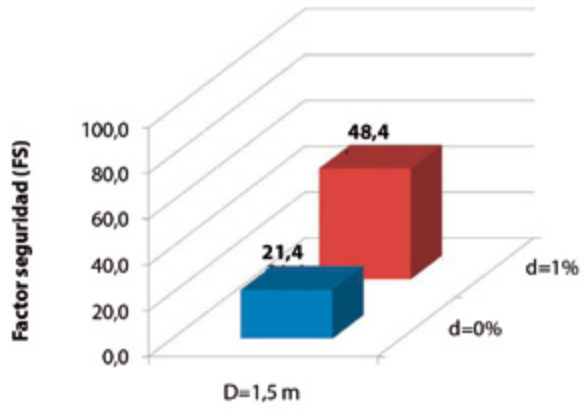
: ↑ d_{MAX} →↑ eficiencia

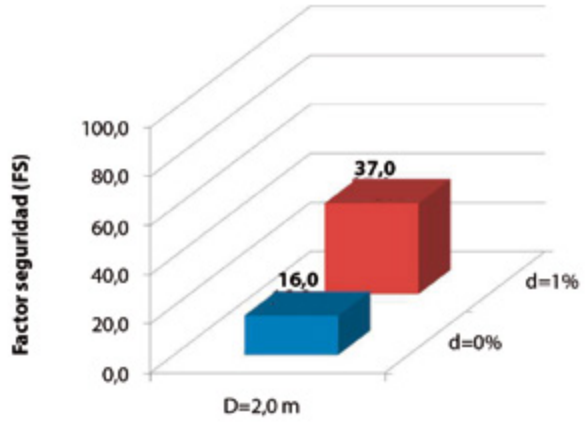


3. Influencia de la profundidad

: ↑ h_{TAPON} →↓ eficiencia

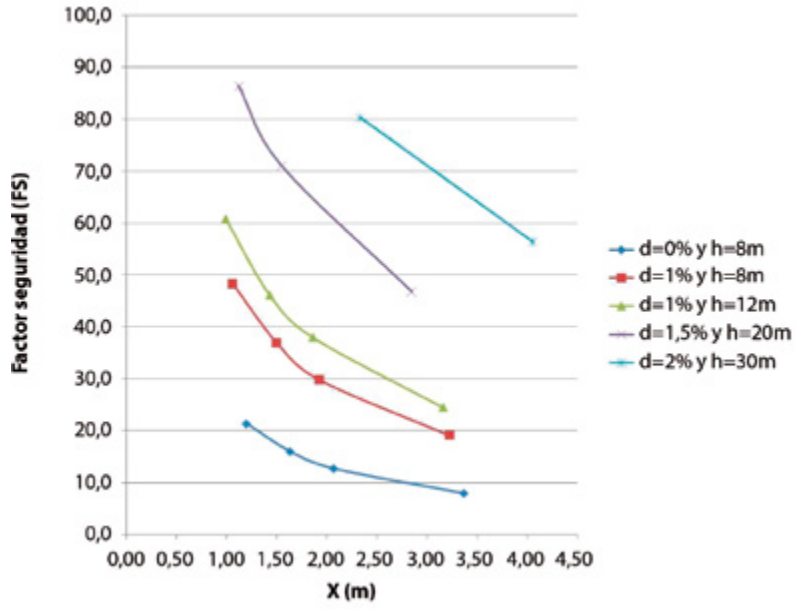






4. Influencia de la desviación y diámetro, conjuntamente

: ↑ d y ↑ D →↑ eficiencia

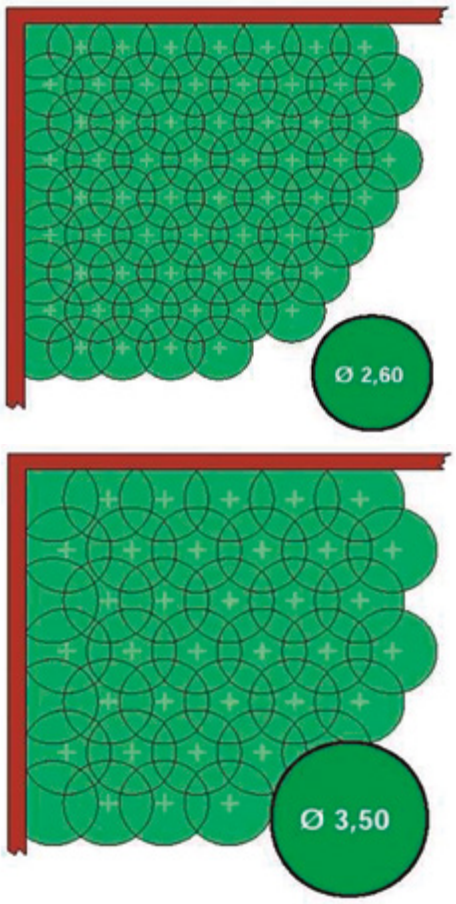


5. Influencia de las dimensiones de la malla de distribución:

Para valores pequeños de geometría de malla es muy importante la elección adecuada de las dimensiones

3. Además, para analizar la influencia de la profundidad de las columnas de jet grouting, se estudia para una misma desviación diferentes profundidades. Se obtiene que a mayor profundidad del tratamiento el factor de seguridad en superficie debe ser mayor, y por tanto menor será la eficiencia.
4. Con la gráfica anterior, se ha pretendido comparar las eficiencias en la ejecución en función de una doble entrada de parámetros: diámetro y porcentaje de desviación. Se puede observar que a mayor diámetro mayor eficiencia, con misma desviación; y a mayor porcentaje de desviación y mayor diámetro menor factor de seguridad o lo que es lo mismo, mayor eficiencia también.

Por tanto, para obtener una eficiencia mayor en el proceso de ejecución del jet grouting, cuando actúan como "tapones de fondo", es recomendable dimensionar con los mayores diámetros que nos permitan la geometría y la maquinaria de la que se disponga. Además, conviene calcular con los más adecua-



6. Influencia de la geometría del recincto en:

✓ Elección del diámetro
✓ Distribución en planta de las columnas:

Se deben comprobar diferentes mallas para evaluar cual se adapta mejor a la geometría del recinto

dos porcentajes de desviación posible, teniendo en cuenta que a la hora de ejecución será fundamental el control exhaustivo de dicho parámetro. Por último, es recomendable la elección de las menores profundidades de diseño posibles, siempre y cuando cumplan con el equilibrio necesario.

5. Analizando las dimensiones de la malla de distribución, y la relación de este parámetro con la eficiencia del tratamiento, se observa que son más eficientes las mallas de mayores dimensiones. Existe un punto, correspondiente a una distancia entre centros de columnas adyacentes de 2 metros aproximadamente, en el que se observa un cambio en la tendencia de comportamiento de la distribución de las mallas de jet grouting. Para valores menores el aumento del factor de seguridad es mucho más rápido, es decir, en valores pequeños de la geometría de mallas es más importante la elección adecuada de estas dimensiones, ya que una pequeña variación puede hacer disminuir mucho la eficiencia del tratamiento de jet grouting.
6. Como se ha mencionado anteriormente, para obtener una eficiencia mayor es recomendable dimensionar con los mayores diámetros que nos permitan la geometría y la maquinaria de la que se disponga. Sin embargo, conviene mencionar la importancia de la dependencia del diámetro y de la distribución en planta de las columnas respecto de la geometría del recinto. Es decir, en ocasiones, aunque un diámetro más grande cubre más volumen del terreno puede que las columnas perimetrales no quepan dentro del recinto, por el ancho o las dimensiones del mismo. Es por ello, que se suelen comprobar y dibujar diferentes mallas para ver la que mejor se adapta a la geometría del recinto, dentro de los rangos/diámetros de jet que permite el terreno a tratar.

4. CONCLUSIONES

Este artículo pretende establecer los criterios de cálculo que se deben adoptar en el diseño de las barreras hidráulicas como elementos reductores de permeabilidad.

Los parámetros fundamentales para el diseño/ejecución/control de las barreras hidráulicas que actúan como elementos reductores de permeabilidad son las características que tienen que ver con la geometría y la continuidad del tratamiento, como son la elección del diámetro adecuado y el porcentaje de desviación de las columnas durante la ejecución; y por otro lado el control de la verticalidad durante la ejecución.

Por tanto el objetivo del diseño de estos elementos es ver cómo afectan dichos parámetros mencionados en el párrafo anterior (diámetro, la distribución en planta, la continuidad de las columnas y la permeabilidad del terreno original) en la permeabilidad de la solución de jet grouting planteada. Para ello se deben analizar varios aspectos:

– Al determinar la distribución en planta de todas las columnas de jet grouting, se determina el solape necesario para garantizar la reducción de la permeabilidad y además que se ejecute con un determinado coeficiente de seguridad.

- Al establecer la estabilidad del tapón de fondo, es decir, el equilibrio de fuerzas, se obtiene la profundidad del tapón y su espesor.
- Al realizar las comprobaciones resistentes necesarias (flexión, cortante, y contacto entre material tratado y elemento estructural vertical) se debe verificar que se cumplen todas ellas.

Se ha analizado la eficiencia de diferentes diámetros de las columnas de jet grouting, a través del factor de seguridad en superficie obtenido con el cálculo, para una misma profundidad y desviación, fijando un solape en el fondo.

Por tanto, para obtener una eficiencia mayor en el proceso de ejecución del jet grouting, cuando actúan como "tapones de fondo", es recomendable dimensionar con los mayores diámetros. Además, conviene calcular con los porcentajes de desviación reales, teniendo en cuenta que a la hora de ejecución será fundamental el control exhaustivo de dicho parámetro. Por último, para aumentar la eficiencia global de un elemento reductor de permeabilidad horizontal es recomendable la elección de las menores profundidades de diseño posibles, siempre y cuando cumplan con el equilibrio necesario.

Por otro lado, conviene mencionar la importancia de la dependencia del diámetro y de la distribución en planta de las columnas respecto de la geometría del recinto. Se suelen comprobar y dibujar diferentes mallas para ver la que mejor se adapta a la geometría del recinto, dentro de los rangos/diámetros de jet que permite el terreno a tratar. Además, respecto a las dimensiones de la malla de distribución, son más eficientes las mallas de mayores diámetros.

Asimismo, es fundamental realizar un buen diseño del tratamiento de jet grouting, pero además, es importante también, una buena ejecución y un control exhaustivo de la verticalidad del tratamiento, factor imprescindible para el buen funcionamiento de la solución.

5. BIBLIOGRAFÍA

AETESS. (2002). Borrador de Guía para el diseño y ejecución de Jet Grouting.

Bielza, A. (1999). *Manual de Técnicas de Mejora del Terreno,* pp. 237-250.

Burke, G., Joshida, H. (2013). *Ground Improvement. 3nd edition.* Chapter 6: Jet Grouting. Edited by Klaus Kirsch and Alan Bell.

Croce, P., Flora, A. y Modoni, G. (2014). *Jet Grouting: Technology, Design and Control.* Taylor and Francis Group.

Delgado, C. y Panadero, S. (2012). *Curso de especialización en proyecto de estructuras de contención y cimentaciones especiales.* Módulo VI: Proyecto de estructuras especiales. Unidad Didáctica 20: Jet Grouting. Aplicaciones.

Essler, R. y Yoshida, H. (2004). *Ground Improvement.* 2nd edition. Chapter 5: Jet Grouting. Edited by M.P. Moseley & K. Kirsch.

Hayward Baker Geotechnical Contruction. (2002). "Jet Grouting".

Inui, T., Soga, K., JI, H. y Ando, Y. (2005). *Jet Grouting Technology*. Technical Information, 13th Edition. Japan Jet Grout Association.

Keller Grundbau GMBH. (2002). *Soilcrete Im Usikvereinsgebäude Wien.*

Keller Grundbau GMBH. "The Soilcrete^{R} – Jet Grouting Process". Brochure 67-03E.

Saurer, E., et al. (2011). *Grid space optimization of jet grouting columns.* Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Eds. Anagnostopoulos et al.

Vukotić, G. (2011a). *Actuaciones con Superjet-grouting en Pozo de Ventilación del TR. Sants-Sagrera LAV (Barcelona) y Aplicación del Método*

ADECO-RS en Túnel de Pozzolatico (Florencia). 11º Sesión Tratamientos en túneles y galerías, Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS.

Vukotić, G. (2014). *Jet Grouting.* Clases Máster Cedex año 2014.