

Mejora de suelos con la técnica de *Jet
Grouting*

Francisco J. Tsao Santín
e-mail: tsao@enelparaiso.org

25 de septiembre de 2008

Índice general

Prefacio	3
1. Descripción del procedimiento	8
1.1. Proceso general	8
1.2. Materiales	10
1.3. Maquinaria	12
2. Discusión de modelos y parámetros de diseño	16
2.1. Inyección de fluidos	17
2.2. La interfase entre el varillaje y el suelo	24
2.3. Interacción suelo-lechada	26
2.3.1. Filtración. Gravas	27
2.3.2. Erosión. Suelos arenosos	28
2.3.3. Erosión. Suelos arcillosos	29
2.4. Resistencia y permeabilidad	29
3. Conclusiones	32
Bibliografía	32
Pliegos e información web de empresas	35

Índice de figuras

1.	Jet grouting	5
2.	Columnas jet	6
1.1.	Esquema genérico de jet grouting	9
1.2.	Esquema de jet simple	10
1.3.	Esquema de jet doble con agua	11
1.4.	Esquema de jet doble con aire	11
1.5.	Esquema de jet triple	12
1.6.	Esquema de varillaje con broca de percusión	13
1.7.	Esquema de varillaje con broca rotatoria	15
2.1.	Parámetro λ de Kanematsu	19
2.2.	Relaciones agua/cemento, presión, caudal,número de toberas .	20
2.3.	Relación entre velocidad de retirada y diámetro de la columna	21
2.4.	Propiedades del agua inyectada en aire	25
2.5.	Resistencias según áridos y contenido en cemento	31

Índice de cuadros

1.	Principales variantes de jet grouting	7
2.1.	Parámetros de inyección	18
2.2.	Presiones y caudales en casos reales	22
2.3.	Parámetros de jet grouting y suelos reales	23
2.4.	Resistencias y diámetros según tipo de suelo, velocidad de elevación	30
2.5.	Permeabilidad y resistencia	30
2.6.	Resistencias standard	31

Prefacio

No está perfectamente documentado, pero parece que el uso de una técnica que combina la lechada de cemento con altas presiones para la formación de elementos de suelocemento in situ, sucedió por vez primera en el entorno de 1950. La ejecutora, la compañía Cementation Co. El lugar, Asia central, concretamente en Pakistán.

En las dos décadas siguientes la evolución principal de la idea se produjo en Japón, de la mano de los hermanos Yamakado, desde 1965, y de forma sobresaliente, con los trabajos en paralelo de Nakanishi y Yahiro[12].

El primero (1974) desarrolló una técnica que, dentro de una perforación, inyectaba lechada a alta presión con una boquilla, que iba girando y ascendiendo dejando a su paso una columna de suelocemento. A esta técnica se le llamó Chemical Churning Pile o CCP jet grouting.

Yahiro (1973) por su parte fue un poco más allá, y usó tres boquillas concéntricas en el proceso, utilizando agua, aire y la propia lechada para romper y mezclar el suelo con la mezcla de cemento. Esta técnica, ya exactamente denominada **jet grouting**¹, fue presentada al mundo [11] en el II Simposio de Jet-cutting en Cambridge, Inglaterra, en abril de 1974.

Durante los años 80, se extendió y desarrolló el uso de jet grouting en

¹Se han buscado diferentes traducciones de jet grouting al castellano: «inyecciones por chorro de lechada», «inyecciones de corte por tobera», «inyección con alta presión», pero ninguna parece más adecuada que el anglicismo para referirse a esta tecnología, ya que sólo la describe parcialmente [1]; como tampoco parece apropiado el uso del más extendido término «soilcrete», que en realidad, es el nombre de la marca que el grupo Keller utiliza para su producto, ya que está resaltando el material final y no el proceso de conversión y su estructura resultante.

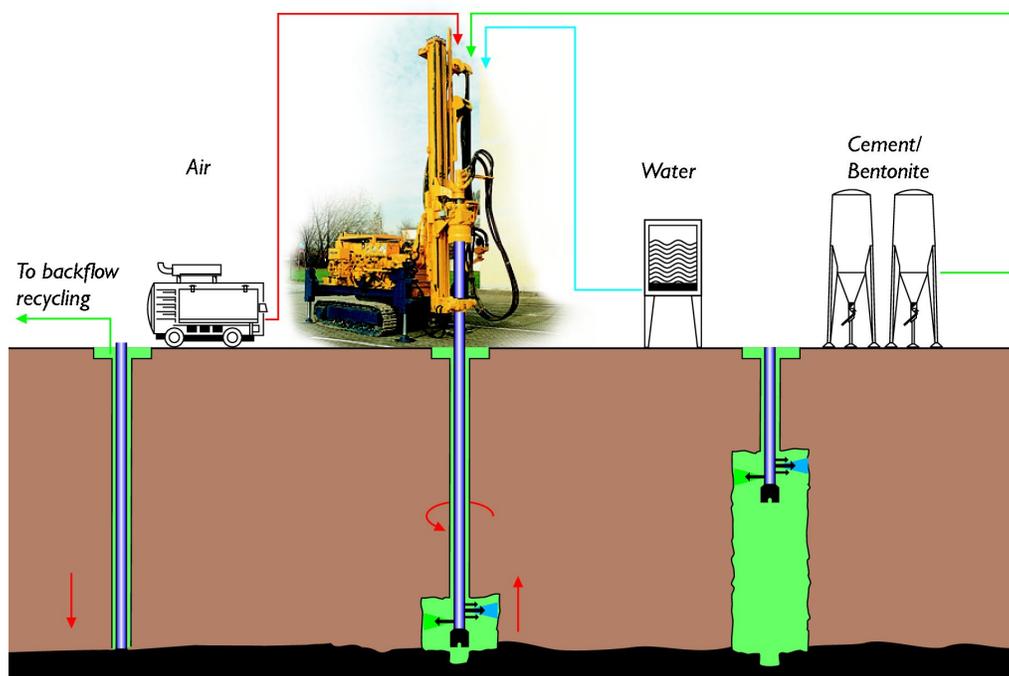


Figura 1: *Jet grouting. Keller Grundbau GmbH*

Europa. [12] Al requerir de maquinaria un tanto especializada², tiene lógica que esa expansión se haya producido desde un reducido grupo de compañías: Keller en Alemania, Soletanche-Banchy en Francia, Rodio y C. y Pacchiosi en Italia.

El último progreso que supone un salto cuantitativo, se produce a finales de los 80, y se sigue desarrollando desde principios de los 90. Es el llamado *crossjet grouting*. Este método consiste en cruzar dos chorros a alta presión, con el efecto de homogeneizar el ancho de la columna incluso en suelos estratificados. Esta mejora, junto con la aparición de máquinas que permiten mayor caudal a mayor presión, ha permitido alcanzar anchos del orden de los 8-9 metros de diámetro.

Pero, ¿y qué es lo que se busca con el jet grouting? Principalmente, mejora

² hoy en día resulta relativamente fácil adaptar una máquina de ejecución de micropilotes para realizar jet grouting, con lo que la exclusividad se ha perdido [1]



Figura 2: *Columnas jet. Earth Tech Geotechnical Construction Services*

de las capacidades portantes e impermeabilización de suelos. Su **versatilidad** le ha permitido ser usada en mejoras en el anclaje de muros, recalce de zapatas, lechos de apoyo a pilotes, impermeabilización de presas y túneles...

El presente documento³, pretende, sin ser exhaustivo con el estado del arte, dar una idea de las posibilidades del jet grouting. Para ello, se describirán procedimientos, materiales y maquinarias, y se discutirán modelos y bases del diseño, según las experiencias y desarrollos técnicos de distintos investigadores y empresas.

³Este texto formaba parte originalmente de un trabajo académico para la asignatura *Cimentaciones especiales* en la Escuela de Ingenieros de Caminos de la Universidad da Coruña, impartida por el ingeniero Luis Carmona, actualmente en Arias Hermanos. Sus buenas críticas me motivaron para hacerlo público.

Original Japanese Name	Principle of Operation	Jetting Pressure (P)(MPa)	Jetting Nozzle Dia. (D _j) (mm)	Rod Rotation (R)(rpm)	Anticipated Column Dia. (m)	Mix in Place Replacement	Notes
Jet Grout (JG)	Upper water & lower grout jet	20	1	None	-	>90% replacement	1. Panels only; soon to be obsolete. 2. Prebored holes 0.8-1.5m apart.
Chemical Churning Pile (CCP)	Single grout jet	20-40	1.2-3.0	20	0.3-0.6 (0.4-0.5)	Mix in place ≈ 40% replacement	1. Chemicals now replaced by cement. 2. Similar to Rodinjet 1.
Jumbo Special Grout (JSG)	Single jet of grout enveloped in air.	20	3.0-3.2	6-10	0.6-2.0	Mix in place ≈ 20-30% replacement	1. Originally called Jumbo Special Pile (JSP) but name changed for patent reasons. 2. Similar to Rodinjet 2.
Column Jet Grout (CJG)	Upper water & air jet & lower grout jet	40-50	1.8-3.0 (upper) 3.0-5.0 (lower) (8 to 9mm in Kajima system)	5-15	0.8-3.0 (1.0-1.5)	50-80% replacement	1. Similar to Rodinjet 3 or Kajima/GKN Keller Triple Soilcreeing system or Sanathin LBH Triple Tube Method.
Mini Max (MH)	Like CCP but uses special "chemical Colime" cement	20	1.2	20	0.8-1.6		1. Specially for very weak soil & organics (eg. soft peaty clay under water).
Jumbo MiniMax (JMH)	As for MH except for addition of 20-40cm wing jet	20	1.2	20	0.2		1. Specially for very weak soil & organics (eg. soft peaty clays under water).
Super Soil Stabilisation Management (SSS-Man)	Air water jet used to excavate volume completely underwater. This is then surveyed ultrasonically. If okay, then treated full of desired grout material	20-60	2-2.8	3-7	2.0-4.0	Total replacement >80%	1. To provide absolute control over shape & composition of column. 2. Effective to over 70m depth. 3. Most expensive technique but ensures desired performance.

Cuadro 1: Principales variantes de jet grouting. Covil y Skinner [6]

Capítulo 1

Descripción del procedimiento

La unidad elemental de una actuación con jet grouting es la columna. Puede ser más corta, en lechos para pilotes, o más larga, bajo zapatas; inclinada en anclajes o vertical en impermeabilización; individuales o solapadas, formando pantallas, bóvedas o macizos. Pero en todos los casos, la *jetcolumna* se ejecuta de la misma manera.

1.1. Proceso general

En primer lugar, se realiza un taladro, del orden de 10 cm de diámetro. Una vez que se ha llegado a la longitud deseada, comienza el proceso de inyección de fluidos, que salen a alta velocidad por toberas laterales que giran y ascienden solidarias al tubo de perforación en su lenta extracción. Los fluidos van disgregando el suelo y mezclándolo con la lechada de cemento.¹

Habitualmente parte de la mezcla de lechada, agua y suelo, rebosa (*spoil*). Esto permite realizar un cierto control de calidad, asegurándose de que se van rellenando los huecos.

Finalizada la extracción del varillaje, no hay más que dejar fraguar la columna.

¹En suelos cohesivos se puede ejecutar un proceso de *pre-jetting* o *precorte* del suelo sólo con agua/aire, para facilitar el arrancamiento y la mezcla en el jet-grouting propiamente dicho

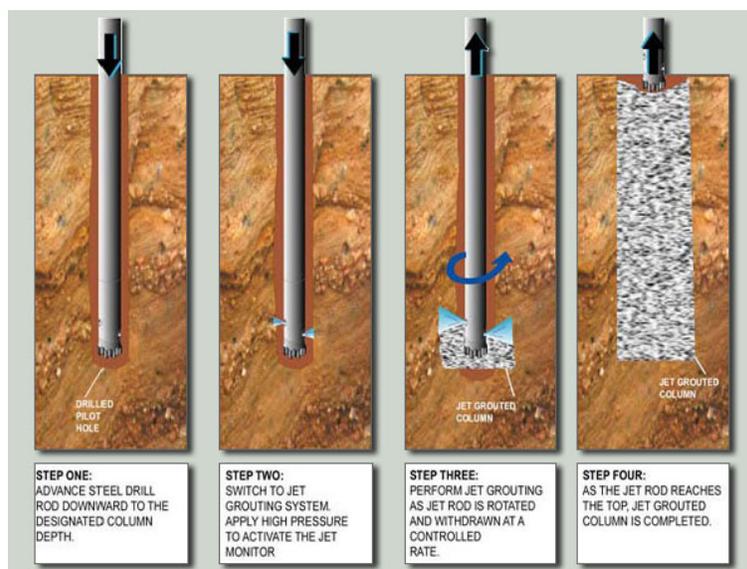


Figura 1.1: Esquema genérico de jet grouting. Layne Christensen Company

Hasta aquí, se ha descrito el proceso *tradicional*. Sobre éste, se pueden realizar determinadas mejoras, v.g. el uso de aire comprimido, como se ha indicado previamente. De entre éstas variaciones, hemos de destacar una propuesta que mejora la economía de lechada empleada, lo que tiene especial incidencia en la coyuntura actual.

Desde hace unos años se viene proponiendo una serie de mejoras para optimizar la eficiencia en el corte y mezcla, que en según que condiciones de suelos pueden resultar insuficientes, así como la resistencia de la columna resultante de la mezcla de suelo y lechada, especialmente cuando el trabajo se realiza sobre estratos muy diferenciados.

Frente a estos posibles problemas, que encarecen la mejora del suelo especialmente por un uso excesivo de cemento, la Academia de Investigación Geológica de Moscú apunta como soluciones [2] el uso de un dispositivo de generación de vórtices, para mejorar la hidrodinámica del proceso; y la extracción y clasificación del suelo arrancado, sustituyéndolo parcial o totalmente por otro material más resistente (arenas, típicamente), para resolver el problema de la resistencia de la mezcla resultante.

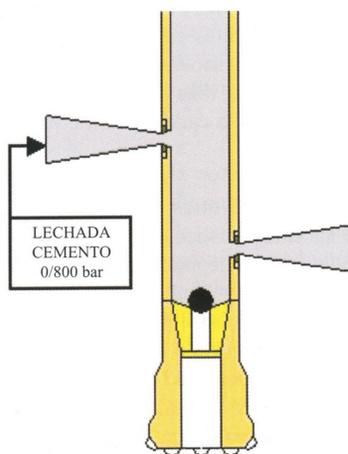


Figura 1.2: *Esquema de jet simple. Rodio Cimentaciones Especiales*

1.2. Materiales

Según los materiales usados, hay tres variantes de jet-grouting. El sistema básico es el de fluido simple (fig. 1.2), que usa lechada para cortar el suelo además de como material estructural.

El de doble fluido introduce agua (fig. 1.3) o aire a alta presión (fig. 1.4), y finalmente, el sistema de triple fluido (fig. 1.5) utiliza agua en el interior de un chorro de aire comprimido, para el corte del suelo.

La lechada, además de agua y cemento, puede incluir bentonita en la mezcla. Este material también se puede usar durante la perforación, cuando hay problemas de agarre de varillaje a profundidades importantes, lechada sola si hay problemas de desprendimientos, espuma en suelos abiertos, o simplemente aire y agua de limpieza[14], [1].

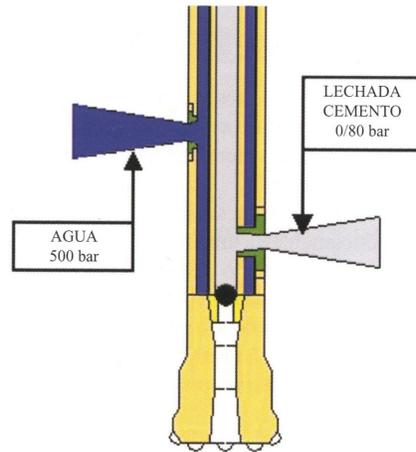


Figura 1.3: *Esquema de jet doble con agua. Rodio Cimantaciones Especiales*

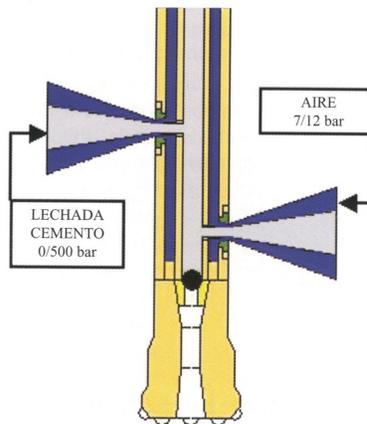


Figura 1.4: *Esquema de jet doble con aire. Rodio Cimantaciones Especiales*

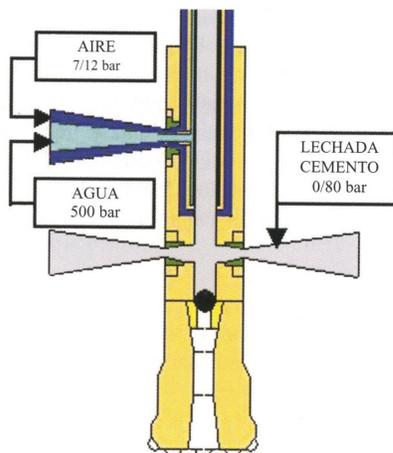


Figura 1.5: Esquema de jet triple. Rodio Cimantaciones Especiales

1.3. Maquinaria

Como ya se ha podido deducir de la descripción del proceso, la maquinaria necesaria se compone de un varillaje de diámetro adecuado en relación a la longitud útil de corte, para la evacuación del *spoil*, los elementos mecánicos mueven y regulan el varillaje en rotación y traslación desde el carro de perforación, y las bombas para dar la adecuada presión al fluido en el interior.

Sobre el diámetro del varillaje, podemos establecer relaciones de longitud útil de corte/diámetro del orden de 75/60, 110/90...[1]

El varillaje va rematado con un tricono o trialeta que permiten realizar el sondeo. Por encima de este elemento, se sitúan las toberas de inyección, del orden de 1.8 a 5 mm de diámetro, responsables de la alta velocidad que adquieren los fluidos. Estas toberas son concéntricas en el caso de sistemas multifluído, y deberán, además, tener una resistencia mecánica adecuada para recibir impactos de los áridos. Por lógica, forma parte también del mismo sistema hidráulico del jet, el dispositivo para la inyección de fluidos de sondeo, que puede ir en el portatoberas o añadiendo una tobera sobre la trialeta de

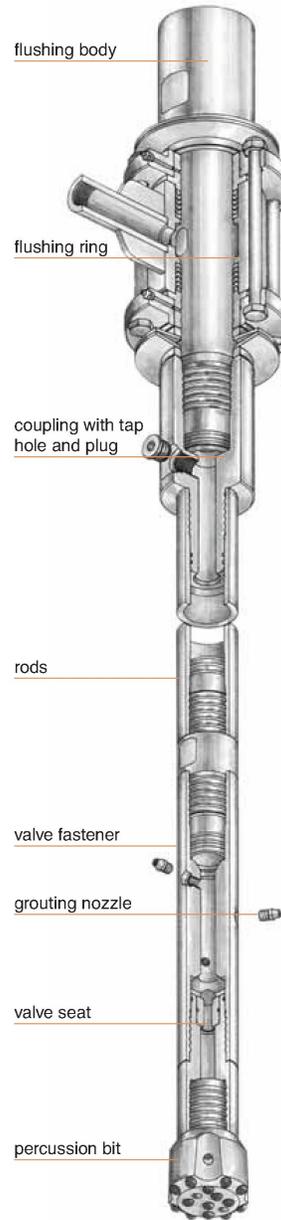


Figura 1.6: Esquema de varillaje con broca de percusión. Boart Longyear

perforación.

Las velocidades de retirada y giro del varillaje dependen del tratamiento que se quiere realizar, pero son del orden de 20 a 80 cm/min y 10 a 30 r.p.m.[11]; sobre presiones y caudales profundizaremos un poco más, mencionar que actualmente hay máquinas que son capaces de alcanzar los 70 mpa y 650 l/s [12].

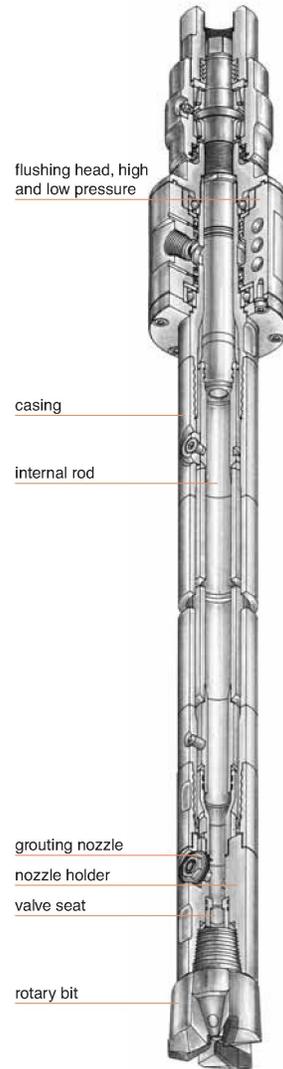


Figura 1.7: Esquema de varillaje con broca rotatoria. Boart Longyear

Capítulo 2

Discusión de modelos y parámetros de diseño

Existe un amplio debate sobre los parámetros de diseño de un proyecto de ejecución con jet grouting. Esto se debe fundamentalmente a la tendencia de cada empresa de desarrollar experimentalmente sus procedimientos, centrándose en su ámbito geográfico de actuación, y a la escasa documentación completa sobre ellos: se pueden encontrar *recetas* en las que se definen poco o nada las características de los suelos sobre los que se emplean. Hay autores que señalan al jet grouting como la solución a cualquier situación, mientras que otros delimitan excesivamente su campo de actuación.

Como referencias recientes en este capítulo señalamos a Covil y Skinner (1994)[6], que empezaron a poner algo de orden intentando extraer unas recomendaciones del estado del arte de aquel momento, que ellos mismos redactaron. Afinaron un poco más Croce y Flora (2000)[3], marcando tres puntos de aproximación para el análisis del sistema de fluido simple:

- el fenómeno físico
- las variables que influyen en el resultado final
- los suelos adecuados para practicar jet grouting

para lo cual, se hicieron con tres casos de estudio. En aquel momento, Van Der Stoel (2001) [12] parece ignorar la existencia de este intento de estudio unificador, y predice que pueden pasar muchos años hasta la consecución de

un modelo fiable de jet-grouting, por lo que se decanta por una vía más empírica, con unos coeficientes de seguridad de 2-3. Es posible que este modelo llegue más rápidamente desde el trabajo teórico-experimental de Modoni, Croce y Mongiovi (2006)[4].

Siguiendo el orden de Croce y Flora (2000)[3], hacemos una descripción del fenómeno en cuatro pasos: la inyección, el chorro, la interacción con el suelo, y finalmente, hablaremos sobre qué podemos esperar del material fraguado.

2.1. Inyección de fluidos

En los parámetros que caracterizan la inyección de lechada, podemos distinguir, por una parte, los referentes a la máquina (mecánicas: longitud de varillaje, características de las toberas; operativas: presión de impulsión, velocidad de salida de chorro, velocidad de retirada y de giro del varillaje), y por otra, las características de la lechada en sí (propiedades del cemento, relaciones agua/cemento, y la uniformidad de la mezcla).

Poco se puede decir del primer tramo de la lechada, más que la importancia de una mezcla uniforme y unas características físicas del polvo de cemento y densidad de la lechada adecuadas para que no haya problemas al salir a altas velocidades por los finos orificios de las toberas. Es importante saber la relación entre la presión de impulsión y la velocidad del chorro, ya que las pérdidas de carga pueden ser importantes, y varían de una maquinaria a otra.

La velocidad inicial a la salida de la tobera es[8]:

$$V_0 = m\sqrt{2gp_0} \quad (2.1)$$

$$Q = VA = m\sqrt{2gp_0}\frac{\pi}{4}d^2 \quad (2.2)$$

Biosca (1997) [1] sugiere como parámetros habituales de bombeo de 1 a 3 l/s, con densidades de lechada entre 1.5 y 1.65, para maquinarias con

Parámetros de trabajo	1 fluido	2 fluidos (aire)	2 fluidos (agua)	3 fluidos
Presión lechada (Mpa)	30-50	30-50	> 2	> 2
Caudal lechada (l/min)	50-450	50-450	50-200	50-200
Presión agua (Mpa)	–	–	30-60	30-60
Caudal agua (l/min)	–	–	50-150	50-150
Presión aire (Mpa)	–	0.2-1.7	–	0.2-1.7
Caudal aire (l/min)	–	3-12	–	3-12

Cuadro 2.1: *Parámetros de inyección. Eurocódigo EN12761*

bombas de 350 a 500 CV, orificios de salida de entre 1.8 y 5 mm. Por otra parte, el Eurocódigo EN12761 propone los rangos del cuadro 2.1. En la misma línea, Covil hace una recopilación de estos mismos parámetros, en casos reales documentados (cuadro 2.2).

Como fórmulas de aplicación directa, Covil [6] señala un par de fórmulas ajustables empíricamente:

$$Q = 1/4\pi D^2 H \lambda (1 + \beta) \quad (2.3)$$

donde λ es el parámetro empírico de Kanematsu (figura 2.1) [6] y β la pérdida de carga; el volumen de suelo erosionado V_e

$$V_e = 0,04\pi R_a^2 L_s (m^3/s) \quad (2.4)$$

con R_a el radio del jet y L_s la velocidad de retirada (en *cm/min*)

Un paso más es establecer relaciones entre diámetros de toberas, tipos de técnica, relación agua/cemento, densidad de la lechada, presión, caudal... la figura 2.2 es una propuesta de TekTracker .

Y lógicamente, hay que relacionar los parámetros del procedimiento con las características del suelo. Una vez más, la tesis doctoral de Covil (1991) [7] es una gran referencia de casos documentados (cuadro 2.3). También se marcan otros parámetros importantes en el resultado final, como son la velocidad de retirada y rotación del varillaje. Sobre éstos, ya hemos dado unos órdenes de magnitud al hablar de maquinaria en el capítulo anterior, pero es importante resaltar la gran variación en las velocidades de retirada según los

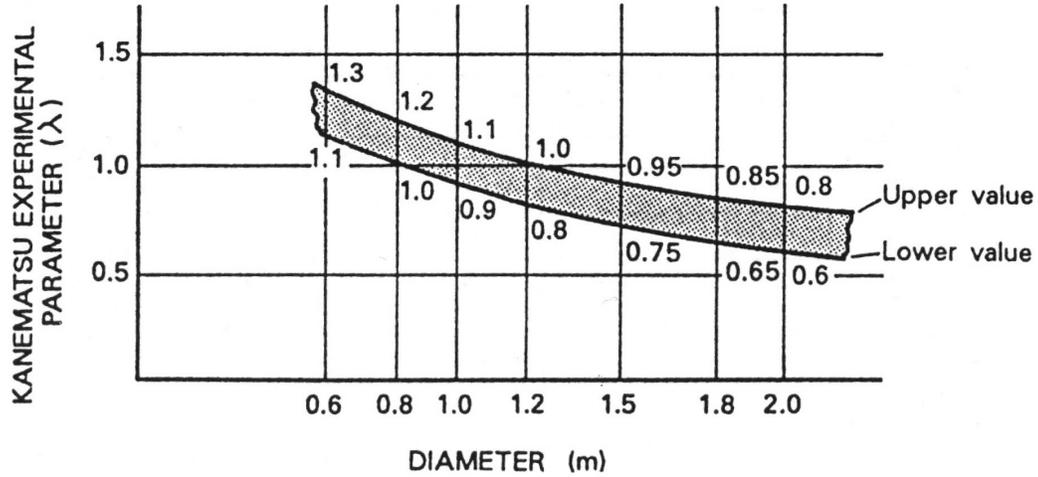


Figura 2.1: Parámetro λ experimental de Kanematsu. Covil[6]

suelos (y el efecto que se obtiene, más destacado en la figura 2.3).

Sin demasiadas explicaciones[15], Zege, Broid, Antonov y Sin'ko, proponen dos fórmulas aproximadas para prever el diámetro D (en metros) de la columna. La primera, para suelos no cohesivos:

$$D = \sqrt{\frac{\left[Q_g \frac{1}{\nu_y} - \frac{\pi}{4} d^2 \left(1 - n + \frac{w_0}{\rho_w} \right) \right] (\rho - \rho_g)}{\frac{\pi}{8} \left(1 - n + \frac{w_0}{\rho_w} \right) (\rho_{r0} - 2\rho + \rho_g) + 2(\rho - \rho_g)}} \quad (2.5)$$

Y lógicamente, la segunda, para suelos no cohesivos:

$$D = \sqrt{\frac{8}{\pi} \left[Q_g \frac{1}{\nu_y} \frac{\rho - \rho_g}{\rho_{r0} - \rho_g} + \frac{\pi}{4} d^2 \left(2 - \frac{\rho - \rho_g}{\rho_{r0} - \rho_s} \right) \right]} \quad (2.6)$$

donde Q_g es el flujo de lechada en una tobera, ν_y es la tasa de ascenso efectivo del jet, d es el diámetro del taladro, n la porosidad natural del suelo, w_0 es la humedad natural del suelo (en unidades de masa de agua por

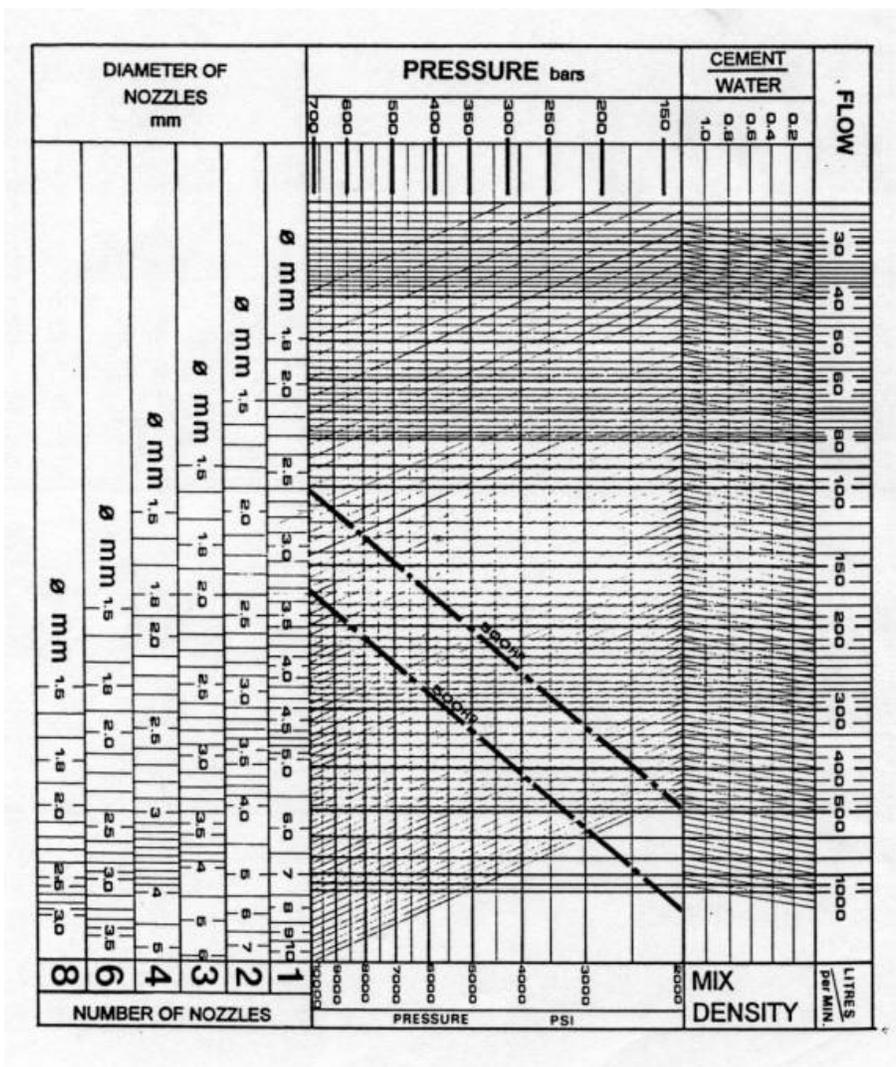


Figura 2.2: Relaciones agua/cemento, presión, caudal, número de toberas. TekTracker

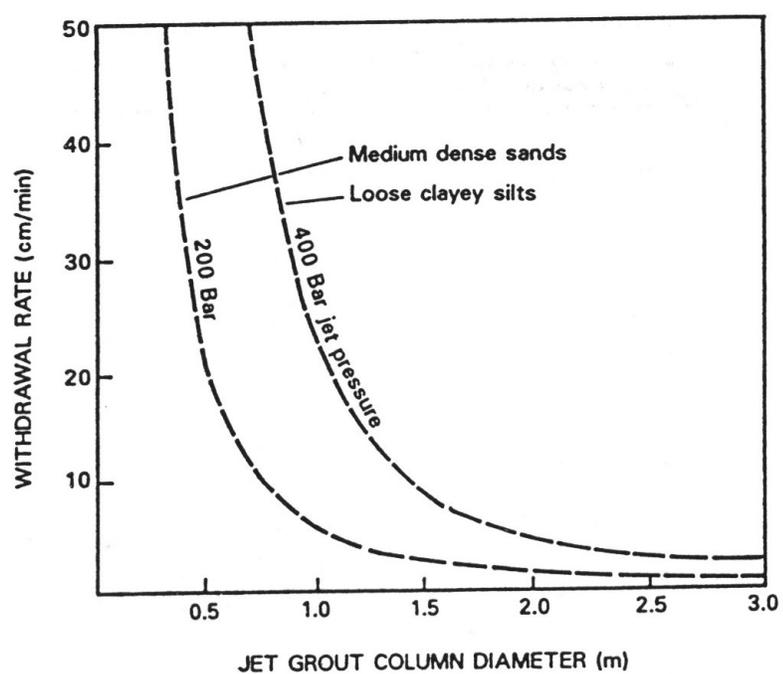


Figura 2.3: Relación entre velocidad de retirada y diámetro de la columna, para sistema de triple fluido, de Coomber [5] según Covil[7]

Air Pressure (MPa)	Air Flow (l/min)	Water Pressure (MPa)	Water Flow (l/min)	Grout Pressure (MPa)	Grout Flow (l/min)	Reference
0.7	2000	35-40	70	-	160	Coomber & Wright (14)
0.7	400-1000	NA	NA	20	60	Miki (15)
0.5	-	40	90	15	105	Covil & Newman (16)
	1000	40-50	50-70			Broid et al* (12)
	2000-4000	6-7	120-150			Broid et al (12)
NA	NA	40	70	-	180	Coomber (4)
0.6-0.7	1000-3000	1-2	30-40	20	60	Berry et al (17)
NA	NA	20-30	65	0.5-2	70	Berry et al (17)
1.2		7.8			60	Bruce (2)
0.7	4000	NA	NA	20.7	120	Gutteri et al (10)
0.7	4000	NA	NA	24-27.6	130-140	Gutteri et al (10)
0.8	-	40	60	0.8	-	Greenwood (9)
NA	NA	NA	NA	20-40	180	Greenwood (9)
0.7	1000-3000	30	65	0.5-2.0	70	Ove Arup (18)

Cuadro 2.2: Presiones y caudales en casos reales. Covil[7]

volumen de suelo), ρ_w es la densidad del agua, ρ_g la densidad de la lechada, ρ la densidad de la mezcla de lechada y suelo expulsada, ρ_{r0} la densidad de suelo erosionado y agua contenida en sus poros ($\rho_{r0} = \rho_p(1 - n) + w_0$, con ρ_p densidad de las partículas de suelo); todo en unidades del S.I.

Croce y Flora[3] indican, en el análisis del sistema de fluido simple, dos expresiones de relación de parámetros. La primera, está realizada desde el enfoque práctico, calculando la energía E_n en las toberas:

$$E_n = \frac{mv_n^2}{2L} = \frac{8\rho_g Q^3}{\pi^2 M^2 d^4 v} \quad (2.7)$$

donde m es la masa total de lechada para el intervalo de tiempo, v_n es la velocidad en las toberas, L es la longitud de columna, ρ_g es la densidad de

Soil Stratigraphy	ID No.	Meter/Grout Pressure (MPa)	Nozzle Diameter (D _j) (mm)	Type of Jet Grouting [1] [2] [3]	Withdrawal Rate (L _w) (cm/min)	Rotation Rate (rpm) (°) [no of nozzles]	Grouted Volume (m ³ /m)	Column Diameter (m)	Source of Reference
Soft Rock	1	39.30-44.95			2.3-9.4		0.14-0.17	0.47-0.46	Yahiro et al (21)
Thames Dense Gravels SPT (15-70)	2	50.00	2.4-2.8	[2]					Unpublished data
	3			[2]	10.0-16.7m		0.79-1.54	1.00-1.40	Unpublished data
Dense Sand and Gravel	4	39.30-48.95			3.0-11.7		0.15-0.18	0.43-0.47	Yahiro et al (21)
	5	34.47-41.36			30.5		0.29-1.82	0.60-1.52	Engineering News Record (23)
Rhine Gravels and Silts (SPT 15-70)	6	41.00	2.6		15.0	10[1]	1.77	1.50	Ground Engineering (23)
	7		2.4-2.8	[2]	12.5			1.20	Unpublished data
Sands, Silts and Gravels	8	30.00-45.00	2.4	GON [3]	10.0-50.0	2-20 [1]	0.79	1.00	Hobbs (24)
Medium Dense Sand and Gravels	9	35.00-40.00		GON [3]	8.0	8 [1]	1.77	1.50 (1.7-1.9)	Coomer & Wright (14)
Medium Dense Sand	10	39.30-48.95			13.2-23.1		0.17-0.24	0.46-0.55	Yahiro et al (21)
	11	20.00-40.00			9.9-50.0		0.13-1.54	0.41-1.40	Malsh et al (11)
	12	38.61			91.4		0.19	0.49	Engineering News Record (25)
	13	30.33			39.9		0.28	0.60	Aschieri et al (26)
	14	39.30-48.95			50.0-119.9		0.06-0.60	0.33-0.88	Yahiro & Yoshida (20)
	15	5.52-6.89			39.9-59.9		0.20-1.00	0.51-1.13	Broid et al (12)
Fine to Medium Sand	16	20.68	3.0	CCP[1]	8.3	18[1]			Guattari et al (10)
	17	28.95	2.2	CCP[1]	34.5	18[2]	0.44-0.50	0.75-0.80	Guattari et al (10)
	18	28.95	2.2	CCP[1]	17.25	18[2]	0.57-0.64	0.85-0.90	Guattari et al (10)
	19	40.00	2.6	GON[3]	10.0-17.0	10[1]	1.13	1.20	Covil & Newman (16)
Loose Sand	20	39.30-48.95			23.1-28.7		0.22-0.25	0.53-0.56	Yahiro et al (21)
	21	50.0			30.0	22.5	0.44	0.75	De La Fuente et al (27)
Silty Clay	22	28.95		CCP[1]	34.50	18[2]	0.33-0.38	0.65-0.70	Guattari et al (10)
	23	28.95		CCP[1]	17.25	18[2]	0.44-0.50	0.75-0.80	Guattari et al (10)
Sandy Clay	24			[2]	16.7			1.00	Bauer Promotional Material
Silt	25			[3]	4.0	5[1]			Riddell (28)
Clayey Silt	25	20.68		CCP[1]	62.5	18[1]			Guattari et al (10)
	26	20.68		CCP[1]	55.5	18[1]			Guattari et al (10)
	27	20.68		CCP[1]	50.0	18[1]			Guattari et al (10)
	28	20.68		CCP[1]	33.3	18[1]			Guattari et al (10)
	29	20.68		CCP[1]	8.3	18[1]			Guattari et al (10)
	30	20.68		CCP[1]	5.5	18[1]			Guattari et al (10)
Clay and Silt	31	39.30-48.95			31.0-38.6		0.24-0.27	0.55-0.59	Yahiro et al (21)
	32	20-40			9.9-50.0		0.13-1.54	0.41-1.40	Malsh et al (11)
	33	30.33			39.9		0.28	0.60	Aschieri et al (26)
Clay and Silt (cont'd)	34	39.30-48.95			50.0-119.9		0.06-0.54	0.29-0.83	Yahiro & Yoshida (20)
	35	5.52-6.89			39.9-59.9		0.07-0.40	0.31-0.71	Broid et al (12)
Fine to Medium Sand with Clay	36	36.54			23.8	18.0	0.44	0.75	Guattari et al (10)
	37	40.00	2.0-3.0		40.0	15-20	0.225	0.27	Bertero et al (29)
Clay	38	28.95	2.2	CCP[1]	34.5	18[2]	0.24-0.28	0.55-0.60	Guattari et al (10)
	39	28.95	2.2	CCP[1]	17.25	18[2]	0.33-0.38	0.65-0.70	Guattari et al (10)
Stiff Clay	40			[3]	12.5		1.54	1.40	Unpublished data
Peat	41			[1][2][3]			3.14	2.00	Bruce (2) De Paoli et al (30)
Loose Sand, Medium Dense Sand to Dense Sand & Gravel	42	20-40	2.0-4.0		4.0-1.00	8-12			Launey & Poret (31)

Notes:
Type of Jet Grouting: [1] grout only; [2] water & grout; [3] air, water & grout

Cuadro 2.3: Parámetros de jet grouting y suelos reales. Covil[7]

lechada, Q es el caudal de lechada, M el número de toberas, d su diámetro y v la velocidad de elevación.

La segunda expresión se basa en un primer intento de modelo teórico, comprobada experimentalmente, y cuya intención es acercar el diseño a la realidad del fenómeno físico:

$$V = \frac{\alpha}{\delta(n + \beta - n\beta)} V_j \quad (2.8)$$

En este caso, V es el volumen por unidad de longitud de columna, α el porcentaje volumétrico de lechada retenida por el subsuelo, β el porcentaje volumétrico de subsuelo arrancado por el tratamiento, δ el porcentaje de poros rellenados por la inyección, n la porosidad original, y V_j es el volumen de lechada inyectado por unidad de longitud. Ya considerando la columna resistente:

$$V = \frac{k\alpha}{n + \beta - n\beta - n_{sc}} V_j \quad (2.9)$$

expresión en la que aparecen nuevos parámetros, k , relación entre cemento hidratado y lechada retenida, y n_{sc} , porosidad definitiva del jet. Sobre k :

$$k = \frac{(1 + r_s)\rho_g}{(1 + r_g)\rho_{hc}} \quad (2.10)$$

r_s es la relación agua-cemento (del orden de 0.30), r_g la relación agua-cemento de la lechada, ρ_{hc} es la densidad del cemento hidratado (unos 25.5 kN/m^3).

2.2. La interfase entre el varillaje y el suelo

El paso siguiente para comprender la acción del jet en el suelo, es ver el comportamiento de la inyección de los fluidos. Para ello, la figura 2.4 nos orienta, distinguiendo en tres zonas [6]: la zona 1, en la que la presión hidrodinámica es constante, que es un pequeño espacio más allá de la boquilla; la zona 2, o zona de influencia del jet, del orden de unas 300 veces el diámetro de la tobera; y la zona 3, a partir de la cual los efectos de la presión hidrodinámica caen exponencialmente y dominan los fenómenos de

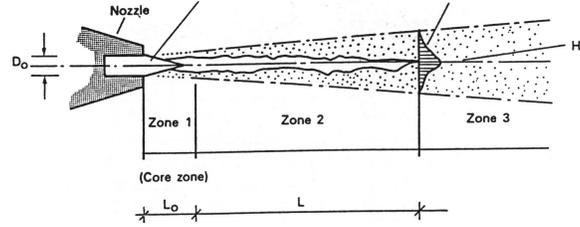


Figura 2.4: *Propiedades del agua inyectada en aire, después de Kanematsu[10]. Covil y Skinner [6]*

cavitación en el suelo. Este último efecto se acentúa en medios saturados, luego es importante que no exista una zona 3 a la hora de ejecutar el jet grouting, ya que éste suele producirse por debajo de la lámina de lechada.

Afinando un poco más, hacemos referencia a la formulación de Modoni, Croce y Mongiovì [4], que acota la geometría del campo de velocidades en un sistema de fluido simple, para el radio de influencia del jet.

La primera ecuación se refiere a la velocidad máxima a una distancia x de la boquilla v_{xmax} en relación a la velocidad de salida v_0

$$\frac{v_{xmax}}{v_0} = \frac{\lambda}{\sqrt{N}} \frac{d_0}{x} \quad (2.11)$$

donde λ es un parámetro de ajuste a determinar por tipologías de toberas, d_0 es el diámetro de la tobera, y N es la relación entre las viscosidades cinemáticas en régimen turbulento de fluido inyectado y agua.

La segunda ecuación relaciona, para una misma distancia x , la velocidad máxima con el resto de velocidades a esa misma distancia:

$$\frac{v_x}{v_{xmax}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1,33\lambda^2(r/x)^2}{N}\right)^2} \quad (2.12)$$

lo que nos está indicando un perfil de velocidades con forma de campana, en la que en el centro está la velocidad máxima y en los extremos tiende a 0. Se puede simplificar suponiendo que el chorro está dentro de una superficie cónica, más allá de la cual la velocidad es 0. Fijando una relación $\xi = v_x/v_{xmax}$

obtenemos el radio del cono para una distancia x :

$$\frac{r_{eq}}{x} = \sqrt{\frac{N}{1,33\lambda^2} \left(\sqrt{\frac{1}{\xi}} - 1 \right)} \quad (2.13)$$

Para el cálculo de la densidad de la lechada, los mismos autores sugieren aplicar $\rho_g = \frac{1+W}{1/\rho_c+1/\rho_w}$; y suponer, para obtener N , que es la misma relación que entre viscosidades cinemáticas en régimen laminar, a falta de más datos.

Finalmente recordar, una vez más, el orden de magnitud de velocidades para un corte efectivo del suelo, se mueve entre los 150-300 m/s. Y destacar la importancia de tener más en cuenta esta magnitud que la presión de impulsión en la máquina ya que, de unos aparejos a otros, las variaciones de pérdidas de carga pueden ser importantes.

2.3. Interacción suelo-lechada

Tras su análisis de varios casos reales bien documentados, y de tests en diversos tipos de suelo, Croce y Flora extraen las siguientes conclusiones [3]:

- el jet grouting es muy efectivo en suelos granulares gruesos, mientras que en suelos de grano fino puede no producir mejoras apreciables
- no se puede establecer una correlación directa entre los resultados del SPT, se pueden conseguir grandes diámetros para suelos muy densos
- en gravas, el efecto se consigue más por penetración de la lechada que por arrancamiento y mezcla; si son gravas arenosas se consiguen muy buenos resultados, mientras que en gravas limpias, aun alcanzando la resistencia deseada, la permeabilidad de la columna puede seguir siendo excesivamente alta

Afirmaciones que parecen chocar con los preceptos tradicionales del jet grouting. Destacamos especialmente el segundo punto, por ser una referencia habitual el SPT para determinar el diámetro del jet, procedimiento que utiliza Covil[6].

La formulación más completa que hemos encontrado, que pretende servir de forma efectiva para el diseño previo de un procedimiento de jet grouting, son los modelos de Modoni, Croce y Mongiovì (2006) [4]. Con la misma búsqueda de tres parámetros: un tiempo de tratamiento t^* , unos radios de tratamiento R , y una eficiencia E , se consiguen modelos diferenciados para gravas (filtración) y arenas y arcillas (erosión). Siendo muy completos en parámetros a considerar, además dejan hueco a la experimentación, ya que se requiere una adecuada calibración con suelos reales. A continuación mostramos las expresiones más destacadas.

2.3.1. Filtración. Gravass

En este modelo se parte de la validez de la ley de Darcy, considerando el suelo una red de filtración en régimen laminar:

$$t^* = \frac{ma_1}{2\pi R_1 v_s} \quad (2.14)$$

donde m es el número de toberas, a_1 el área de impacto, R_1 el radio del taladro, y v_s la velocidad de retirada.

$$R_{lim} = R_1 \exp \left[\frac{k_f a_1}{R_1 q_0} \left(\Omega_g \frac{v_{eq1}^2}{2g} - h_e \right) \right] \quad (2.15)$$

donde k_f es el coeficiente de permeabilidad del suelo, q_0 el caudal de lechada inyectada por la tobera, v_{eq1} es la velocidad promedio de inyección en R_1 , h_e es la carga hidrostática (del suelo inalterado) en el punto de tratamiento, y Ω_g es el coeficiente de pérdida de carga entre la tobera y la pared del taladro ($h_1 = \Omega_g \frac{v_{eq1}^2}{2g}$). Este valor de radio límite se debe comparar con el radio efectivo R_e , de tal manera que si aquel es menor que éste, la lechada rebosará por el taladro.

$$h_1 - h_e = \frac{V_1 R_1}{k_f} \ln \left(\frac{R_e}{R_1} \right) \quad (2.16)$$

La eficiencia:

$$E = \frac{mv_s D^2}{mv_0 d_0^2} \leq 1 \quad (2.17)$$

siendo n la porosidad del suelo

2.3.2. Erosión. Suelos arenosos

En los modelos erosivos se considera la dialéctica entre la fuerza de erosión de la inyección y la resistencia del suelo a ser erosionado. Para el suelo arenoso, la resistencia viene dada por la expresión:

$$\psi_s = \Omega_2 (c' + \sigma' \tan \phi') \quad (2.18)$$

El cálculo de σ' :

$$\sigma' = \sigma_z - \frac{\gamma_f v_f^2}{2g} \quad (2.19)$$

donde v_f es la velocidad promedio del jet, que tiende a una velocidad límite v_l :

$$v_l = \sqrt{\frac{\Omega_s g}{\gamma_f} \frac{c' + \sigma_z \tan \phi'}{1 + 0,5\Omega_s \tan \phi'}} \quad (2.20)$$

en este caso, $\Omega_s = \Omega_2/\Omega_1$ será nuestro factor de calibración, agrupando geometría y mecánica del jet y del suelo (Ω_1 es un parámetro que calibra las pérdidas de energía desde el jet hasta la pared del taladro, y Ω_2 representa la resistencia del suelo a ser erosionado, ambos adimensionales). El radio máximo del jet:

$$R_{max} = \frac{2\lambda v_{x0} C d_0}{\sqrt{\frac{\Omega_s g N}{\gamma_f} \frac{c' + \sigma_z \tan \phi'}{1 + 0,5\Omega_s \tan \phi'}}} \quad (2.21)$$

donde N es la viscosidad cinemática turbulenta relativa del fluido inyectado. Finalmente la eficiencia se cuantifica como:

$$E = \frac{1}{(1 - n) + \left(\frac{mv_0 d_0^2}{v_s D_{av}^2}\right)} \quad (2.22)$$

Y el tiempo de tratamiento, subdividiendo la columna en Δs tramos:

$$t^* = \frac{m \Delta s}{v_s} \frac{2(req/x)}{2\pi} \quad (2.23)$$

D_{av} es el diámetro promedio de la columna.

2.3.3. Erosión. Suelos arcillosos

El modelo erosivo de los suelos arcillosos sigue ciertos paralelismos con el de los suelos arenosos. Tendremos una resistencia al suelo dependiente de la cohesión:

$$\psi_c = \Omega_3 c_u \quad (2.24)$$

siendo Ω_3 el análogo en suelos arcillosos al Ω_2 en suelos arenosos. La velocidad límite:

$$v_l = \sqrt{\frac{\Omega_c g}{\gamma_f} c_u} \quad (2.25)$$

y el radio máximo:

$$R_{max} = \frac{2\lambda C d_0 v_{x0}}{\sqrt{\frac{\Omega_c g}{\gamma_f} N c_u}} \quad (2.26)$$

Los parámetros de tiempo y eficiencia se calculan de la misma manera que para suelos arenosos.

2.4. Resistencia y permeabilidad

Después de esta amplia discusión, no podemos haber perdido la referencia de nuestros objetivos a la hora de optar por el jet grouting: resistencia y/o permeabilidad.

En el caso de la resistencia, nos encontramos de nuevo con informaciones incompletas y métodos parciales. Una vez más, con fórmulas o más bien, con ausencia de fórmulas que nos permitan predecir la resistencia de una columna jet, tendremos que acudir forzosamente a los caros ensayos in situ, si queremos saber exactamente que estamos ejecutando. Aún así, indicamos algunas de las orientaciones que distintos autores/fabricantes proporcionan.

Por un lado, Biosca [1] nos orienta con rangos de entre 25 y 45 kg/cm^2 para arcillas, 40-60 kg/cm^2 para limos, y 60 hasta más de 100 kg/cm^2 para arenas. Estos rangos parecen coincidir con los resultados CCP de Covil [6]

(cuadro 2.4).

Soil Type	Lift Speed (L) (cm/min)	Column Diameter (m)	Average Compressive Strength (KN/m ²)
clay	34.50	0.55 to 0.60	20
clay	17.20	0.65 to 0.70	40
silty clay	34.50	0.65 to 0.70	50
silty clay	17.20	0.75 to 0.80	70
sand	34.50	0.75 to 0.80	80
sand	17.20	0.85 to 0.90	120

Cuadro 2.4: Resistencias y diámetros según tipo de suelo, velocidad de elevación. Covil y Skinner, 1996 [6].

En un sentido más práctico, TekTracker nos proporciona un ábaco de diseño, en la figura 2.8. Resaltar de éste el detalle de que, por mucho que se aumente la cantidad de cemento en el tratamiento con arcillas, la resistencia es limitada.

Keller relaciona tipos de suelos con permeabilidad y resistencia, cuadro 2.5.

Parámetros	Suelos granulares	Suelos cohesivos
Diámetro (m)	hasta 3	hasta 2.5
$q_u(N/mm^2)$	1 a 10	0.5 a 5
Permeabilidad (m/s)	10^{-6} a 10^{-8}	10^{-7} a 10^{-9}

Cuadro 2.5: Permeabilidad y resistencia. Keller Grundbau GmbH

Finalmente, la Asociación Japonesa de Jet Grouting ha adoptado unas funciones de distribución de resistencias, tomando percentiles del 1 al 3%. El cuadro 2.6 refleja los valores standard propuestos por esta asociación[8].

Como en toda técnica de suelos, por encima de la teoría, está la ejecución en el suelo real. Y así, se deben tener en cuenta, para el éxito final[1], sea por resistencia, sea por permeabilidad, los siguientes elementos:

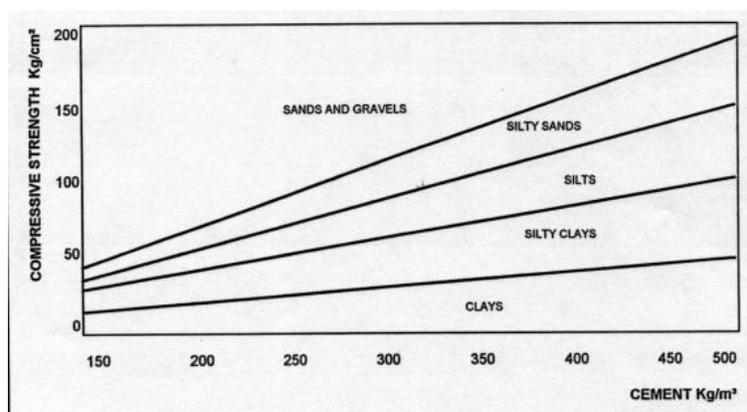


Figura 2.5: Resistencias según áridos y contenido en cemento. TekTracker.

Tipo de suelo	$q_u(MN/m^2)$	$c(MN/m^2)$	$f(MN/m^2)$	$\sigma_t(MN/m^2)$
Cohesivo	1	0.3	0.1	0.2
Granular	3	0.5	0.17	0.33

Cuadro 2.6: Resistencias standard. Asociación Japonesa del Jet Grouting [8]

- La existencia de flujos de agua que puedan lavar el jet. Si es necesario, se deberán modificar las líneas de flujo por medios artificiales
- La existencia de zonas de granulometrías discontinuas, que se queden con poca inyección por alta permeabilidad
- El efecto sombra por algún obstáculo, en el chorro de la inyección

Y por supuesto, en la medida de lo posible, hay que realizar un control de geometría final, lo cual, es un problema nada evidente.

Capítulo 3

Conclusiones

Se han visto los principales elementos de interés a la hora de decidarnos por la técnica del *jet grouting* para solucionar problemas en la cimentación.

Además de con unos órdenes de magnitud (*números gordos*), uno se debe quedar con la idea de que esta técnica no es la panacea de los problemas para los que se desarrolló, que cada caso particular debe ser analizado con sumo cuidado, o puede resultar un fiasco, y que todavía le queda mucho rodaje e investigación para afinar en los parámetros.

Es necesario pues, que se siga usando, y la información del resultado de cada caso, con buena o mala terminación, se comparta¹ entre los técnicos para seguir avanzando.

¹En la bibliografía se indican artículos sobre varios casos más o menos documentados.

Bibliografía

- [1] Biosca G. de Tejada, Ferrán. *Aplicaciones del jet grouting en la mejora de suelos*. Rodio Cimentaciones Especiales, S.A.
- [2] Broid, I. I., Drobadenko, V.P., Malukhin, N.G.. *Improvement of jet technology for soil stabilization*. Soil Mechanics and Foundation Engineering Vol. 34, No. 6, 1997. .
- [3] Croce, P., Flora, a.. *Analysis of single-fluid jet grouting*. Géotechnique 50, No. 6, 2000 y discusión en Géotechnique 51 No. 10, 2001.
- [4] Modoni, G., Croce, P., Mongiovì, L.. *Theoretical modelling of jet groting*. Géotechnique 56, No. 5, 2006.
- [5] Coomber, D.B.. *Tunnelling and soil stabilization by jet grouting*. Tunneling'85 the Institution of Mining and Metallurgy, 1985.
- [6] Covil, C.S., Skinner, A.E.. *Grouting in the ground. Paper 36: Jet grouting—a review of some the operating parameters that form the basis of the jet grouting process*. Intitution of Civil Engineers, Dr. A. L. Bell editor. Thomas Telford publishers, 1996.
- [7] Covil, C.S.. *Jet grouting, a state of the art review*(MSc thesis). Imperial College, London, 1991.
- [8] Essler, R., Yoshida, H.. *Ground Improvement. Chapt.5 Jet Grouting*. M.P. Moseley and K. Kirsch editors. The Cromwell Press Ltd publishers, 2004.
- [9] Muelas Peña, A. y Garcés Catalán, Javier. *Cimentación del puente del rio Miera en Solares, Cantabria*. Revista de Obras Públicas 3.324 año 140, septiembre 1993.

- [10] Kanematsu, H.. *High Pressure Jet Grouting Method*. Doboku Sekoh, vol. 1, nº 13, nov. 1980.
- [11] Muzas Labad, Fernando. *Reflexiones sobre el «Jet Grouting»*. Revista de Obras Públicas, Febrero 1989.
- [12] Van Der Stoel, Almer E.C.. *Grouting for pile foundation improvement*. Delft University Press, 2001.
- [13] VV.AA. *Recomendaciones de Obras Marítimas ROM 0.5-05 Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias*. Puertos del Estado, 2005.
- [14] VV.AA.. *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (Orden FOM/1382/02)*. Boletín Oficial del Estado, nº 139, 11 de junio de 2002.
- [15] Zege, S.O., Broid, I. I., Antonov, D.V., Sin'ko, S.S.. *Construction of artificial beds for piles using jet geotechnology*. Soil Mechanics and Foundation Engineering Vol. 39, No. 4, 2002.
- [16] Юркевич П., Чеканов П. *Jet-Grouting en la construcción del complejo multifuncional «Jardín Tsarev» en Moscú* (original en ruso).

Pliegos e información web de empresas

- Earth Tech Geotechnical Construction Services *Services and solutions.* <http://www.earthtech.net>
- Keller Grundbau GmbH *Soilcrete. Jet-grouting process (Brochure 67-03 E).* <http://www.kellergrundbau.com>
- Boart Longyear *Jet Grouting Drilling System.* <http://www.boartlongyear.com>
- Layne Christensen Company *Jet grouting technical summary.* <http://www.laynegeo.com>
- RECON-Remedial Construction Services *Jet Grouting.* <http://www.recon-net.com>
- Soletanche Bachy *Consolidación de una pared de muelle por medio de columnas Jet grouting armado en Muelle Carnot, puerto de Concarneau, Francia*
- TekTracker *Jet grouting. Technology overview.* <http://www.jet-grouting.com>
- TEPSL-Técnicas Especiales de Perforación S.L. *Jet Grouting.* <http://tepsl.es>
- Ross W. Boulanger, Univ. California, Davis *Jet grouting in Stockton.* <http://cee.engr.ucdavis.edu/faculty/boulanger>