

**Estimación de la
resistencia, rigidez y
permeabilidad del suelo
tratado con jet grouting**

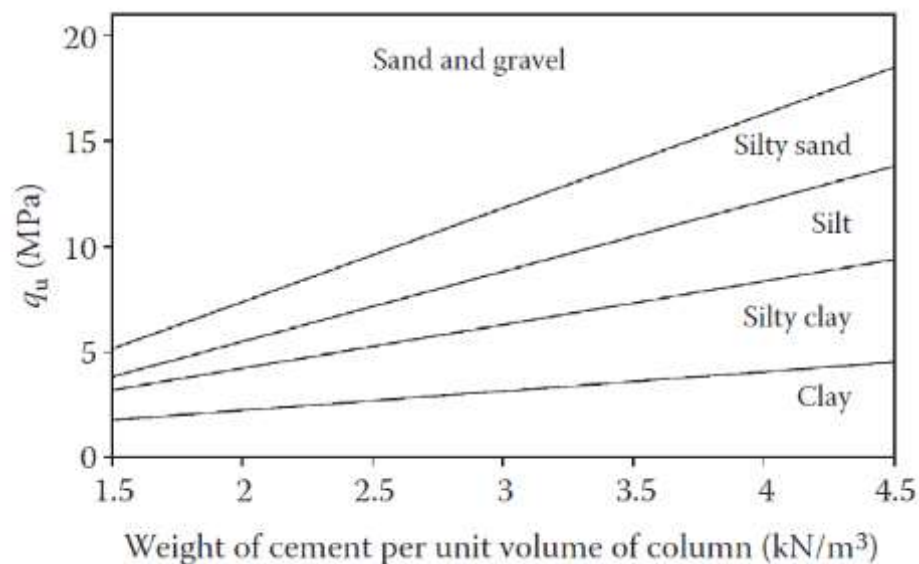
Estas propiedades se pueden obtener a partir de dos métodos:

1. Mediante métodos empíricos, a partir de los valores obtenidos en tratamientos realizados previamente en terrenos similares.
2. Mediante columnas de prueba realizadas “in situ”, previamente al tratamiento general.

1. MÉTODOS EMPÍRICOS.

En función de las propiedades índice del suelo a tratar y la cantidad de cemento inyectada por metro cúbico, se pueden estimar los siguientes parámetros del suelo tratado una vez que haya fraguado:

- **Resistencia a compresión simple (q_u) del suelo tratado.**



Se puede estimar su valor a partir de correlaciones como la que aparece en la figura siguiente:

Figura 1. Resistencia a compresión simple (q_u) del terreno tratado con jet grouting en función del tipo de suelo y de la cantidad de cemento inyectada por m^3 (Croce y otros, 2014).

También se pueden utilizar otras correlaciones, como las que aparecen en la Tabla 1, en la que se incluyen:

- Los parámetros de resistencia al corte del terreno tratado con jet grouting, según la ley de Mohr-coulomb, normalmente utilizados en análisis de estabilidad de taludes.
- La resistencia a compresión simple y la resistencia a compresión con una presión de confinamiento de 200 kPa.

Tabla 2. Parámetros Mohr-Coulomb de resistencia al corte y resistencia a compresión (q_c), sin confinamiento y con él, del terreno tratado con jet grouting, en función del tipo de suelo (Croce y otros, 2017).

Reference	Soil type	ϕ : deg	c : MPa	q_c : MPa at $\sigma_r = 0$ kPa	q_c : MPa at $\sigma_r = 200$ kPa
Bzówka (2009)	Sandy	58.2	2.3	16.1	18.4
Croce & Flora (1998)	Silty sand	26.1	3.2	10.3	10.6
Mongioli et al. (1991)	Gravel	52	2.1	12.2	13.7
Mongioli et al. (1991)	Gravel	42	0.3	1.3	2.2
Mitchell et al. (1981)	Clay	39.5	0.58	2.5	3.2
Yahiro et al. (1982)	Sand and Clay	28.5	0.7	2.4	2.7
Miki (1982)	Various	25	0.8	2.5	2.8
Yu (1994)	Clay - Silty sand	40.6	1.1	4.8	5.5
Fang et al. (1994.a)	Silty sand	35	4.2	16.1	16.7
Fang et al. (1994.b)	Clay - Silty sand	42	4.2	18.9	19.7
Fang and Chung (1997)	Clay and silty sand	38.6	0.8	3.3	4.0
Fang et al. (2004)	Silt and Sand	38.7	0.7	2.9	3.6
Nikbakhtan and Osanloo (2009)	Clay & sand	45	0.6	2.9	3.9
	Clay & sand	25	0.77	2.4	2.7

- **Resistencia a tracción (f_{ig}) del suelo tratado.**

Se puede estimar su valor a partir de su resistencia a compresión simple, utilizando las siguientes figuras, en función del tipo de suelo:

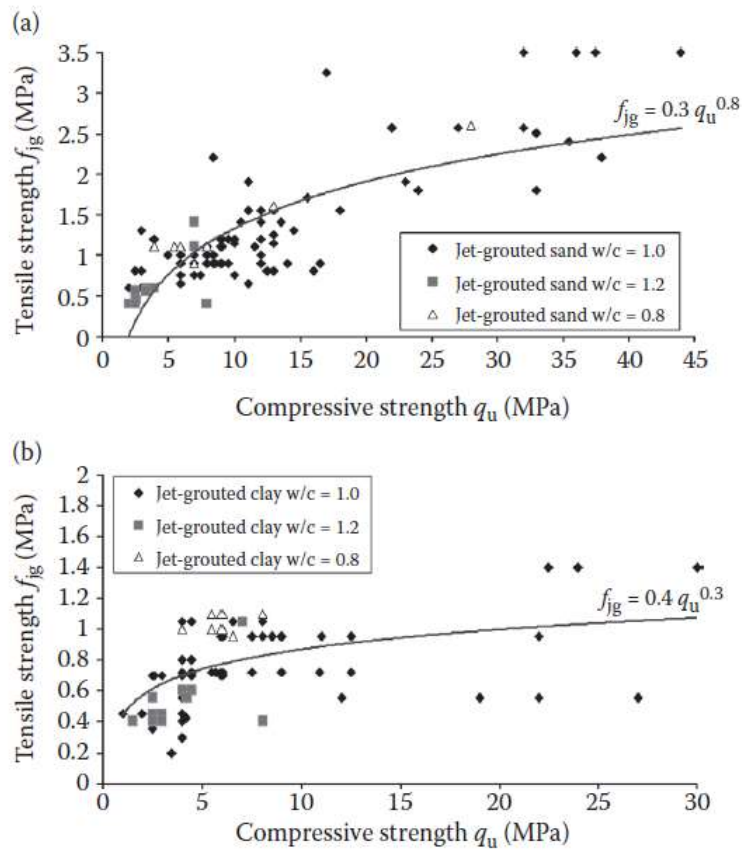


Figura 2. Resistencia a tracción (f_{jg}) en función de la resistencia a compresión simple (q_u) del terreno tratado con jet grouting para suelos arenosos (a) y suelos arcillosos (b), según van der Stoel (2001).

- **Resistencia a esfuerzo cortante del suelo tratado.**

Se puede estimar su valor en el orden del 8% de su valor de resistencia a compresión simple:

$$Q = 0,08. RC$$

- **Módulo de deformación del suelo tratado.**

Se puede correlacionar con el valor de la resistencia a compresión simple (q_u) del suelo tratado por la expresión:

$$E = \alpha_E \cdot q_u$$

El factor adimensional α_E depende fundamentalmente de la naturaleza del terreno inicial. Se puede tomar de la Tabla 2, en la cual se indican rangos de valores para este factor.

Tabla 2. Relación entre el módulo de deformación (E) y la resistencia a compresión simple (q_u) del terreno tratado con jet grouting, en función del tipo de suelo.

<i>Reference</i>	<i>Definition of E</i>	<i>Soil type</i>	β_E
Mongioli et al. (1991)	Tangent unspecified	Gravel	280–1000
Lunardi (1992)	Secant at 40% q_u	Gravel and sand	500–1200
Nanni et al. (2004)	Tangent unspecified	Gravel and sand	440–1000
Croce et al. (1994)	Tangent unspecified	Sandy gravel	210–670
Croce and Flora (1998)	Secant at $\epsilon_s = 0.01\%$	Silty sand	220–700
Nanni et al. (2004)	Tangent unspecified	Silty sand	330–830
Fang et al. (2004)	Tangent at 50% of the failure stress	Silty sand	300–750
Fang et al. (2004)	Tangent at 50% of the failure stress	Silty sand, silty clay	100–300
Lunardi (1992)	Secant at 40% q_u	Silt and clay	200–500

- **Coeficiente de permeabilidad del suelo tratado.**

El coeficiente de permeabilidad, k , se puede obtener de la tabla 2, siendo función de la naturaleza del terreno original. Es importante en todo caso indicar que la permeabilidad global depende tanto de la continuidad del tratamiento como de la permeabilidad del propio suelo tratado.

Tabla 2. Valores de k	
Naturaleza del terreno inicial	K del terreno a tratar (m/seg)
Arcillas	10^{-7} a 10^{-9}
Limos	10^{-7} a 10^{-9}
Arenas y gravas	10^{-8} a 10^{-10}

2. COLUMNAS DE PRUEBA REALIZADAS IN SITU.

Las columnas de prueba se realizarán en zonas acotadas de la obra en donde el terreno presente características similares al del resto de la zona a tratar.

Las características de las columnas de prueba se definirán en un Protocolo que incluya al menos lo siguiente:

- ✓ Nombre de la Obra y número de la columna.
- ✓ Croquis de situación de la columna de prueba.
- ✓ Características del terreno perforado.
- ✓ Profundidad de la columna.
- ✓ Tipo de tratamiento.
- ✓ Número de las toberas de inyección y relleno.
- ✓ Velocidad de rotación y ascenso del varillaje.
- ✓ Caudal de corte y relleno o diámetro de toberas de inyección y relleno
- ✓ Presiones de inyección y relleno.
- ✓ Dosificación de cemento por metro de columna, y densidad de la lechada.

El número de columnas depende de la uniformidad del terreno a tratar. En general, y realizadas con diferentes parámetros de tratamiento, no deberá ser inferior a tres, para cada tipo de terreno dentro del espacio a tratar, en el caso de columnas aisladas, y las precisas geométricamente en aplicaciones tales como barreras de impermeabilización, tapones de fondo, etc.

Las variables de prueba suelen ser:

- Densidad o dosificación de la lechada.
- Velocidad ascensional y de rotación.
- La presión de inyección y el número y diámetro de las toberas, es decir, el caudal de inyección.

Sobre las columnas, una vez fraguadas y excavadas en todo su perímetro en unos casos o parcialmente en otros, cuando se tenga acceso a ellas, se realizarán medidas de sus diámetros y continuidad a lo largo de las diferentes capas atravesadas, y se tratará de tomar muestras inalteradas para realizar los ensayos correspondientes en laboratorio.

Cuando no se pueda acceder directamente a las columnas, se tratará de realizar la extracción de testigos del suelo tratado, mediante las técnicas de sondeos más adecuadas a sus características mecánicas. En particular, deberán utilizarse toma-muestras especiales, de pared doble o triple, con el objeto de minimizar la alteración de las muestras, que deberán ser examinadas antes de ser ensayadas en laboratorio, por un técnico competente. En el caso particular de la resistencia a compresión, en caso de que se detecten pequeñas alteraciones, en forma de fisuras, debidas al proceso de extracción, convendrá realizar ensayos triaxiales tipo UU (no consolidado-no drenado) en lugar de ensayos de compresión simple. Las presiones de confinamiento a utilizar en estos ensayos cubrirán el rango de presiones a las que estará sometido, in situ, el suelo tratado con jet grouting. Si, por el contrario, las alteraciones detectadas fuesen importantes, deberán descartarse estas muestras y realizar otras tomas de muestras con técnicas más adecuadas.

Para determinar la resistencia de diseño, si se contar con un número suficientemente grande de resultados de ensayos, en lugar de utilizar le método determinístico tradicional (resistencia media/factor de seguridad), se podrá utilizar un método semi-probabilístico como el indicado por Croce y otros (2104).