

# Jet Grouting. Control de parámetros de ejecución y de resultados. Campos de prueba - Experiencia en Chile

## Jet Grouting. Control of execution and result parameters. Test fields - Experience in Chile

Pía Macarena Ayarza<sup>1\*</sup> y Goran Vukotić<sup>2</sup>

### Palabras clave

Jet Grouting;  
campo de prueba;  
Chile;  
inyección;

### Sumario

Este artículo tiene como objetivo destacar la importancia de los Campos de Prueba en obras de Jet Grouting. En particular se menciona el caso de Chile, en donde la técnica fue introducida en el año 2010 por la empresa Pilotes Terratest S.A. y no fue hasta el año 2011 cuando se ejecutó la primera obra de Jet Grouting.

La versatilidad de esta técnica permite su uso para diversos fines, como el mejoramiento de parámetros de resistencia del terreno, disminución de la deformabilidad, reducción de los parámetros de permeabilidad y aplicaciones medio ambientales. Actualmente se aplica en el recalce de zapatas, mejoramiento de terreno, soporte lateral de excavaciones, estabilización de laderas, control de flujo de agua (barreras hidráulicas), estructuras de mitigación de riesgo de licuación, entre otras.

El Jet Grouting es una de las tecnologías de mejoramiento actualmente más demandantes, requiriendo excelencia en el diseño y ejecución de los especialistas. Se hace imprescindible, entonces, contar con exhaustivos procedimientos de control que comprueben que los elementos tengan, individual y colectivamente, las propiedades que solicita el proyecto, tanto en la fase de ejecución, permitiendo adoptar modificaciones de parámetros, como en fase final de entrega.

Muchos autores recomiendan que cuando no se disponga de experiencia comparable, y aun cuando se tenga, se ejecuten Campos de Prueba al pie de la obra. Este consiste en un área contigua al terreno del proyecto (con condiciones geotécnicas similares) en donde se realizan inyecciones de prueba. El Campo de Prueba permitirá seleccionar el sistema más efectivo de ejecución, los parámetros de inyección y verificar que los resultados, con los sistemas seleccionados, están de acuerdo con los requisitos del diseño.

### Keywords

Jet Grouting;  
test field;  
Chile;  
injection;

### Abstract

*This article emphasizes the importance of Test Fields in projects that includes the Jet Grouting technique. In particular, the Chilean experience is analyzed, where the Jet Grouting was first introduced by Pilotes Terratest S.A. in the year 2010, only in 2011 the first project using jet columns was constructed.*

*The versatility of this technique allows its use in a wide variety of projects, for example, soil capacity improvement, settlement control, reduction of soil permeability and other environmental applications. Currently, the most common applications are underpinning of existing foundations, ground improvement, lateral support of excavations, hydraulic barriers, slope stabilization, liquefaction control, among others.*

*The Jet Grouting is one of the most demanding soil improvement technique and requires excellence in designing and execution engineers and other involved specialists. It is therefore essential to ensure exhaustive control to the execution and final parameters, in order to check that the product – Jet Grouting element – have the design properties, and implement modifications if necessary.*

*Many authors strongly advise that if there is no comparable experience and even if there is, a Test Field of Jet Grouting elements has to be executed in site. This field consists in a nearby area with similar geotechnical conditions of the project, where Jet Grouting test columns will be constructed. This Test Field will allow selecting the most effective execution parameters and verifying that the final product has the correct design properties.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde principios de los años 90, Chile ha tenido un desarrollo sostenido en el ámbito de la construcción. Junto con la reinstauración de la democracia, el país se abrió a

nuevos mercados, y la necesidad de contar con una infraestructura acorde con esta apertura hizo que el ámbito de la construcción se desarrollara al alero de la experiencia internacional y de la innovación tecnológica.

Luego de 25 años, los proyectos proponen desafíos cada vez mayores y es labor de los ingenieros y empresas del rubro, estudiar e implementar nuevas tecnologías que proporcionen soluciones seguras y eficientes. Dentro de esas tecnologías se encuentra el Jet Grouting, técnica

\* Corresponding author: [mayarza@terratest.cl](mailto:mayarza@terratest.cl)

<sup>1</sup> Pilotes Terratest S. A., Santiago, Chile.

<sup>2</sup> Keller Cimentaciones, S. L. U., Madrid, Iberia y Latinoamérica - Madrid, España.

introducida en Chile el año 2010 por la empresa Pilotes Terratest S.A.

El Jet Grouting es una técnica de mejoramiento del terreno que mediante la inyección de fluidos, erosiona la estructura del suelo por medio de la alta energía cinética del chorro de inyección, para luego mezclarlo con un agente cementante y formar una estructura de suelo mejorado. El cuerpo de Jet Grouting posee mejores características geomecánicas que las del suelo original, una resistencia más elevada y una menor compresibilidad y permeabilidad.

El correcto diseño del Jet Grouting se basa en cuatro etapas fundamentales:

- Establecer el objetivo del tratamiento
- Conocer los datos de entrada para el diseño: cargas solicitantes, geometría de solución, espacios disponibles, emplazamiento, etc.
- Conocer a cabalidad las propiedades del suelo natural
- Estimar las propiedades del suelo tratado para dar forma a la solución

Los tres primeros puntos dependen de un estudio en detalle del proyecto, lo cual no significa un problema mientras se cuente con los recursos necesarios para realizarlo. Sin embargo, existe un amplio debate sobre cómo estimar los parámetros de diseño del suelo tratado mediante Jet Grouting. La escasa normativa internacional ha llevado, en general, a que cada empresa desarrolle procedimientos internos de diseño, basados en la experiencia previa en suelos similares y en datos de la literatura especializada, los que no siempre son aplicables al proyecto en particular que se está estudiando.

Por otro lado, el correcto proceso de ejecución contempla las siguientes etapas:

- Elección del tipo de Jet Grouting y definición de parámetros de ejecución
- Realización de Campo de Prueba (optativo pero siempre recomendable)
- Control de parámetros de ejecución
- Control de resultados

En el caso de Chile, la poca experiencia que se tiene con esta técnica hace muy recomendable ejecutar un Campo de Prueba al pie de la obra antes de comenzar con la ejecución, con el fin de poder analizar los parámetros de ejecución y resultado del tratamiento en el suelo en donde se ejecutará el proyecto. El objetivo de este trabajo es presentar el análisis de dos Campos de Prueba realizados en suelos granulares en distintas regiones de Chile.

El primer Campo de Prueba que se analizará se ejecutó el año 2011 en la ciudad de Constitución, VII Región del Maule, Chile. Se ejecutaron 12 columnas de Jet Grouting con diferentes parámetros de ejecución en una zona contigua a la obra. El segundo Campo de Prueba que se analizará en el artículo se ejecutó el año 2012 en la ciudad de Santiago, Región Metropolitana, Chile. En este caso se ejecutaron 7 columnas de Jet Grouting con diferentes parámetros de ejecución en un sector en donde se encuentra la unidad de suelo denominada Grava Típica de Santiago.

En los diferentes apartados del presente documento se exponen las experiencias y resultados obtenidos en estos

dos Campos de Prueba y se intentará entregar una correlación de los parámetros de ejecución con los diámetros de las pseudocolumnas y resistencias del terreno tratado.

Junto con el análisis de ambos Campos de Prueba, se intentarán además definir posibles futuras líneas de investigación relacionadas con un mejor control de parámetros y definición de lineamientos para Campos de Prueba, siendo el objetivo la expansión del uso del Jet Grouting en Chile y América del Sur.

## 2. LA TECNICA DE JET GROUTING

El Jet Grouting es una técnica de mejora del terreno que, mediante la inyección radial de uno o más fluidos a alta presión, erosiona la estructura del suelo con alta energía cinética, para luego mezclar el terreno disgregado con un agente cementante y así formar una estructura de suelo mejorado. El resultado es un cuerpo sólido de suelo-cemento de mejores propiedades de resistencia y permeabilidad que las del suelo original.



Figura 1. Detalle del chorro Jet Grouting (Pilotes Terratest S.A., 2011).

El Jet Grouting puede utilizarse en prácticamente cualquier tipo de terreno, variando las características del cuerpo de suelo tratado para cada tipo, como el diámetro, la resistencia y la permeabilidad. El terreno se puede romper y mezclar con fluidos del Jet Grouting sin importar su granulometría o su permeabilidad, siempre y cuando su resistencia a la erosión no supere ciertos límites (no es aconsejable en rocas).

Otras características de interés de esta técnica son:

- La posibilidad que tiene para tratar estratos de suelos específicos en cierta profundidad
- Utiliza componentes inertes (lechada de cemento, agua y aire)
- Su ejecución es prácticamente libre de vibraciones
- Posibilidad de trabajar con limitaciones de espacio y el producto es libre de mantenimiento

Lo anterior se traduce en un amplio espectro de aplicaciones:

- Control de napa freática (barrera hidráulica en presas, tapones de fondo, etc.)
- Control de deformaciones (aplicaciones en túneles, por ejemplo)
- Aplicaciones medio ambientales (control de flujo)

- Mejorar capacidad de soporte del terreno
- Reparación de estructuras profundas (por ejemplo, pilotes y muros pantalla)

Existen terrenos en donde se debe tener mayor precaución para el tratamiento mediante Jet Grouting. Estos suelos son:

- Suelos orgánicos: generalmente presentan problemas para el correcto fraguado de la lechada
- Terrenos con bloques o materiales gruesos: los bloques son un obstáculo físico para el alcance del chorro y generan el llamado “efecto sombra”
- Alternancia de capas (duras-blandas): se deben ir ajustando los parámetros de ejecución del Jet Grouting para lograr el cuerpo tratado de diseño

Es natural intuir que el alcance del chorro del Jet Grouting es función de las características del terreno natural, principalmente de la granulometría, la compacidad en el caso de suelos granulares, y en caso de los suelos finos, de su plasticidad y consistencia.

### 2.1. Tipos y formas de Jet Grouting

Actualmente existen tres diferentes tipos de Jet Grouting, dependiendo de la cantidad de fluidos de inyección y del avance tecnológico con el correr de los años de aplicación de la técnica. Los distintos tipos responden a las distintas necesidades del proyecto, ya sea por el tipo de terreno, su aplicación o el alcance deseado.

- Jet 1
  - En este tipo es un único fluido, la lechada de cemento, el que cumple la función de disgregación del terreno y agente cementante de mezclado.
- Jet 2
  - Este tipo presenta dos variantes:
    - Variante 2A: El tratamiento se realiza mediante la inyección de lechada y agua por medio de dos toberas a distintas alturas.
    - Variante 2B: El tratamiento se realiza mediante la inyección de lechada y aire mediante chorros concéntricos que salen de la misma tobera.
- Jet 3
  - Este tipo consiste en la inyección de tres fluidos: agua, aire y lechada. Se tienen dos toberas a distintas alturas.

Como una evolución de los sistemas convencionales (Jet 1, 2 y 3) se tiene el SuperJet Grouting, ejecutado con bombas de alta potencia. Otra evolución de las técnicas convencionales es el sistema Crossjet Grouting. Esta técnica consiste en la inyección de la lechada mediante dos chorros cruzados que se interceptan en un punto a una distancia específica de la varilla, con el fin de limitar de manera específica la capacidad erosiva del Jet.

Así como se tienen diferentes tipos de Jet Grouting, la técnica también permite alternativas en la forma de la

pseudocolumna, modificando los parámetros de velocidad de ascenso, velocidad de giro y tipos de tobera. La forma final del cuerpo inyectado dependerá del tipo de aplicación que ésta tenga.

La evolución del Jet Grouting en el tiempo ha ido de la mano de los avances tecnológicos en maquinaria y equipos, la experiencia adquirida por empresas y especialistas y la mayor inversión en investigación.

El SuperJet Grouting utiliza herramientas de ejecución optimizadas, tipo bombas de alta potencia de nueva generación, que tienen prestaciones de presión y caudal del orden del doble que los equipos típicos. Para estas bombas se requieren equipos de fabricación de lechada de mayor capacidad. En cuanto a la ejecución, el Superjet Grouting considera el empleo de aire para envolver la lechada y con ello, darle mayor eficiencia a la inyección de la misma. En caso de tener mayor presión y menor velocidad de ascenso y rotación se alcanzan mayores diámetros de columnas y admisión de cemento por metro de columna.

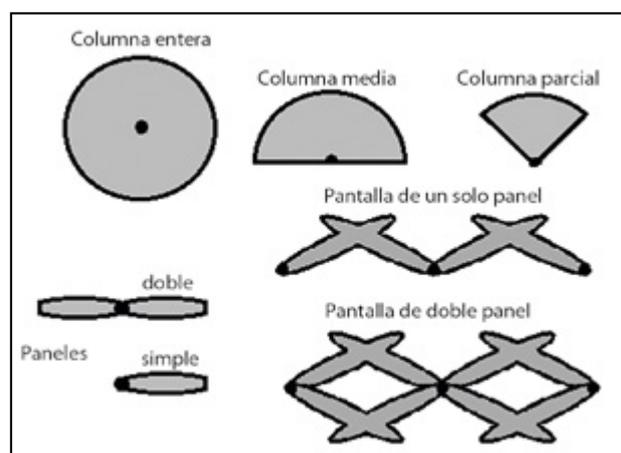


Figura 2. Esquema de formas (Keller Cimentaciones, S.L.U.).

### 2.2. Procedimiento constructivo

La ejecución del Jet Grouting comienza con la realización de una perforación estéril en el terreno hasta la profundidad requerida de diseño. Una vez alcanzada dicha profundidad, se comienza con el giro y el retiro ascendente del varillaje de perforación junto con la inyección a alta presión de los fluidos, para lograr el cuerpo de suelo tratado.

El método de perforación se elige principalmente dependiendo del tipo de suelo a tratar, condiciones del sitio de la obra e inclinación del tratamiento, siendo a rotación o a roto-percusión. Se entrega a continuación una tabla con parámetros típicos de ejecución de Jet Grouting.

El chorro del Jet Grouting rompe el suelo y lo mezcla con la lechada de inyección. Parte de esta mezcla es desplazada hacia el exterior por el espacio anular entre las paredes de la perforación y el varillaje de inyección. Esta mezcla de suelo disgregado y lechada que se expulsa a la superficie, constituye el material de resurgencia.

La resurgencia es un componente de vital importancia para el control de la técnica ya que, de no observarla durante la ejecución, se puede tener un problema de obturación del espacio anular de tránsito. La zona obstruida puede entrar en carga por la acumulación de resurgencia y puede producir la fractura del terreno.

**Tabla 1.** Parámetros de ejecución típicos de Jet Grouting (UNE-EN 12716:2001)

Parámetros de trabajo	Unidades	Jet 1	Jet 2A (lechada + agua)	Jet 2B (lechada + aire)	Jet 3
Presión de la lechada	(MPa)	30 - 50	> 2	30 - 50	> 2
Caudal de la lechada	(l/min)	50 - 450	50 - 200	50 - 450	50 - 200
Presión de agua	(MPa)	-	30 - 60	-	30 - 60
Caudal de agua	(l/min)	-	50 - 150	-	50 - 150
Presión de aire	(MPa)	-	-	0,2 - 1,7	0,2 - 1,7
Caudal de aire	(m <sup>3</sup> /min)	-	-	3 - 12	3 - 12
Toberas de corte	(mm)	1,5 - 5,0	1,5 - 6,0	1,5 - 6,0	1,5 - 6,0
Toberas de relleno	(mm)	-	4 - 12	-	4 - 12
Velocidad de ascenso	(cm/min)	20 - 70	10 - 50	10 - 50	10 - 50
Velocidad de rotación	(rpm)	10 - 30	5 - 20	5 - 20	5 - 20

**Figura 3.** Fotografía resurgencia 1 (Pilotes Terratest S.A., 2011).**Figura 4.** Fotografía resurgencia 2 (Pilotes Terratest S.A., 2011).

### 2.3. Diseño

Un buen diseño requiere un objetivo claro. Si bien esta frase parece obvia, en la práctica se requiere de mucho conocimiento y experiencia para esgrimir lineamientos definidos cuando se aborda el diseño de una solución mediante Jet Grouting.

En una primera instancia, se debe definir para qué se va a utilizar el Jet Grouting (recalce, barrera hidráulica, etc.) y tener disponible la información estructural para el diseño (solicitaciones, planos, profundidad de tratamiento, etc.).

Es imprescindible contar con un Informe Geotécnico completo que entregue las características del terreno en donde se ejecutará el Jet Grouting (propiedades

geomecánicas, nivel freático, estratigrafía). Es preciso conocer el suelo que se va a atravesar para elegir correctamente el sistema de perforación y, por supuesto, para estimar los parámetros del suelo tratado (propiedades geométricas, parámetros de resistencia y permeabilidad).

El diseño del tratamiento de Jet Grouting culmina con la estimación de las propiedades medias del suelo tratado, las que incluyen las características intrínsecas del suelo tratado (resistencia media a la tracción, compresión, cortante, módulo de deformación y coeficiente de permeabilidad) y las características geométricas, en particular el diámetro de la pseudocolumna formada. Esta estimación genera mucho debate. No existe en el mundo un proceso estandarizado de estimación analítica de parámetros del suelo tratado y, en general, cada empresa que implementa esta técnica realiza el diseño basándose en experiencia propia y relaciones empíricas de la literatura especializada.

La normativa internacional que se encuentra disponible a la fecha es:

- Japanese Jet Grouting Technology and Design Guideline (JSG method, Column Jet Grout method)
- European Standard EN 12716:2001
- Borrador norma española 2002

Además, es importante establecer que las propiedades de suelo tratado dependen de los parámetros de ejecución (tipo de jet, presión de inyección, caudal, material de inyección, velocidades de ascenso y rotación, diámetro de tobera) y de los parámetros del suelo particulares del emplazamiento de la obra (granulometría, densidad, compacidad o consistencia, nivel freático).

La resistencia a la compresión simple (RCS) es uno de los parámetros de mayor interés en el tratamiento del suelo con jet. Ésta depende del contenido de cemento en la columna y del tipo de suelo que se ha mezclado con la lechada.

La lechadas de cemento usadas en las inyecciones de mezcla con el terreno están generalmente dosificadas con una relación en peso agua/cemento (A/C) entre 0,5 y 1,5. Se pueden emplear aditivos para reducir el contenido de agua, o para variar la viscosidad, estabilizar o disminuir la permeabilidad de la mezcla. Además se pueden usar otros materiales tales como bentonita y cenizas volantes.

De acuerdo con dos publicaciones, para la RCS se tienen los siguientes rangos de valores:

**Tabla 2.** Valores típicos resistencia a compresión simple

Tipo de suelo	RCS kg/cm <sup>2</sup>
Arcilla	15 - 40
Limos y limos arenosos	30 - 60
Arenas y gravas	40 - >100

**Tabla 3.** Resistencia a compresión simple (Bielza Feliú, A. 1999)

Tipo de suelo	RCS kg/cm <sup>2</sup>
Arcillas y limos	40 - 100
Arenas limosas	40 - 150
Arenas y gravas	60 - 300

De acuerdo con la norma japonesa, los parámetros resistentes del suelo tratado:

**Tabla 4.** Parámetros resistentes de acuerdo con la norma japonesa

Tipo de suelo	$\Phi_t$	Cohesión $c_t$ kg/cm <sup>2</sup>
Arcillas y limos	30° - 33°	RCS/3
Arenas y gravas	> 40°	RCS/3

La resistencia a la tracción (RT) se puede estimar del orden del 10% de la resistencia a compresión simple del suelo tratado.

$$RT \leq 0,10 \cdot RCS$$

La resistencia de corte (Q) del suelo tratado se puede estimar como el 8% de la resistencia a la compresión simple.

$$Q = 0,08 \cdot RCS$$

El módulo de deformación del Jet Grouting se puede correlacionar con el valor de la RCS por la expresión:

$$E = \alpha \cdot RCS$$

donde el factor adimensional depende fundamentalmente de la naturaleza del terreno inicial.

**Tabla 5.** Factor adimensional  $\alpha$  (AETESS, 2002)

Tipo de suelo	$\alpha$
Arcillas	200 - 300
Limos	400 - 700
Arenas y gravas	700 - 1000

La capacidad o tope estructural de diseño se podría estimar simplemente con la relación:

$$TE_d = \frac{A \cdot RCS}{F.S.}$$

Siendo:

A: Sección de menor diámetro de la columna

F.S.: Factor de seguridad

Sin embargo, esta relación presenta la dificultad de la correcta elección del valor de F.S. El proyectista debe evaluar la responsabilidad del elemento de Jet Grouting frente

a la seguridad del sistema y las incertidumbres respecto a la ejecución (uniformidad de parámetros de columna, presencia de agua, aparición de bolones u otras estructuras). Normalmente, los valores de F.S. varían entre los 2,0 y 5,0<sup>1</sup>.

El coeficiente de permeabilidad de la columna de Jet Grouting es en general muy bajo, tanto que el material se considera, para efectos prácticos, impermeable. De todas formas, se entrega una tabla que correlaciona los valores del coeficiente con el tipo de suelo:

**Tabla 6.** Coeficiente de permeabilidad  $K_{JG}$  (AETESS, 2002)

Tipo de suelo	$K_{JG}$ m/s
Arcilla	$10^{-7}$ a $10^{-9}$
Limo	$10^{-7}$ a $10^{-9}$
Arenas y gravas	$10^{-8}$ a $10^{-10}$

Es muy importante señalar que la permeabilidad global de un arreglo de columnas de Jet Grouting depende tanto de la permeabilidad del elemento como de la continuidad del tratamiento, es decir, del adecuado solape de columnas considerando potenciales desvíos y tolerancias de ejecución.

Ahora bien, con los Campos de Prueba es posible comprobar los parámetros empíricamente calculados y minimizar la incertidumbre del diseño mediante ensayos y observación visual, y permitir la elección del sistema más efectivo de los parámetros de inyección. Los resultados pueden llevar a una optimización del proyecto o bien, a una acertada corrección del mismo.

### 3. SUPERVISIÓN, ENSAYOS Y PROCEDIMIENTO DE CONTROL

En las obras de Jet Grouting se deben realizar dos tipos de controles: de ejecución y del resultado obtenido. La norma europea EN 12716:2001 detalla los procedimientos de supervisión, ensayos y control que se deben seguir.

Se establece en general que se hace poco práctico o casi imposible medir las dimensiones y propiedades del Jet Grouting directamente sobre un número estadísticamente significativo de elementos en una obra.

Debido a esto, el control de calidad deberá seguir un protocolo estricto en el monitoreo de parámetros de ejecución (perforación, inyección y resurgencia) por cada columna ejecutada y así se podría asumir que bajo condiciones geotécnicas similares, los mismos parámetros producirán columnas de las mismas dimensiones y propiedades.

#### 3.1. Supervisión y ensayos del proceso

Los procedimientos de supervisión del proceso de ejecución del Jet Grouting tienen como objetivo principal mantener un estándar de calidad en el proyecto. Los parámetros de control quedan debidamente registrados en un "Parte de Ejecución" y son los siguientes:

- Parámetros de perforación: se controla principalmente la velocidad de avance, presión de empuje y las coordenadas x e y (inclinación), profundidad y tiempo

<sup>1</sup> Referencia: Vukotić, G. (2013). "Jet Grouting". Clases Máster Cedex

- Parámetros de inyección: se controla la presión y caudales de inyección de el fluido o fluidos

El control de la resurgencia es otro procedimiento importante durante la ejecución del Jet Grouting. Durante la ejecución de la columna se debe mantener un control visual del flujo y características de este material sobrante de retorno en la boca del pozo. Se puede tener un control adicional tomando muestras representativas de la resurgencia y ensayándolas a compresión simple.

Si durante la ejecución se observa un comportamiento inesperado de la resurgencia, se deben revisar en tiempo real los parámetros de inyección. Por ejemplo, una reducción inesperada del flujo de resurgencia debe ser investigada y tratada de forma inmediata, ya que puede implicar la obturación del espacio anular del pozo y la posible fractura no deseada del suelo.

Según con la norma EN 12716:2001 se debe controlar la lechada de inyección, mediante con los siguientes parámetros:

- Densidad
- Decantación
- Viscosidad de Marsh
- Tiempo de fraguado
- Ensayos de compresión simple sobre muestras cilíndricas

### 3.2. Ensayo sobre los elementos construidos

La inspección visual y la medición directa son los procedimientos más efectivos para la valoración de los parámetros geométricos de los cuerpos de Jet Grouting. Sin embargo, esto requeriría excavaciones de grandes dimensiones, a lo largo de todo y prácticamente todos los elementos del proyecto, lo que lo hace inviable para los fines de la obra (tiempo, servicio del sistema suelo-estructura, costos, entre otros).



**Figura 5.** Inspección visual columnas de prueba (Pilotes Terratest S.A., 2011).

De manera indirecta, se puede obtener el diámetro (o alcance) de cuerpo de Jet Grouting mediante la extracción de un testigo inclinado respecto al eje, llevando un control de los parámetros de perforación de la muestra (posición, inclinación, longitud). Asimismo, mediante la extracción de testigos o perforación paralela a la pseudocolumna, se puede obtener la longitud real del elemento.

Para la correcta extracción de testigos para la extrapolación de datos geométricos, se deberá considerar un tiempo de fraguado mínimo y procurar que la posición sea representativa de la columna.

En caso de no ser posible la excavación, se ha desarrollado el control alternativo de parámetros geométricos (diámetro de tratamiento y verticalidad) mediante los denominados tubos sounding. Este ensayo no destructivo consiste en la introducción en el terreno de barras o tubos de acero pintados a distintas distancias medidas desde el centro de la columna previo a la ejecución del Jet Grouting. Una vez ejecutado el tratamiento, se extraen los tubos y se inspecciona la pintura en ellos (en caso de haber sido alcanzados por el chorro, la pintura se habrá salido) y la curvatura de los mismos.

### 3.3. Ensayos mecánicos

Se deben realizar ensayos sobre los elementos de Jet Grouting mediante sondeos y toma de muestras, ensayos geofísicos y ensayos de permeabilidad, entre otros, según se requiera dado el objetivo final del tratamiento.



**Figura 6.** Extracción de testigo en Campo de Prueba (Pilotes Terratest S.A., 2011).



**Figura 7.** Caja de testigo (Pilotes Terratest S.A., 2011).

Debido a que en ciertas ocasiones se hace muy difícil realizar ensayos sobre las columnas de la obra se aceptan, en general, ensayos y resultados sobre cuerpos inyectados en zonas con condiciones geotécnicas similares. En caso de no contar con experiencia previa, y aun cuando se tenga, es conveniente entonces que se proyecten columnas de prueba al pie de la obra en los llamados Campos de Prueba.

El área deberá encontrarse en una zona con características geotécnicas representativas de la obra, para así obtener las mismas propiedades geométricas y calidad final de los cuerpos de suelo tratado. En los Campos de Prueba se suelen variar los parámetros de ejecución, anteriormente identificados, para encontrar la combinación óptima con la cual se obtenga el tratamiento estimado.

Los ensayos mecánicos que se realizan sobre los testigos deberán tener en cuenta la posición de extracción respecto a la columna y el instante de tiempo respecto a la ejecución. Los ensayos más comunes son:

- Resistencia a la compresión simple
- Ensayo brasileño a tracción
- Ensayo de corte
- Ensayo Triaxial para medición de permeabilidad

#### 4. CAMPO DE PRUEBA EN ARENA

En este apartado se expone y analiza un Campo de Prueba realizado en Constitución, en la VII Región del Maule en Chile, en el marco de una obra de mitigación de los efectos de la licuefacción del suelo tipo arena suelta bajo un estanque.

El Jet Grouting se proyectó junto con pilotes de hormigón armado para formar una barrera de columnas secantes. Las columnas de Jet Grouting cumplían la función principal de barrera hidráulica y los pilotes pre-excavados aportaban la rigidez al sistema.

##### 4.1. Descripción del Campo de Prueba

Se ejecutaron 12 columnas de prueba con el método de Jet Grouting Tipo 2B (inyección de lechada y aire), con el objetivo de determinar los parámetros de ejecución óptimos para lograr las condiciones de diseño, antes definidas.

Objetivos:

- Corroborar los parámetros de diseño y ajustar los parámetros de ejecución según los diámetros y resistencias que se obtiene de la prueba.
- Determinar el diámetro máximo alcanzable en el suelo del lugar, de manera de definir el proyecto final en los sectores de particulares de cierre por interferencias de cañerías.

Las columnas se ejecutaron dentro de un área de 9m x 9m, entibada en el perímetro mediante un muro berlinés apuntalado y un sistema de punteras para la evacuación de la napa. Se proponía mediante el sistema de entibación poder excavar 4m las columnas de prueba luego de 5 días de fragüe.

Las columnas de prueba se subdividieron en 2 grupos:

- Grupo A: Corresponde a 9 columnas principales de estudio, que se ejecutaron de 4,50 metros de longitud, a las que se le asignaron un par de variables.
- Grupo B: Corresponde a 3 columnas adicionales ejecutadas en los últimos 2 metros de profundidad, con el fin de poder observar el solape que se lograba con las columnas adyacentes y cuyos centros se desplazaban en 0,90 m. Los parámetros utilizados en ellas eran iguales a su columna adyacente.



Figura 8. Fotografía panorámica Campo de Prueba en Planta de Constitución (Pilotes Terratest S.A., 2011).

Los parámetros fijos fueron los siguientes:

Tabla 7. Parámetros fijos

	Parámetros Fijos	Valor
$P_i$	Presión de Inyección	~450 bar
N	Nº de toberas	1
$N_p$	Número vueltas en cada escalón	1
e	Escalón	4 cm
A/C	Relación agua/cemento de la lechada	1:1
$d_l$	Densidad de la lechada	1,49 ton/m <sup>3</sup>

Los parámetros variables fueron los siguientes:

- $D_i$ : diámetro de las toberas  
Dentro de las toberas disponibles, se utilizaron toberas de inyección de lechada de 4,5mm, 5,0mm, 5,5mm y 6,5mm (etiqueta color gris en la fotografía) y tobera de aire de 23mm (etiquetas color azul en la fotografía).
- $V_a$ : velocidad de ascenso  
Se usaron velocidades de ascenso de 60, 40, 30 y 24 cm/min, manteniendo el escalón en 4cm y cambiando sólo los tiempos de estadía en cada escalón ( $t_i$ ) de 4s, 6s, 8s y 10s, respectivamente.

##### 4.2. Resultados obtenidos – Diámetro de columnas

Con 5 días de fragüe se realizó la excavación por medios mecánicos y manuales, para descubrir las columnas de prueba para observar, medir y extraer testigos de las columnas de prueba.

Se midieron los perímetros alcanzados en cada una de las columnas del Grupo A cada 50cm de altura, obteniendo

por cálculo simple el diámetro correspondiente. Los resultados y cálculos obtenidos se resumen en las siguientes tablas:

**Tabla 8.** Diámetros medidos columnas grupo A

Diám. Medio	2,43	2,47	2,55	1,87	2,10	2,56	1,76	1,97	2,34
Máximo	<b>2,67</b>	2,51	2,55	2,01	2,19	2,61	1,96	2,31	2,36
Mínimo	2,29	2,44	2,55	1,73	1,97	2,51	<b>1,67</b>	1,70	2,30

**Tabla 9.** Diámetros medidos columnas grupo B

Diámetro Medio	2,17	2,01
Máximo	<b>2,21</b>	2,08
Mínimo	2,15	<b>1,97</b>

Se puede concluir que a mayor diámetro de toberas ( $D_t$ ) se obtuvo un mayor diámetro de columna y a mayor velocidad de ascenso ( $V_a$ ) se obtuvo un menor diámetro de columna.



**Figura 9.** Fotografía superficie columna de prueba.

Es importante mencionar que los cuerpos alcanzados presentaron una forma más o menos uniforme a lo largo de su eje de simetría, con diferencias menores cada 50cm de altura. Una vez limpiada la superficie mediante aire a presión, se mostraban como un sólido continuo, de buena resistencia al tacto y homogéneo, no presentando fisuras, grietas u oquedades.

Las columnas del Grupo B fueron ejecutadas con el fin de poder observar el grado de intersección o solape entre dos columnas adyacentes, cuyos centros se encontraban a

**Tabla 10.** Resultado RCS testigos Campo de Prueba Constitución

Columna	Dt (mm)	Va (cm/min)	Diámetro medio (m)	Cemento (kg/m de columna resultante)	Cemento (kg/m <sup>3</sup> de columna resultante)	RCS (kg/cm <sup>2</sup> )
PA0355	6,5	60	2,55	1163,6	227,8	<b>143,0</b>
PA0355	6,5	60	2,55	1163,6	227,8	<b>110,0</b>
PA0355	6,5	60	2,55	1163,6	227,8	<b>109,0</b>
PA0450	5,0	60	1,87	460,2	167,6	<b>48,0</b>
PA0650	5,0	20	2,56	981,2	190,6	<b>75,0</b>
PA0845	4,5	30	1,97	728,0	238,9	<b>116,0</b>
PA0845	4,5	30	1,97	728,0	238,9	<b>121,0</b>

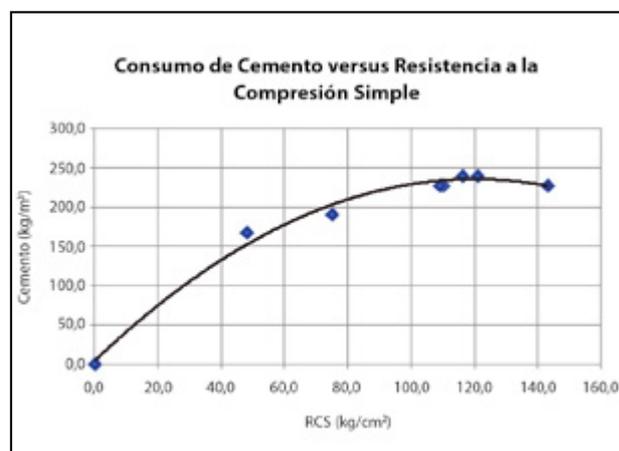
0,90m de distancia. Se comprobó la correcta ejecución y no se observaron solapes defectuosos o efecto sombra.

### 4.3. Resultados obtenidos - Resistencia a la compresión simple de columnas

Sobre las columnas terminadas y luego de 7 días de fragüe, se perforaron testigos en dirección axial y se prepararon muestras cilíndricas para someterlas a ensayos de resistencia simple a la compresión a los 21 días.

Para ello se eligieron aquellas columnas con diferentes  $V_a$  y  $D_t$ :

Los resultados de resistencia se compararon con la cantidad de cemento inyectado por m<sup>3</sup> de columna ejecutada resultante, obteniéndose una curva de regresión que permite inferir la resistencia según el peso de cemento inyectado por unidad de volumen tratado. Debe considerarse que este contenido de cemento no es el contenido de cemento real específico de la columna, ya que parte del cemento es barrido fuera de la perforación a través de la resurgencia.



**Figura 10.** Gráfica relación Consumo de Cemento versus RCS.

## 5. CAMPO DE PRUEBA EN LA GRAVA DE SANTIAGO

El Campo de Prueba consistió en la ejecución de 7 columnas de Jet Grouting tipo 2B (inyección de lecha y aire) en un área de 9m x 9m en planta, en un suelo tipo grava areno limosa en la ciudad de Santiago, Región Metropolitana, Chile.

Debido a la buena calidad geotécnica de la grava, es posible excavar 4m con taludes a 70° sin riesgo para la inspección visual de las columnas.

Todas las columnas se ejecutaron con una longitud de Jet Grouting de 4,50m. A las columnas se le asigna un par de variables ( $D_t$ ,  $V_a$ ) para su ejecución.

El campo de Prueba se excavó luego de un período mínimo de fragüe de 5 días, permitiendo la observación y medición de las columnas de Jet Grouting.



**Figura 11.** Fotografía panorámica Campo de Prueba en Santiago (Pilotes Terratest S.A., 2011).

Los parámetros fijos fueron los siguientes:

**Tabla 11.** Parámetros fijos Campo de Prueba Santiago

Parámetros Fijos - Campo de Prueba 2		Valor
N	Nº de toberas	1
e	Escalón	4 cm
A/C	Relación agua/cemento de la lechada	1:1
$d_l$	Densidad de la lechada	1,49 ton/m <sup>3</sup>

- Los parámetros variables fueron los siguientes:
- $D_t$ : diámetro de las toberas
- Dentro de las toberas disponibles, se utilizaron toberas de inyección de lechada de 3,5mm y 5,0mm (etiqueta color gris en la fotografía) y tobera de aire de 23mm (etiquetas color azul en la fotografía). Las seleccionadas se marcan con rojo.
- $V_a$ : velocidad de ascenso  
Se usaron velocidades de ascenso de 40, 30, 20 y 13 cm/min, manteniendo el escalón en 4cm y cambiando sólo los tiempos de estadía en cada escalón ( $t_e$ ) de 4s, 8s, 12s y 18s, respectivamente.

### 5.1. Resultados obtenidos – Diámetros de columnas

Se midieron los diámetros cada 50cm de altura en la medida que fuera posible. A continuación se resume lo obtenido:

**Tabla 13.** Resultado RCS testigos Campo de Prueba Santiago

Columna	$D_t$ (mm)	$V_a$ (cm/min)	Diámetro medio (m)	Cemento (kg/m de columna resultante)	Cemento (kg/m <sup>3</sup> de columna resultante)	RCS (kg/cm <sup>2</sup> )
JP001	3,5	40	2,02	856,3	266,0	<b>128,0</b>
JP002	3,5	20	1,37	1359,3	920,0	<b>60,0</b>
JP004a	3,5	13	1,68	1515,5	687,0	<b>90,0</b>
JP004b	3,5	20	1,57	830,9	428,0	<b>115,0</b>
JP004c	3,5	40	1,36	336,6	233,0	<b>244,0</b>
JP006	5	20	1,70	1128,2	499,0	<b>61,0</b>
JP007	5	30	1,80	881,1	346,0	<b>126,0</b>

**Tabla 12.** Diámetros obtenidos Campo de Prueba Santiago

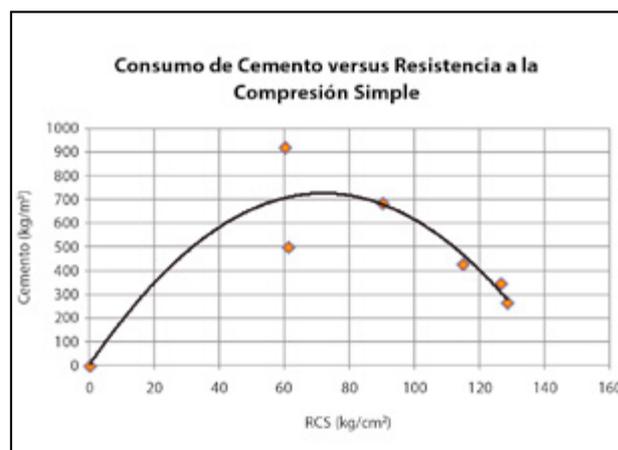
Diámetro. Medio	2,02	1,37	1,62	1,54	2,18	1,70	1,80
Máximo	2,10	1,48	1,83	1,68	2,24	1,80	1,94
Mínimo	1,91	1,24	1,53	1,34	1,94	1,59	1,62

Los cuerpos de suelo mejorado mostraron una geometría muy irregular, marcada por los cantos presentes en la grava. Su forma es poco uniforme y presentaban desviaciones importantes respecto a la vertical.

### 5.2. Resultados obtenidos - Resistencia a la compresión simple

Luego de 7 días de fragüe se extrajeron testigos radiales de las columnas de prueba de Jet Grouting. Estas muestras fueron sometidas a ensayos a compresión no confinada a los 21 días de fragüe.

Los resultados de resistencia se compararon también con la cantidad de cemento inyectado por m<sup>3</sup> de columna ejecutada resultante. Se obtuvo una curva de tendencia entre estos dos valores, sin embargo, se dejó fuera el valor de RCS de la muestra de la columna JP004c por estar fuera del rango general de los resultados.



**Figura 12.** Gráfica Consumo de Cemento versus RCS.

## 6. CONCLUSIONES

La regularidad de los cuerpos de suelo tratado con jet grouting se condice bastante con el tipo de suelo en donde se emplaza el primer Campo de Prueba en arena. El suelo tipo SP y SP-SM, de tamaño bastante uniforme de

partículas, da lugar a un medio homogéneo para la mezcla con la lechada de cemento.

Se pudo constatar que el diámetro de las columnas es directamente proporcional al caudal de inyección ( $Q_i$ ) e inversamente proporcional a la velocidad de ascenso ( $V_a$ ), o bien, al tiempo de exposición del suelo a la acción del chorro de Jet Grouting.

Por otra parte, los valores de resistencia a la compresión simple obtenidos de los ensayos están dentro de los rangos sugeridos por la literatura y, mayoritariamente, cerca del límite superior de  $100 \text{ kg/cm}^2$ .

En tanto, las columnas de prueba en la Grava Típica de Santiago presentaron una geometría muy irregular en cuanto a su diámetro y con una superficie que representa mayoritariamente los cantos de la grava. La forma irregular de las columnas puede deberse a la naturaleza del suelo en donde se realizó el Jet Grouting. La grava, clasificada como GC y GP-GC, grava arcillosa y pobremente gradada con cantos subangulares de hasta  $9''$ , presenta condiciones adversas para lograr una perforación vertical dada la desviación que pueden provocar los cantos y el efecto sombra que estos mismos pueden causar en la inyección.

En cuanto a la resistencia a la compresión simple, los valores son algo dispersos. La presencia de cantos de gran tamaño en esta grava arcillosa supone un comportamiento especial de las probetas ensayadas a compresión simple. A continuación se muestra una fotografía de un testigo antes y después del ensayo.



**Figura 13.** Fotografía testigo, antes y después del ensayo (Pilotes Terratest S.A., 2011).

Se puede ver que el testigo contenía cantos de gran tamaño. Posterior al ensayo, se observa que la falla ocurrió en la zona de contacto entre la mezcla de lechada y suelo y la superficie de los bolos. Lo anterior puede ser la causa de la dispersión de valores de la RCS, sin que ello implique que la resistencia esté fuera del rango propuesto por la literatura especializada.

Es interesante tener este fenómeno en consideración para futuras aplicaciones del Jet Grouting en la Grava de Santiago y poder tener una aproximación conservadora ante un proyecto que tenga a la RCS como variable fundamental.

Este estudio pretende ser un punto de partida para la investigación de parámetros en el tiempo. El Jet Grouting es una herramienta muy versátil en cuanto a sus aplicaciones y tipos de suelos en donde se puede ejecutar y se espera que cada día surja mayor interés por parte de empresas del rubro en aplicar esta técnica en sus obras.

Esta tecnología recién se está desarrollando e implementando en Chile. El control de los parámetros de ejecución y de resultados es algo que se hace muy recomendable en un país con tan poca experiencia con el jet y sería ideal ejecutar un Campo de Prueba por cada obra de

Jet Grouting, en una zona que presente las mismas características geotécnicas que el emplazamiento final del proyecto.

Con la ejecución de Campos de Prueba es posible comprobar los parámetros empíricamente calculados, mediante ensayos y observación visual, y permitir la elección del sistema más efectivo de los parámetros de ejecución. Los resultados y análisis de las pruebas pueden llevar a una optimización del proyecto o bien a una acertada corrección del mismo.

El control de calidad deberá seguir un protocolo estricto en el monitoreo de parámetros de ejecución (perforación, inyección y resurgencia) por cada columna ejecutada y así se podría asumir que bajo condiciones geotécnicas similares, los mismos parámetros producirán columnas de muy similares dimensiones y propiedades.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

AEN/CTN 103 Geotecnia, COMITÉ TÉCNICO (2001). *UNE-EN 12716. Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Inyecciones de alta presión. Jet Grouting.*

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

Bielza Feliú, A. (1999). *Manual de Técnicas de Mejora del Terreno.*

Delgado Alonso-Martirena, C. (2011) *Jet Grouting. Aplicaciones.* Máster en Proyecto de Estructuras de Cimentación y Contención. Universidad Politécnica de Madrid.

Essler, R., Yoshida, H. (2004). *Ground Improvement. Chapter 5 Jet Grouting.* The Cromwell Press Ltd. Publishers.

FCQ GEOTECNIA INGENIERIA (2010). *Planta Constitución. Planta de Tratamiento de Efluentes. Sismo del 27 de Febrero de 2010. Aspectos Geotécnicos.*

GEOCAV LTDA. (2011). *Mecánica de Suelos. Edificio Alférez Real / Manuel Montt.*

Gutteri, G., Kauschinger, J.L., Doria, A.C. y Perry, E.B. (1988). *Advances in the Construction and Design of Jet Grouting Methods in South America.* Second International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Paper No. 5.32.

HAYWARD BAKER GEOTECHNICAL CONTRUCTION. Recuperado de: <http://www.haywardbaker.com>

Heng, J. (2008). *Physical Modelling of Jet Grouting Process.* PhD-Thesis at the University of Cambridge.

INGENIERIA DICTUC (2011). *Informe N° 959024. Análisis de Solución de mitigación de licuefacción para el suelo de fundación de piscina de aireación, planta Constitución. Fase 3.* División Ingeniería Estructural y Geotécnica.

INGENIERÍA DICTUC (2012). *Informe N°1056028. Informe de Resultados de Ensayos de Mecánica de Suelos.* Obra Jet Grouting. Jefe de Proyecto Dr. Esteban Sáez Robert.

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

KELLER HOLDING GMBH (2011). *The SoilcreteR – Jet Grouting Process.* Brochure 67-03E.

KENETSU-PLAZA. Recuperado por: <http://www.kensetsu-plaza.com>.

Kort, I., Musante, H. y Fahrenkrog, C. (1979). *Mediciones in sitio de propiedades mecánicas de la grada para modelo de interacción y cimentación del Metro de Santiago.* 6° Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Vol. II, Lima, Perú.

Koshima, A., Guatteri, G. *Experiences of Ground Improvement for Urban Tunnels in Difficult Conditions*.

Mora, C. (2010). *Tratamiento de Mejora en el Puerto de Huelva*. 10ª Jornada Técnica SEMSIG-AETESS.

Muzas Labad, F. (1989). *Reflexiones sobre el Jet-Grouting*. Revista de Obras Públicas, páginas 89 a 94.

Ministerio de Fomento de España (1999). *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras*. Artículo 677. *Jet Grouting*.

NEMISREF (2005). *Recommendations Report. Volume 2. Mitigation of Liquefaction Risk*.

PILOTES TERRATEST S.A. (2011). *Memoria de Cálculo. Pantalla Pilotes y Jet Grouting*. Tratamiento de Suelo Reactor

Biológico, Piscina de Aireación, Planta Constitución. Revisión 2.

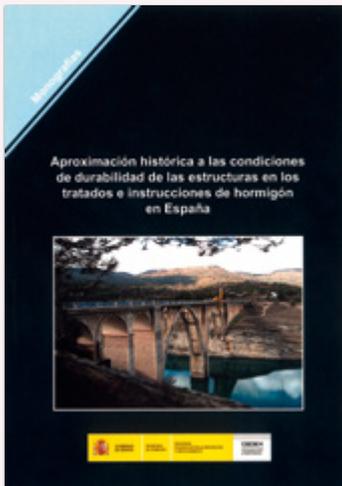
Tsao Santín, F.J. (2008). *Mejora de suelos con la técnica de Jet Grouting*.

Valenzuela, G. (1978). *Suelo de Fundación del Gran Santiago*. Boletín 33. Instituto de Investigaciones Geológicas – Chile.

Vukotić, G. (2011). *Actuaciones con Super Jet-Grouting en Pozo de Ventilación del Tr. Sants-Sagrera LAV (Barcelona) y Aplicación del Método ADECO-RS en Túnel de Pozzolatico (Florenca)*. Jornada Técnicas AETESS.

Vukotić, G. (2013). *Jet Grouting*. Clases Máster Cedex año 2013.

Zuloaga-Fábrega, I. (2004) *SuperJet-Grouting: Nueva tecnología para la mejora in situ del terreno*. Jornadas Técnicas AETESS.



## **Aproximación histórica a las condiciones de durabilidad de las estructuras en los tratados e instrucciones de hormigón en España**

**Autores:** Ismael Carpintero García

**Serie Monografías:** M-121

**ISBN:** 978-84-7790-543-1

**Año:** 2013

**P.V.P.:** 20€

En el ámbito del diseño de estructuras la durabilidad es actualmente uno de los parámetros fundamentales a considerar. En el caso de las estructuras de hormigón, debido a su mucha mayor durabilidad respecto a otros materiales como la madera o la estructura metálica, esta problemática ha surgido con bastante posterioridad a su desarrollo. De este modo el hormigón estructural ha pasado de ser un material prácticamente inalterable, que era como se consideraba en sus inicios hace 100 años, a ser un material con una durabilidad limitada respecto la vida útil de la estructura.

Actualmente el mantenimiento de las estructuras es ya uno de los mayores desafíos que tenemos en la gestión de las infraestructuras y edificios. A la hora de estudiar el estado actual de una estructura de cara a su rehabilitación es necesario conocer qué criterios de diseño se consideraron en su construcción, en particular en cuanto a los parámetros que gobiernan su durabilidad. De este modo podrá plantearse con mayor eficacia los procedimientos de reparación o protección necesarios.

La presente Monografía trata de exponer cuáles han sido estos parámetros de diseño en las estructuras de hormigón armado a partir de los tratados e instrucciones de mayor difusión en España desde la introducción de esta tecnología de construcción a principios del s.XX.



## **Guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano.(3era. edición). R-17**

**Varios**

**ISBN:** 978-84-7790-491-5

**AÑO:** 2009

**P.V.P.:** 48€

La Guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano es un documento cuyo objetivo es ordenar el estado del arte en la materia y servir de guía al usuario de las redes de saneamiento y drenaje en la aplicación de la muy abundante e inconexa normativa al respecto. El ámbito de aplicación es de las redes de saneamiento y drenaje, independientemente de cuál sea su funcionamiento hidráulico (en lámina libre, bajo presión o por vacío), o su concepción (unitarias o separativas). Quedan excluidos expresamente los emisarios submarinos y las estaciones depuradoras. Tampoco son objeto de la guía las instalaciones de recolección de las aguas residuales y pluviales en el interior de los edificios, ni las conducciones de drenaje de las obras lineales.